

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

УДК 004.9
Рег. № НИОКТР № 124012900547-1
Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФИЦ КНЦ СО РАН
чл.-корр. РАН

_____ А.А. Шпедт

«_____» января 2026 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ
ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ
СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ И ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА
(промежуточный, этап 2)

Направление фундаментальных исследований:
1.2.1. Компьютерные, информационные науки и биоинформатика
(№ FWES-2024-0014)

Руководитель НИР,
заместитель директора
ИВМ СО РАН по научной работе,
канд. физ.-мат. наук

_____ О. Э. Якубайлик

Красноярск 2026

РЕФЕРАТ

Отчёт 152 с., 69 рис., 7 табл., 3 прил.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ, ЗООБЕНТОС, СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА, ВЗВЕШЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ, ТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНВЕРСИЯ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ПРОФИЛЕМЕР, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ, УПРАВЛЕНИЕ ЭВАКУАЦИЕЙ, БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИЙ, НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Основной целью исследований является разработка, апробация и внедрение инновационных методов и технологий, направленных на решение актуальных междисциплинарных задач экологического мониторинга и оценки состояния сложных природно-антропогенных систем. Достижение данной цели обеспечивается за счет интеграции современных методов, включая дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) для масштабного сбора данных, математическое моделирование для воспроизведения и прогнозирования процессов, многомерный статистический анализ для выявления скрытых закономерностей, а также информационные технологии для создания специализированных инструментов сбора, обработки и анализа информации.

Научные результаты исследований опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Разработанное в рамках проекта прикладное программное обеспечение интегрировано в действующие региональные информационные системы, что свидетельствует о его технологической зрелости и практической востребованности.

Практическая значимость проведенных работ заключается в создании научно-методического и инструментального аппарата для экологического мониторинга, обработки пространственных данных и разработки ГИС-решений. Реализация этих разработок способствует обеспечению рационального природопользования и формирует информационную основу для поддержки принятия управленческих решений.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ, ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ	9
1.1. Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС	9
1.2. Термический режим нижнего бьефа Красноярской ГЭС: особенности, сезонная и суточная динамика	14
1.3. Динамика внутренних волн в замкнутых стратифицированных водоемах на примере озера Шира (Хакасия, Россия)	28
1.4. Применение методов многомерной статистики для выявления особенностей функционирования водных биологических сообществ	37
1.5. Анализ закономерностей распределения макробеспозвоночных в водотоках национального парка «Красноярские Столбы»	44
1.6. Методика пространственного анализа территории на основе иерархии водосборных бассейнов и многомерных данных	52
2. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА Г. КРАСНОЯРСКА: ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ	60
2.1. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН	60
2.2. Унифицированный программный интерфейс доступа к архиву данных мониторинга окружающей среды	64
2.3. Определение минимально достаточной конфигурации сети датчиков загрязнения атмосферного воздуха методами регрессионного анализа	68
2.4. Оценка репрезентативности модели NCEP GFS для анализа метеоусловий и загрязнения воздуха в Красноярске	75
2.5. Формирование и последствия зимних температурных инверсий в атмосфере Красноярска.....	84
2.6. Сравнительный анализ вертикальных температурных профилей над урбанизированной территорией Красноярска и акваторией реки Енисей.....	95
2.7. Прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами PM _{2.5} с использованием моделей машинного обучения.....	108

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕРВИСОВ.....	112
3.1. Разработка технологий мониторинга сложных систем и управления безопасностью территорий.....	112
3.2. Разработка и апробация методики управления эвакуацией на основе математического моделирования для общественных зданий массового пребывания	120
3.3. Непараметрическая методика системного анализа данных ДЗЗ с использованием структурной декомпозиции по корреляционным признакам	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования .	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях	148

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет является промежуточным (этап 2) по теме «Новые методы и технологии комплексного анализа сложных природных и антропогенных экосистем на основе современных средств моделирования и обработки данных, распределенных вычислений и цифрового мониторинга» (FWES-2024-0014); в нем содержатся результаты за отчетный период 2-го этапа проекта – 2025 год.

Предыдущий промежуточный отчет по этой теме, зарегистрированный в ЕГИСУ НИОКТР (по результатам 1-го этапа работ, 2024 г.):

– Отчет за 2024 год. Регистрационный номер ЕГИСУ: 225013005076-5.

<https://gisnauka.ru/ikrbs/detail/4G9XKDGGTDJGR3TSKRHC1O0T>

Проект направлен на создание математических методов и программных технологий для систем мониторинга и оценки природной среды. Актуальность данного направления обусловлена ростом объема и детализации геопространственных данных благодаря новым технологиям дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развитием инфраструктуры – расширением и ускорением интернет-сетей, распространением мобильных устройств и доступных датчиков для сбора экологических показателей, прогрессом в вычислительных технологиях, таких как суперкомпьютеры, облачные платформы и веб-инструменты для быстрой разработки.

Все перечисленные факторы приводят к экспоненциальному росту данных (как в количестве, так и в качестве), что делает критически важной разработку моделей и инструментов для интеллектуального анализа больших многомерных данных в реальном времени. В ответ на эти вызовы проект предполагает создание семейства модульных информационно-вычислительных систем, информационной среды, построенной на основе сервис-ориентированной архитектуры. Эта среда будет включать набор взаимосвязанных сервисов – от высокопроизводительной обработки спутниковых снимков на кластерах до легкой веб-визуализации на мобильных устройствах.

Актуальность подхода подтверждается растущим общественным запросом на открытый и оперативный доступ к данным о состоянии окружающей среды. Использование современных веб-технологий, включая облачные сервисы и интерактивные картографические платформы, позволяет удовлетворить этот запрос и вывести системы экологического мониторинга на новый уровень.

Содержание научно-исследовательских работ, выполненных в отчетный период по настоящему проекту, являются логическим продолжением ранее начатых исследований, направленных на решение задач оценки природной среды, физико-математического модели-

рования природных процессов и явлений, создания соответствующего геоинформационного программного обеспечения.

Особое внимание уделяется задачам оценки и анализа загрязнения атмосферного воздуха. Красноярск. Город Красноярск входит в число самых загрязненных в России, что делает критически важным изучение закономерностей распространения вредных веществ в его атмосфере. Созданная несколько лет назад «Система мониторинга воздуха Красноярска» предоставляет для этого уникальные пространственно-временные данные. Перспективы развития проекта включают комплексный анализ состояния атмосферы, оптимизацию наблюдательной сети, модернизацию приборной базы, а также создание программных инструментов для моделирования и прогнозирования неблагоприятных метеоусловий.

Выполненные исследования демонстрируют эффективность междисциплинарного подхода, сочетающего натурные наблюдения, дистанционное зондирование, математическое моделирование и современные методы анализа данных для решения актуальных задач экологического мониторинга и оценки состояния сложных природно-техногенных систем.

Описание в отчете основных результатов исследований сгруппировано по трем направлениям:

- Методы и модели, технологии комплексного анализа и оценки состояния сложных природных и антропогенных экосистем;
- Система мониторинга воздуха г. Красноярска: информационно-вычислительное обеспечение, обработка и анализ данных
- Проектирование и разработка алгоритмов и программ для проблемно-ориентированных информационно-аналитических систем и сервисов.

Полученные за отчетный период основные результаты изложены в соответствующих разделах настоящего отчета.

1. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ, ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

1.1. Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Температурный режим рек является важным показателем экологического состояния водных экосистем, так как, влияет на биохимические процессы, условия обитания гидробионтов и качество воды [1]. Традиционные методы измерения температуры воды, основанные на измерениях на гидропостах, обладают высокой точностью, но ограничены в пространственном и временном охвате [2]. В связи с этим все большее значение приобретают методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие получать данные о температуре поверхности воды на обширных территориях с высокой периодичностью.

Ярким примером масштабного антропогенного воздействия является зарегулирование стока реки Енисей Красноярской ГЭС, которое привело к кардинальным изменениям гидротермического режима в нижнем бьефе. Температурный режим реки является ключевым фактором, влияющим на биоразнообразие, ледовые явления, микроклимат прибрежных территорий и, в конечном итоге, на социально-экономическое развитие всего бассейна и прилегающих арктических районов Красноярского края. Однако традиционная система мониторинга, основанная на дискретных измерениях температуры воды на ограниченном числе гидрологических постов, не обеспечивает необходимой пространственно-временной детализации для решения современных научных и управленческих задач. Существующая сеть гидропостов для контроля температуры воды имеет разрешающую способность в десятки и даже сотни километров.

Для повышения детальности пространственно-временного мониторинга в рамках настоящего исследования применялись методы дистанционного зондирования на основе спутниковых данных Landsat 8/9 (Collection 2, Level 2), дополненные аналитическим моделированием гидротермических процессов.

Измерение температуры воды выполнялось в следующих пунктах (рисунок 1): 1 – г. Дивногорск (2 км от плотины Красноярской ГЭС); 2 – г. Красноярск (40 км); 3 – с. Есаулово (77 км); 4 – с. Атаманово (124 км). В пунктах 1, 2, 4 находятся гидропосты, измеряющие температуру воды в 8:00 и 20:00.

Были использованы доступные безоблачные данные в тепловом инфракрасном диапазоне со спутников Landsat 8/9 за 2016 г., 2022 г. и 2024 г. По сравнению с измерениями на гидропостах метод ДЗЗ представляет привлекательную альтернативу для количественной оценки характеристик температуры воды в различных пространственных масштабах [4].



Рисунок 1 – Контрольные пункты в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

На точность определения температуры по спутниковым данным влияют различные факторы, в том числе излучательная способность поверхности земли, атмосферные условия, углы возвышения солнца. Многочисленные сравнения с данными наземных измерений показывают, что среднеквадратичная ошибка в определении температуры LST как правило находится в пределах от 1 до 3-4°C [5]. В значительной степени эта ошибка обусловлена неточностями в расчете атмосферной коррекции. Как правило это проявляется в систематическом сдвиге значений температуры LST на несколько градусов. В то же время в идеальных условиях (ясное небо, минимальная атмосферная интерференция) погрешность может быть менее 1°C.

Относительная погрешность определения температуры поверхности между разными пикселями в пределах одной сцены Landsat (внутрисценивая относительная погрешность) обычно значительно ниже, чем абсолютная погрешность для всего изображения – это связано с тем, что ошибки калибровки, атмосферной коррекции одинаково влияют на все пиксели сцены. Для однородных поверхностей типа поверхности воды она может быть очень низкой (0.1-0.5°C). При этом порог чувствительности Landsat TIRS (минимальная разность температур, которую может зафиксировать сенсор – Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) не превышает 0.05°C [6].

Для аналитического моделирования было использовано уравнение теплопроводности, которое подробно описано в работе Шапарева и др. [7]. Решение этого уравнения имеет вид:

$$T_w(t) = \frac{1}{\rho c} \int_{t_0}^t \frac{B(x(t))}{S(x(t))} W(t) dt + T_w(0, t_0), \quad x(t) = Q \int_{t_0}^t \frac{dt}{S(x(t))}, \quad (1)$$

где $T_w(0, t_0)$ – температура воды при выходе из плотины в момент времени t_0 . Здесь t – время; x – расстояние вдоль реки от плотины; ρ – удельная плотность воды. Средняя по сечению реки скорость течения $V(x, t) = Q/S(x)$, где Q – расход воды из плотины, а $S(x)$ и $B(x)$ – площадь поперечного сечения и ширина реки. $W(t)$ – мощность энергообмена воды с окружающей средой. Расход воды Q и температура воды $T_w(0, t_0)$ задаются режимом эксплуатации ГЭС. Отношение S/B определяет среднюю глубину реки.

В таблице 1 представлены морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки.

Таблица 1 – Морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки

Номер пункта контроля	1	2	3	4
Расстояние от плотины до створа x , км	2	40	77	124
Ширина створа B , м	520	830	580	450
Площадь сечения створа S , м ²	1834	2254	2452	2513
Скорость течения реки в створе $V(x)$, км/ч	5,7	4,6	4,3	3,7
Время течения между соседними створами Δt_i , ч		7,6	9,5	11,9

Проведено сравнение значений температуры воды на гидропостах и полученные в результате аналитического моделирования для 8.00 и 20.00 3 июля 2016 года при $Q=3000$ м³/сек. Начальная точка расчетов соответствует $T_w(0, 20.00 - t_1)$, где t_0 – время измерения на гидропосту, а t_1 время течения воды от плотины до точек расчета (2, 3, 4) (таблица 1). Результаты расчетов (рисунок 2) показывают, что аналитическое моделирование хорошо описывает гидротермический режим.

Температура воды рассчитана по данным Landsat 8/9 (Collection 2, Level 2) с использованием атмосферных параметров, по алгоритму описанному в работе Гостевой и др. с коэффициентом излучения воды $\epsilon = 0,985$ [8]. Убежденные в правильности величин, полученных в результате аналитического моделирования, нами были проведены расчеты для контрольных пунктов на 11:52 (местное время пролета спутника над Красноярском) 3 июля 2016 г., 5 июля 2022 г., 26 июля 2024 г., 24 июня 2024 г.

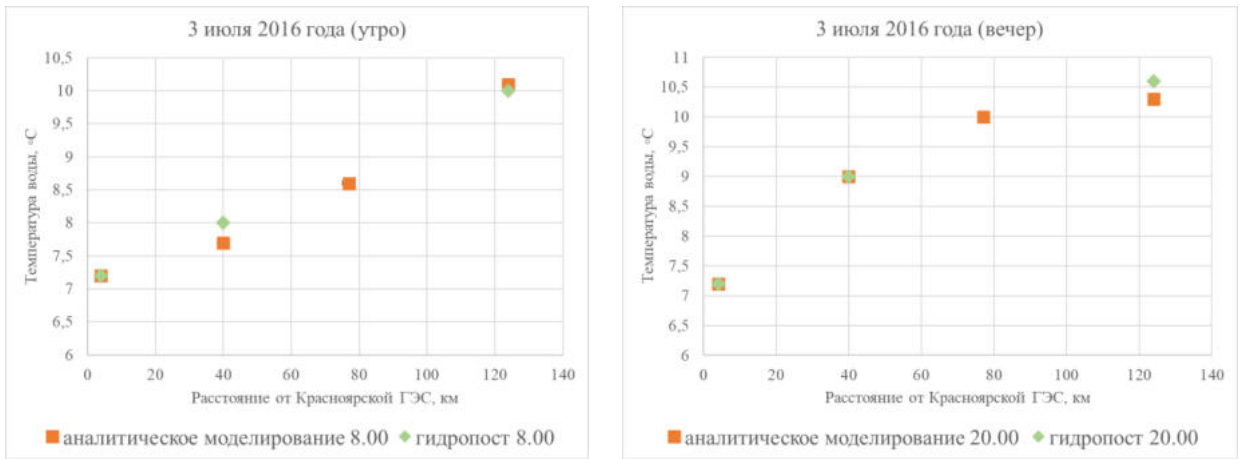


Рисунок 2 – Температура воды, определяемая аналитическим моделированием и на гидропостах

На рисунке 3 приведены результаты дистанционного зондирования и аналитического моделирования, где в качестве исходной точки применены данные ДЗЗ Landsat на расстоянии 2 км от платины Красноярской ГЭС. На рисунке 3а рассмотрена дата 3 июля 2016 года, где $Q=2100$ м³/с. На рисунке 3б расход воды $Q=2100$ м³/с, на дату 26.07.2024 $Q=2800$ м³/с, что показано на рисунке 3в, 24 июня 2024 значение $Q=3100$ м³/с (рисунке 3г).

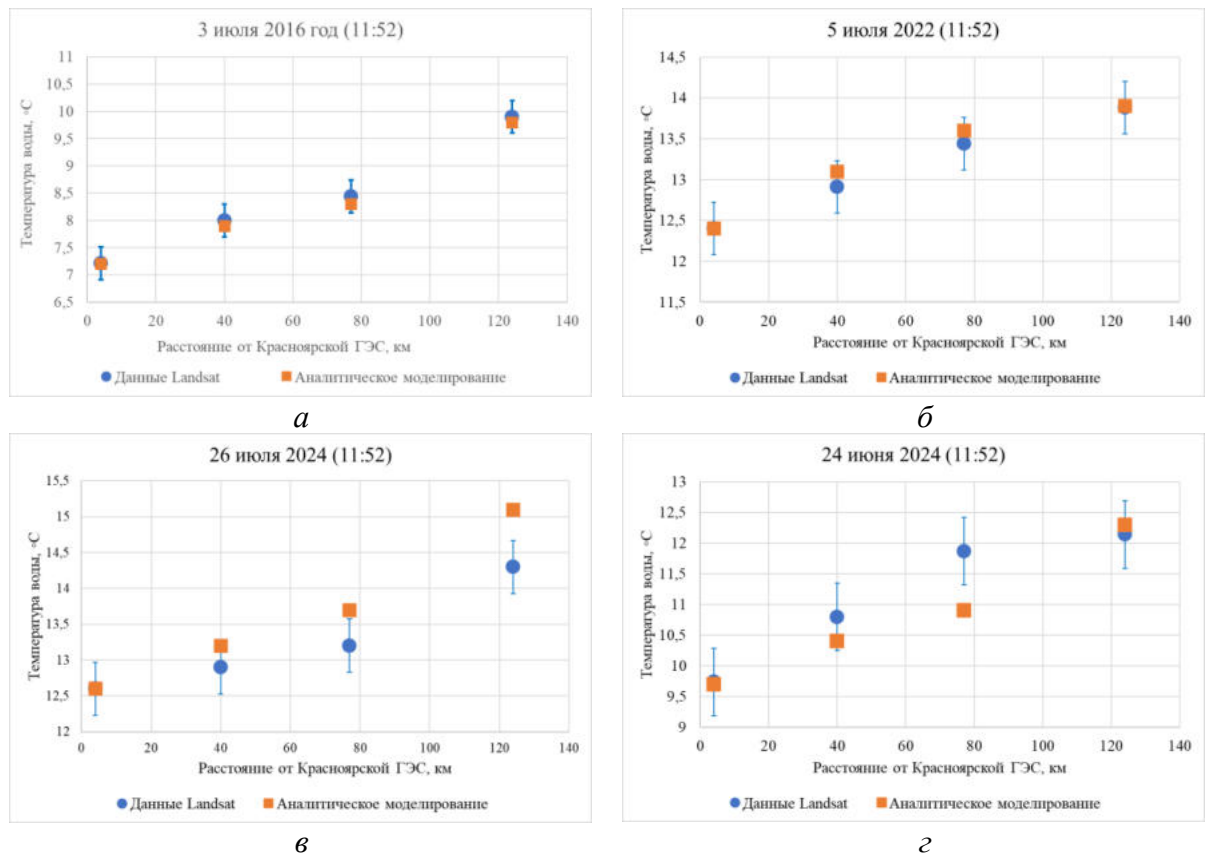


Рисунок 3 – Температура воды, определяемая методом ДЗЗ и аналитическим моделированием

Исследование показало, что расширение возможностей контроля температуры реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС может быть достигнуто за счет использования методов математического моделирования гидротермических процессов и дистанционного зондирования температуры воды. Предложенная аналитическая модель продемонстрировала работоспособность на тестовом участке на р. Енисей, показав высокий уровень совпадения с измерениями гидропостов и спутниковыми данными. Что демонстрирует ее потенциальную полезность как инструмента для интерполяции данных между редкими гидропостами и восполнения пропусков в спутниковых наблюдениях. Подтверждена критическая важность комбинирования методов: ни моделирование, ни ДЗЗ, ни гидропосты по отдельности не способны обеспечить требуемую пространственно-временную детализацию температурой воды из-за присущих им ограничений. Таким образом, предложенный комплексный подход, объединяющий моделирование и ДЗЗ, обладает значительным потенциалом для улучшения мониторинга.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Caissie D. The thermal regime of rivers: A review. *Freshw. Biol.* – 2006, 51, – p. 1389–1406.
2. Dingman L.S. *Physical hydrology*. Third edition. Waveland Press – 2015 – 670 p.
3. Космаков И.В. Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее. Кларетианум. Красноярск, 2001, 143 с.
4. Handcock R.N.; Gillespie A.R.; Cherkauer K.A.; Kay, J.E.; Burges, S.J.; Kampf, S.K. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sens. Environ.* – 2006 – 100 – p. 427–440.
5. Kirner D., Laska K., Stachon Z. Assessment and validation of Land Surface Temperature retrieval algorithms using Landsat 8 TIRS data in Antarctic ice-free areas // *Polar Science*, 2024, V. 42, 101127. DOI: 10.1016/j.polar.2024.101127.
6. Montanaro M., Levy R., Markham B. On-Orbit Radiometric Performance of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor // *Remote Sensing*, 2014, V. 6, Issue 12, pp. 11753-11769. DOI: 10.3390/rs61211753.
7. Shaparev N., Shokin Y., Yakubailik O. Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei River. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018 – 211 – 012022.
8. Гостева, А. А. Алгоритм вычисления температуры поверхности для восстановления потери данных Landsat 8-9 collection 2 level 2 / А. А. Гостева, А. К. Матузко, О. Э. Якубайлик // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 318-329. – DOI 10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329.

Основные публикации по разделу:

1. Матушко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 22, № 5, с. 346-356. [https://doi.org/ 10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356)

1.2. Термический режим нижнего бьефа Красноярской ГЭС: особенности, сезонная и суточная динамика

Температура воды является важным показателем речной системы [1-4]. Она существенно влияет на физические [5, 6], биологические [7] и химические [8] процессы, протекающие в экосистеме реки. Строительство плотин гидроэлектростанций (ГЭС) стало одним из значительных антропогенных факторов, приводящих к изменению естественного температурного режима рек [9–11]. В частности, исследования показывают, что зарегулирование стока вызывает кардинальную трансформацию годового хода температуры воды [12].

Масса воды за плотинами водохранилищ обычно демпфирует годовые температурные циклы в нижнем течении реки по сравнению с условиями их свободного течения [13]. Например, летняя термическая стратификация в верхнем бьефе ГЭС и сброс водных масс из-под термоклина приводит к тому, что температура воды в нижнем бьефе становится на 14°C прохладней, чем до зарегулирования реки, а в зимний период, наоборот, наблюдается потепление на 4°C [14]. Однако, такие большие изменения температуры наблюдаются не на всех реках и необязательно зимой и летом. Так, строительство ГЭС на реке Висла привело к тому, что наибольшее потепление (1,14°C) происходит осенью (сентябрь–ноябрь) [15].

В целом, водохранилища смягчают температурный режим ниже по течению, где температура ниже весной и летом, выше зимой, менее подвержена сезонным колебаниям и демонстрирует более позднее время наступления максимумов по сравнению с естественными условиями [16].

Несмотря на обширные исследования термического режима рек, системные исследования Енисея в зоне влияния Красноярской ГЭС ранее не осуществлялись.

Целью проведенного исследования являлось выявление закономерностей годовой динамики температуры воды реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на основе данных непрерывной регистрации. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Создание измерительного комплекса аппаратуры.
2. Анализ изменчивости температуры воды в различные гидрологические сезоны
3. Выявление особенностей термического режима в летний и зимний периоды.

Информационно-измерительный комплекс

Для решения экологических задач, связанных с оценкой влияния зарегулированной и незамерзающей реки на состояние окружающей природной среды в районе миллионного города, исследований теплофизических характеристик р. Енисей, был разработан специализированный информационно-измерительный комплекс, представляющий собой линейно распределённую по руслу реки сеть измерительных устройств. Одна часть этих устройств работает в режиме реального времени, передавая информацию в систему хранения данных через сотовую сеть – датчики такого типа применялись, в частности, для измерений характеристик воздуха (температура, влажность, концентрация взвешенных частиц PM2.5, и проч.). Другая основана на использовании автономных дата-логгеров, которые могут в течение длительного времени регистрировать такие параметры как температура воды и сохранять данные в свою память, из которой можно периодически считывать информацию.

В нашей работе использовались регистраторы температуры (дата-логгеры) TR-5L (DS1925L-F5). Они работают в диапазоне $-40 - +85^{\circ}\text{C}$ с гарантированной погрешностью измерений $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, разрешающей способностью $0,0625^{\circ}\text{C}$. Регистратор TR-5L внесен в Государственные реестры средств измерений РФ, РБ и Реестр ГСИ РК, имеет энергонезависимую память на 125 тыс. измерений. Прибор в своем составе имеет высокоэкономичный микроконтроллер, датчик температуры, буферную память и литиевую батарею, которая обеспечивает успешную эксплуатацию устройства в течение 8 лет при ежечасной записи данных по температуре. Считывание информации из памяти дата-логгеров осуществлялось с помощью портативного прибора в формате USB-флешки с периодичностью ориентировочно раз в три месяца, после чего полученная информация загружалась в систему хранения данных.

Устройства для измерения температуры воды созданного информационно-измерительного комплекса размещены в двух зонах р. Енисей. Все они записывали данные о температуре с периодичностью 1 раз в час.

Первая зона находится рядом с плотиной Красноярской ГЭС. В ее состав входили несколько дата-логгеров, расположенных непосредственно рядом с плотиной – в специально изготовленном защитном корпусе, который был прикреплен стальным тросом толщиной в 1 см к пирсу и погружен в воду на глубину около 6 метров (рисунок 4). Еще несколько дата-логгеров были установлены на киле «термокосы плавающей». «Термокоса плавающая» – это расположенный в нескольких метрах от берега «поплавок» (буй) с установленным на нем стержнем длиной около 1 м, на котором закреплено несколько дата-логгеров для регистрации температуры и влажности воздуха; несколько датчиков расположено на киле под водой – для измерения ее температуры (рисунок 5). «Поплавок» устройства стальным тросом прикреплен к металлоконструкции на берегу на расстоянии около 500 м от плотины.

Сравнительный анализ зарегистрированных данных о температуре в указанных двух точках измерений первой зоны показал их полное соответствие – отличия в показаниях приборов в среднем составляло $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ (рисунок 6). Эти данные свидетельствуют о том, что в нижнем бьефе Красноярской ГЭС происходит интенсивное турбулентное перемешивание воды, по крайней мере в районе правого берега.



Рисунок 4 – Защитный корпус для дата-логгеров на стальном тросе толщиной 1 см и место его установки на пирсе рядом с плотиной Красноярской ГЭС



Рисунок 5 – Внешний вид «термокосы плавающей», прикрепленной к пирсу на расстоянии 500 м от плотины (слева) и ее киля-«поплавка» (справа), на котором были установлены дата-логгеры для измерения температуры воды

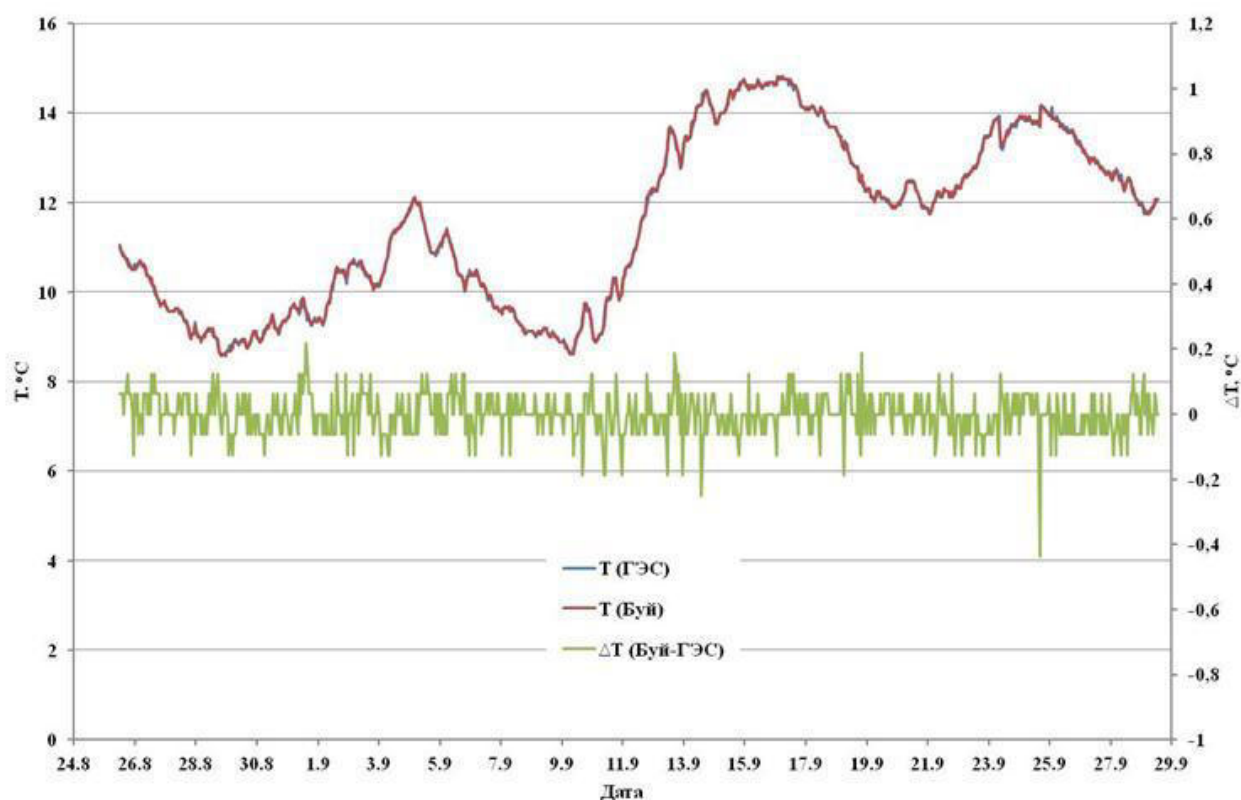


Рисунок 6 – Температура воды в районе нижнего бьефа Красноярской ГЭС в период с 25 августа по 28 сентября 2021 г., измеренная дата-логгерами, расположенными у плотины ГЭС и на киле «плавающей термокосы» (Буй); ΔT – разница температур

Вторая зона для измерения температуры воды в р. Енисей была организована в центре Красноярска, на удалении около 40 км от плотины Красноярской ГЭС – на охраняемой территории парохода-музея «Святитель Николай». Дата-логгеры прикреплялись к металлической цепи, которая, в свою очередь, крепилась к столбу парапета (рисунок 7).

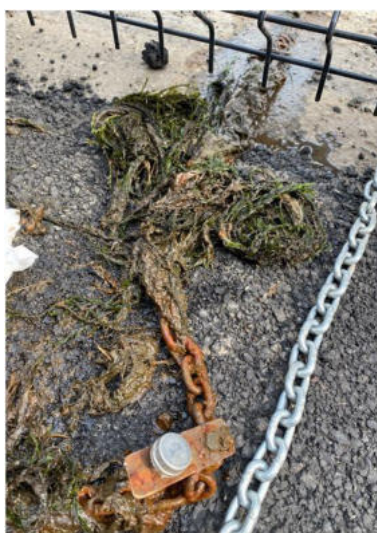
Установленные приборы позволили организовать непрерывной круглогодичный мониторинг температуры воды в р. Енисей, который был начат около 5 лет назад. Работы продолжается и в настоящее время, несмотря на периодические «форс-мажоры». Вследствие высокой турбулентности воды рядом с плотиной ГЭС стальной трос защитного корпуса для дата-логгеров толщиной 1 см (рисунок 4) был «обрезан» трением с подводными металлоконструкциями плотины через примерно полгода эксплуатации. Расположенная в нескольких метрах от берега «термокоса плавающая» (рисунок 5) в зимнее время периодически «вмораживалась» в прибрежный лед. Размещенная на территории парохода-музея «Святитель Николай» цепь с датчиками примерзала к бетонной стенке причала в условиях низких отрицательных температур зимой, а летом за неё цеплялись крупные речные водоросли (рисунок 6), что затрудняло её подъем для считывания данных.



Рисунок 7 – Место установки дата-логгера на охраняемой территории парохода-музея «Святитель Николай» (слева), обрастание цепи с установленным логгером крупными речными водорослями – макрофитами (справа)

В течение года обрастание цепи идет неравномерно. Динамика этого процесса за период с 12.05.23 по 5.06.24 показана в фотографическом изображении на рисунке 8 (а-и). Видно, что отсутствие обрастания наблюдается только с ноября (рисунок 8е) по март (рисунок 8ж). В остальное время происходит существенное накопление биомассы макрофитов на цепи.

Возникает вопрос о влиянии обрастания на показания температурного логгера. Ответ на него можно получить путем оценки тренда температуры, полученной перед подъемом обросшего датчика и после его погружения на очищенной цепи. В связи с этим, были построены графики изменения температуры с часовым интервалом для трехдневного периода. Срединой периода была дата подъема логгера. Температуру двух других дней использовали для отслеживания тренда. Тренды температур до и после удаления макрофитов показаны на рисунке 9. Анализ характера изменения температуры, показанного на этом рисунке, позволяет сделать вывод о том, что обрастание цепи, на которой расположен логгер, не влияет на результаты измерения. Надо отметить, что это справедливо для случаев, когда обрастание происходит в течение примерно одного месяца. Более длительные периоды не исследовали из-за опасения обрыва цепи и, как следствие, потери датчика с результатами уникальных измерений.



а - 12.05.23



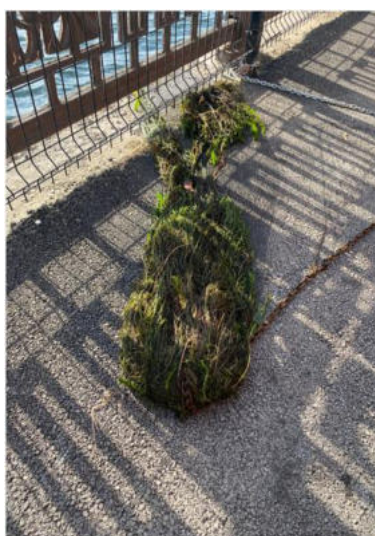
б - 2.06.23



в - 27.07.23



г - 4.09.23



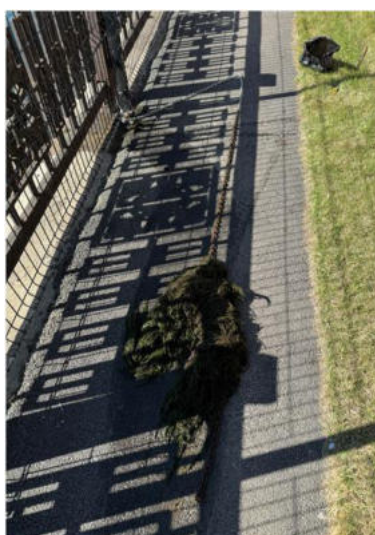
д - 12.10.23



е - 10.11.23



ж - 12.03.24



з - 7.05.24



и - 5.06.24

Рисунок 8 – Макрофитное обрастание цепи в русле реки Енисей в границах г. Красноярск в период с 12.05.23 по 5.06.24

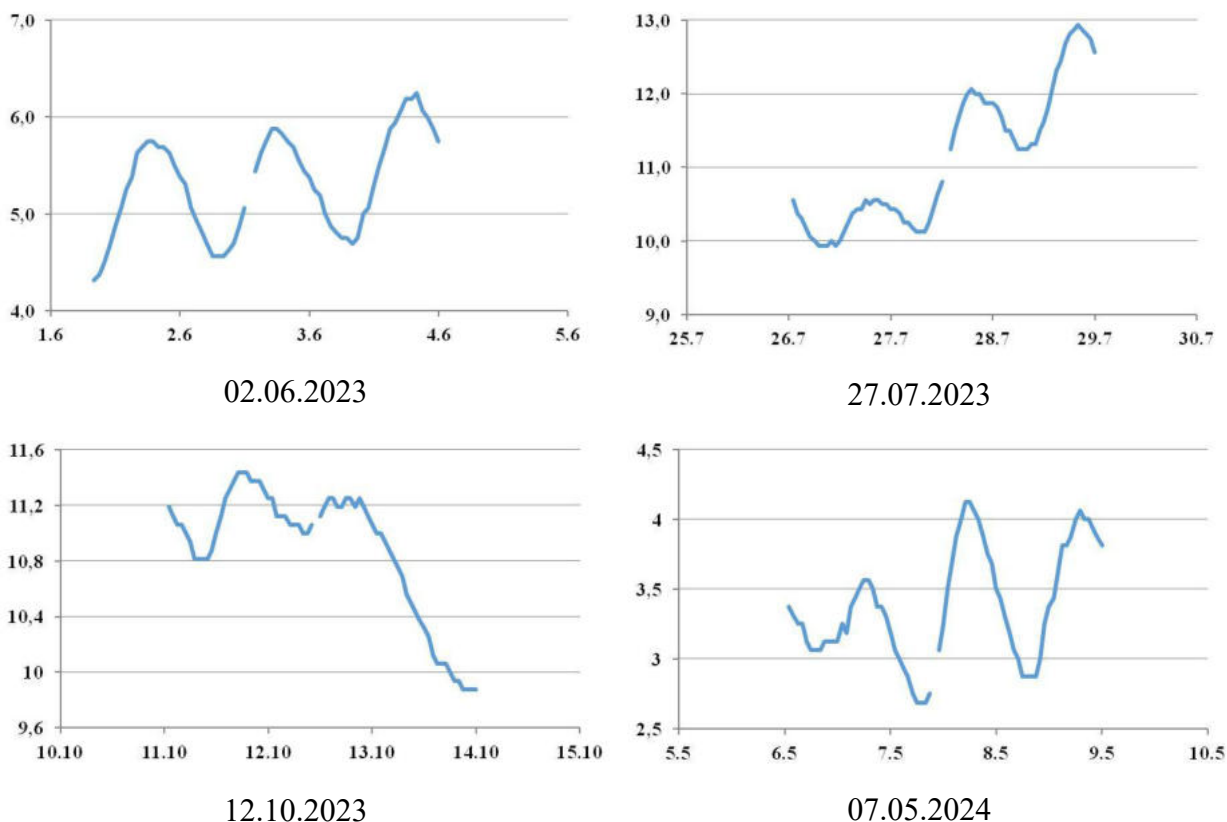


Рисунок 9 – Тренды температуры до и после удаления обрастания цепи с температурным логгером. Момент очистки цепи обозначен пробелом на графике температуры. Под каждым графиком указана дата подъема цепи

Результаты измерений температуры воды р. Енисей вблизи плотины ГЭС и в черте г. Красноярск заносились в базу геопространственных данных системы оперативного мониторинга характеристик природной среды, созданную на основе программно-технологического обеспечения геопортала ИВМ СО РАН, в рамках которого реализованы сервисы аналитической обработки и картографической веб-визуализации данных.

Температура воды в различные гидрологические сезоны

С точки зрения теплофизики изучение годового хода температуры воды в нижнем бьефе ГЭС является комплексной задачей, связанной с переносом энергии и термодинамикой стратифицированных систем.

На рисунке 10 представлена динамика температуры воды реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в 2021-2025 годах. Измерения выполнены с дискретностью в 1 час. Видно, что с начала января до конца марта наблюдается снижение температуры воды с 2,5°C до 2,0°C. Данное снижение является закономерным следствием процессов, происходящих в водохранилище в зимний период. В это время происходит формирование обширной незамерзающей полыньи ниже плотины. Значительный перепад температур на границе

«вода–воздух» интенсифицирует процессы теплопередачи (конвективный теплообмен и испарение). Температура воды в нижнем бьефе в эти месяцы превышает естественные фоновые значения, характерные для незарегулированной реки, и относительно стабильна.

Надо напомнить, что наибольшая плотность воды наблюдается при $4,0^{\circ}\text{C}$. Сток воды с более низкой температурой может свидетельствовать об обратной температурной стратификации в водохранилище, которая существует ежегодно в январе – марте.

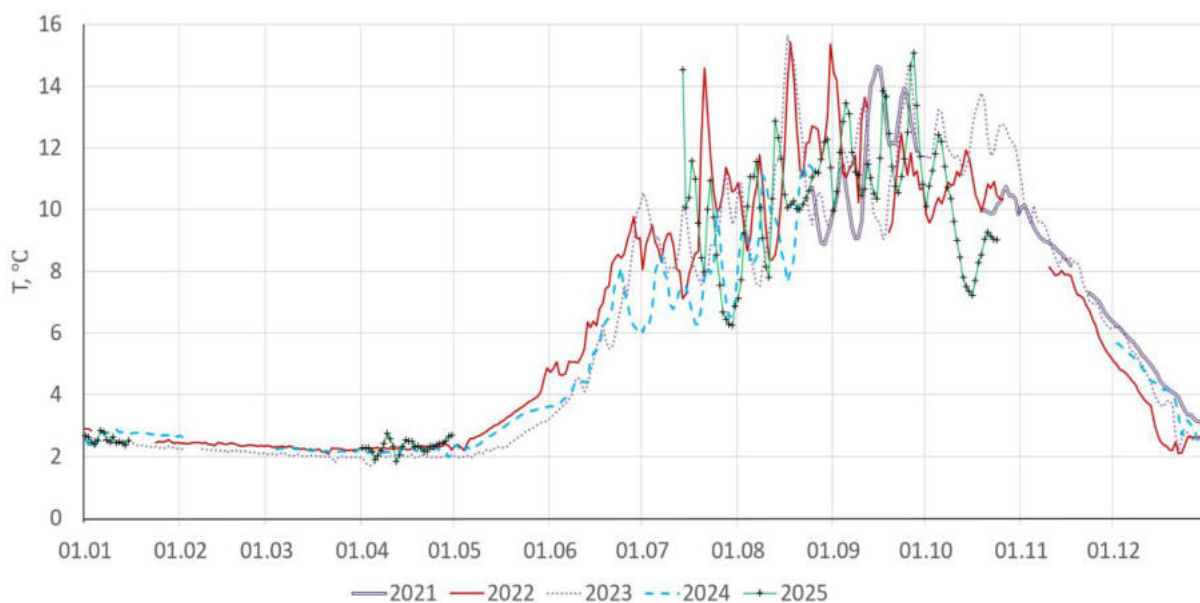


Рисунок 10 – Годовой ход температуры воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в 2021-2025 годах

С начала мая до середины июля увеличивается температура воды с $\approx 2^{\circ}\text{C}$ до $6-7^{\circ}\text{C}$. Это происходит вследствие того, что эпилимнион (верхний слой) водохранилища начинает прогреваться солнечной радиацией.

С конца июля до начала ноября относительная монотонность изменения температуры воды нарушается. Она может в течение нескольких дней увеличиваться, а затем несколько дней уменьшаться. Амплитуда таких колебаний от $\approx 1,0^{\circ}\text{C}$ до $\approx 8,0^{\circ}\text{C}$.

В ноябре и декабре амплитудные колебания прекращаются. Температура воды за два месяца квазимонотонно опускается с $\approx 10^{\circ}\text{C}$ до $\approx 2,5^{\circ}\text{C}$. Это связано с тем, что в водохранилище эпилимнион начинает охлаждаться, и при 4°C происходит разрушение прямой стратификации воды.

На рисунке 11 показана динамика среднесуточной температуры воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в августе 2022-2025 годов. Видно, что наименьшая величина вариации температуры воды, которая равнялась $\approx 4,5^{\circ}\text{C}$, была в 2024 году. Наибольшая величина вариации температуры воды, более 8°C была в 2023 году. В 2022 году значение

вариации составляло $\approx 8^{\circ}\text{C}$, а в 2025 году $\approx 6^{\circ}\text{C}$. Период возрастания температуры до максимума с последующим спадом составлял от 3 дней в 2025 году и 10 дней в 2023 году.

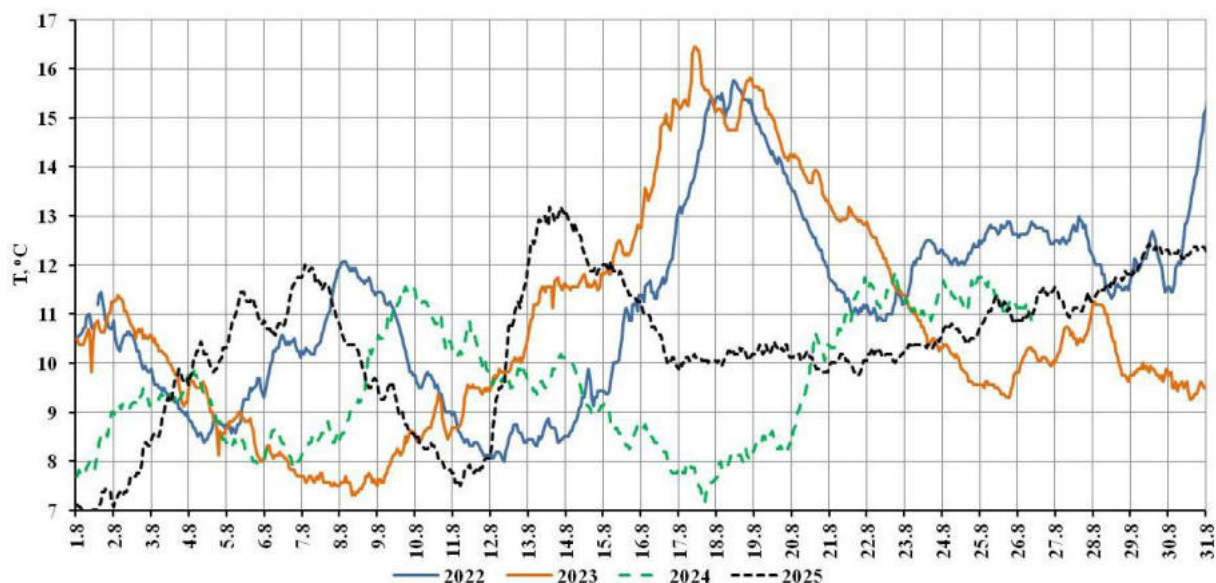


Рисунок 11 – Вариация среднесуточной температуры воды в нижнем бьефе у плотины Красноярской ГЭС в августе 2022-2025 годов

В научной литературе, доступной исполнителям этой работы, не удалось найти описания таких колебаний температуры воды в нижнем бьефе ГЭС. Можно предположить, что эти явления обусловлены следующими причинами, возникающими в верхнем бьефе:

1. дестабилизация системы: переход от стабильной стратификации к конвективному перемешиванию делает систему динамически неустойчивой;
2. внутренние волны: колебания термоклина (сейши) с периодом в несколько дней;
3. внешнее воздействие: синоптические процессы (ветер, похолодание) с периодом 10-15 дней, которые "раскачивают" систему.

Таким образом, наблюдаемые колебания – это не случайность, а прямое свидетельство активной фазы перестройки тепловой структуры водохранилища, которая "считывается" режимом работы ГЭС и проявляется в виде температурных "всплесков" в нижнем бьефе.

В августе в центральной части г. Красноярска так же наблюдается вариация температура воды р. Енисей (рисунок 12). В 2023 году она изменялась на $\approx 6,5^{\circ}\text{C}$, а в 2025 на $\approx 5,0^{\circ}\text{C}$, то есть величина вариации была приблизительно на $1,0-1,5^{\circ}\text{C}$ меньше, чем у плотины Красноярской ГЭС. Период возрастания температуры до максимума с последующим спадом составлял от 3 дней в 2025 году и 10 дней в 2023 году.

В августе 2024 года продолжительность измерения температуры воды в двух зонах была разная, и по этой причине сравнение величин вариации не проводилось.

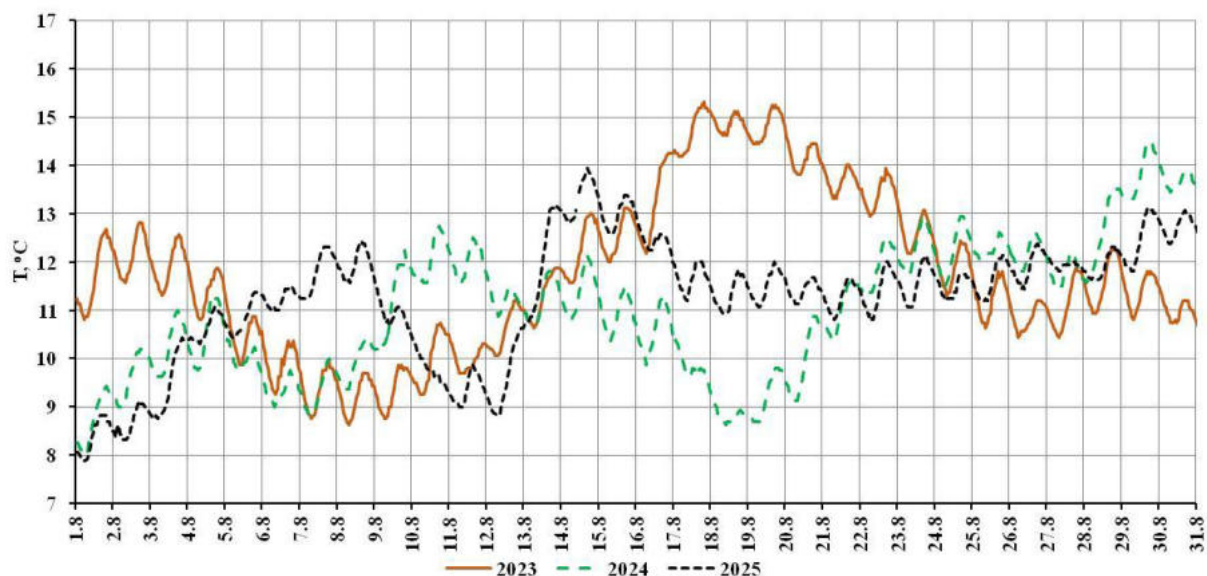
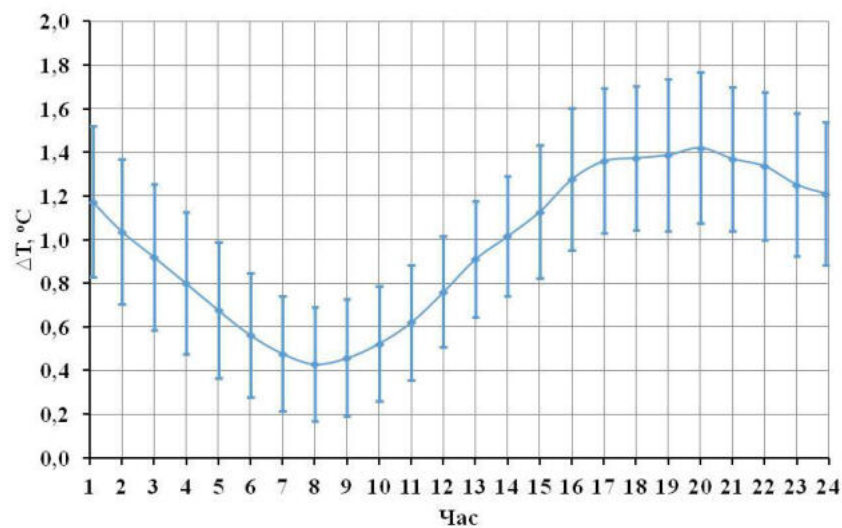


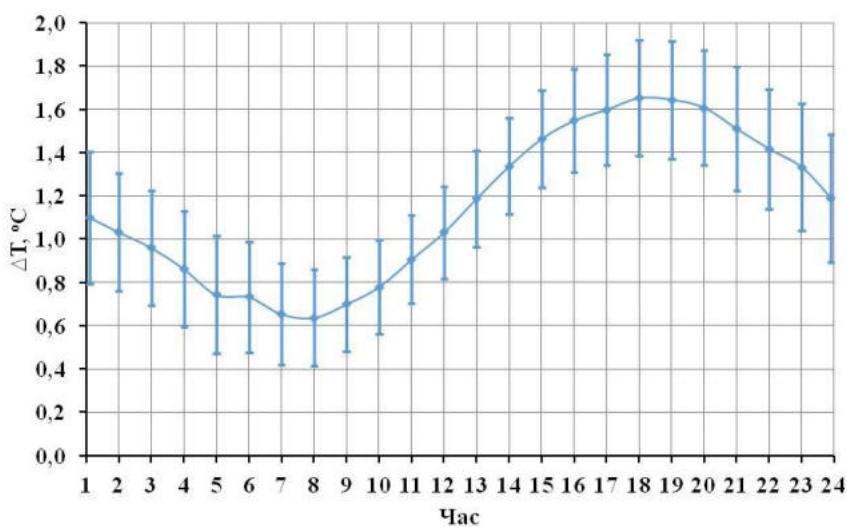
Рисунок 12 – Вариация температуры воды р. Енисей в центре Красноярска в августе 2023-2025 годов

Одно из существенных отличий динамики температуры воды, представленных на рисунках 11 и 12, состоит в том, что на рисунке 12 отчетливо проявляются суточные колебания. Амплитуда этих колебаний в 2023 году достигала $2,2^{\circ}\text{C}$, в 2024 году – $2,0^{\circ}\text{C}$, в 2025 году – $1,7^{\circ}\text{C}$. Такие колебания обусловлены прогревом воды на участке от плотины Красноярской ГЭС до зоны размещения датчика в г. Красноярске.

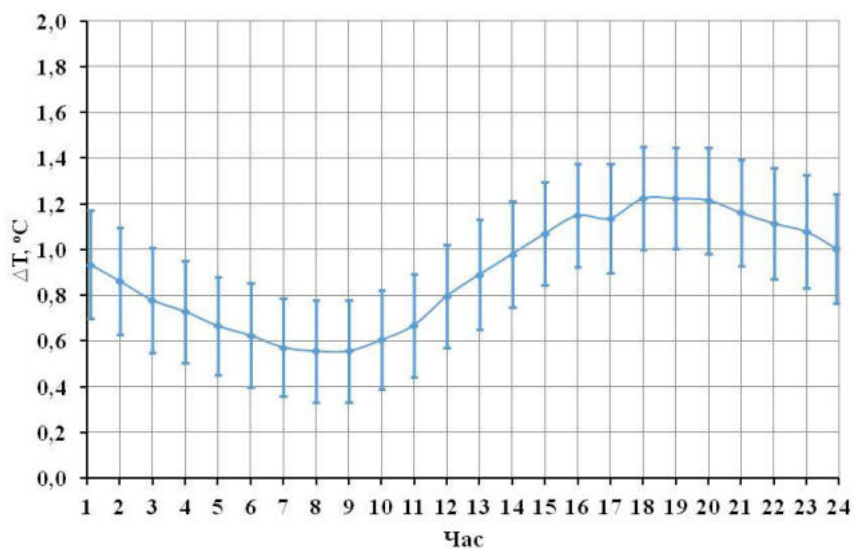
Как было сказано выше это расстояние составляет ≈ 40 км. С учетом скорости реки около 6 км/ч, время прогрева составляет приблизительно 7 часов. С учетом этого факта была рассчитана температура прогрева воды (разность температур воды в центре Красноярска и у плотины ГЭС) в течение августа с дискретностью в 1 час. Затем для каждого конкретного часа (от 1 до 24) данные были объединены в группы, для которых были рассчитаны средние значения и доверительные интервалы для вероятности $0,95$. По этим данным был построен суточный ход температурного прогрева воды (рисунок 13). Видно, что минимальные и максимальные значения температуры на графиках суточного хода статистически достоверно различаются.



2023



2024



2025

Рисунок 13 – Суточный ход температурного прогрева воды р. Енисей, который наблюдался в центре Красноярска в августе 2023, 2024 и 2025 годов

Амплитуда суточного хода температуры в августе составляла $0,99^{\circ}\text{C}$ в 2023 году, $1,02^{\circ}\text{C}$ в 2024 году, $0,67^{\circ}\text{C}$ в 2025 году. Минимальные значения прогрева наблюдаются в 8 - 9 часов, а максимальные в 18-20 часов местного времени.

На рисунке 11 показана разница температур воды в первой и второй зоне. Величина ΔT определялась как разница температур в нижнем бьефе у плотины ГЭС и на удалении 40 км от ней. Основное течение р. Енисей в этом месте направлено на береговую линию, укрепленную бетонными блоками, поэтому измерения температуры воды можно считать репрезентативными. Кроме того, именно быстрым течением реки (6 км/ч) обусловлен принос макрофитов (крупных водорослей) в район размещения дата-логгера, которые облепляют цепь, но не влияют на процесс измерения температуры.

Величина ΔT на рисунке 14 представлена практически для всего 2023 года, а для 2024 года – существуют пробелы. Это связано с тем, что по техническим причинам измерения температуры воды в районе ГЭС и/или центре города не осуществлялись.

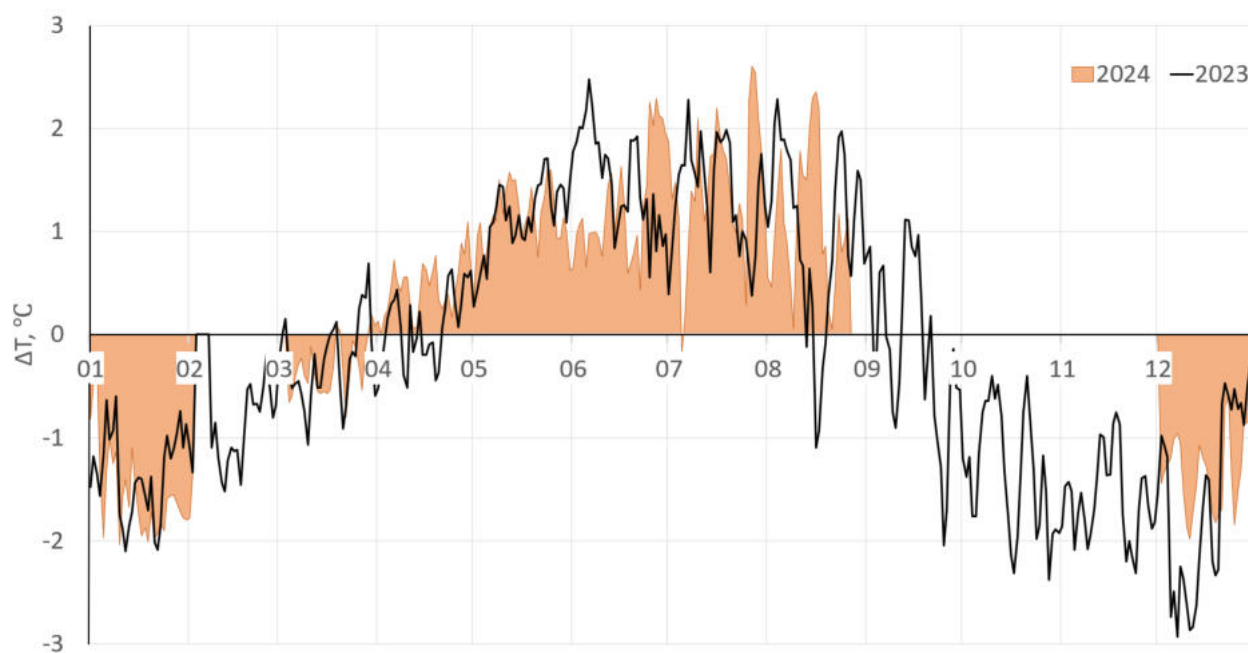


Рисунок 14 – Величина нагрева и охлаждения воды на удалении 40 км от плотины ГЭС (подробности в тексте статьи)

С точки зрения теплофизики, график ΔT на рисунке 14 показывает скорость и направление восстановления нарушенного гидроэлектростанцией теплового баланса реки. Разберем это по сезонам.

1. Летний режим: $\Delta T =$ приблизительно $+2^{\circ}\text{C}$ (температура растет по течению).

Эта ситуация возникает, когда вода в нижнем бьефе холоднее окружающей среды (атмосферы). Физическая суть: вода, сброшенная из холодного гипolimниона, имеет

энтальпию, значительно меньшую, чем равновесная с атмосферой речная вода. Речной поток является мощным стоком тепла. Процессы, объясняющие изменение ΔT :

- Конвективный нагрев: холодная вода интенсивно поглощает тепло из более теплого воздуха (при условии, что температура воздуха выше температуры воды);
- Поглощение солнечной радиации: водная поверхность поглощает коротковолновое солнечное излучение;
- Турбулентное перемешивание: по мере движения воды происходит перемешивание, которое способствует более эффективному теплообмену по всему сечению потока.

2. Зимний режим: ΔT в диапазоне от -2 до -3°C (температура падает по течению).

Эта ситуация противоположна летней и возникает, когда вода в нижнем бьефе теплее окружающей среды. Физическая суть: вода, сброшенная из гипolimниона (зимой она имеет температуру $+2^\circ\text{C}$) теплее, чем должна быть в естественной реке (около 0°C). Речной поток является источником тепла. Процессы, объясняющие отрицательные значения ΔT :

- интенсивное испарение: наиболее мощный механизм охлаждения. Теплая вода активно испаряется, затрачивая на это огромное количество энергии (латентная теплота парообразования);
- конвективная теплоотдача: теплая вода отдает тепло холодному воздуху;
- длинноволновое излучение: водная поверхность теряет тепло в виде инфракрасного излучения в атмосферу.

Выводы по разделу

В результате проведенных исследований создан информационно-измерительный комплекс аппаратуры для непрерывной регистрации температуры в нижнем бьефе Красноярской ГЭС. По результатам многолетних наблюдений впервые выявлены нерегулярные колебания температуры воды в нижнем бьефе ГЭС в период с конца июля до начала ноября. В течение 3-10 дней температура воды может изменяться от $4,5^\circ\text{C}$ до более 8°C . На расстоянии около 40 км от плотины вода нагревается до 2°C летом, а зимой охлаждается на такую же величину. В августе нагрев воды характеризуется суточным ходом температуры: в 8-9 часов нагрев минимален, а в 18-20 максимален.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. R. Yang, S. Wu, X. Wu, M. Ptak, X. Li, M. Sojka, R. Graf, J. Dai, and S. Zhu, Environmental Sciences Europe, **34**, 3 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00583-y>

2. H. Cai, S. Piccolroaz, J. Huang, Z. Liu, F. Liu, and M. Toffolon, *Environ. Res. Lett.* **13**, 5, 054016 (2018). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab9e0>
3. M. Daniels, and E. Danner, *Water Resources Research* **56**, e2019WR026751 (2020). <https://doi.org/10.1029/2019WR026751>
4. J. Sun, J. Lin, X. Zhang, Z. Xiao, B. Lin B, and H. Xu, *River Res Applic.* **37**, 579-590 (2021). <https://doi.org/10.1002/rra.3780>
5. M. Fuks, *Aquat. Sci.* **85**, 113 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00027-023-01011-4>
6. F. Costard, L. Dupeyrat, E. Gautier, and E. Carey-Gailhardis, *Earth Surf. Process. Landforms*, **28**, 1349-1359 (2003). <https://doi.org/10.1002/esp.592>
7. J.L. Lessard, and D.B. Hayes, *River Res. Applic.* **19**, 721-732 (2003). <https://doi.org/10.1002/rra.713>
8. B.O. Demars et al, *Freshwater Biology* **56**, 6, 1106-1121 (2011). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02554.x>
9. L. Long, D. Ji, D. Liu, Z. Yang, and A. Lorke. *Water* **11**, 5, 1008 (2019). <https://doi.org/10.3390/w11051008>
10. A. Maheu, A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, G. Bourque, and D. Boisclair, *Canadian J. Fish. Aquat. Sci.* **73**, 1885-1897 (2016). <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0486>
11. R.M. Preece, and H.A. Jones, *Australia. River Res. Applic.* **18**, 397-414 (2002). <https://doi.org/10.1002/rra.686>
12. C. Zhao, Y. Liu, C. Song, and Z. Yan, *Ecohydrology & Hydrobiology* **25**, 3, 705-717 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.12.002>
13. D. Caissie, *Freshwater Biology* **51**, 1389-1406 (2006). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
14. E.T. Hester, and M.W. Doyle, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* **47**, 3, 571–587 (2011). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00525.x>
15. R. Yang, S. Wu, X. Wu et al. *Environ. Sci. Eur.* **34**, 3 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00583-y>
16. J.D. Olden, and R.J. Naiman, *Freshwater Biology* **55**, 86-107 (2010).

Основные публикации по разделу:

1. Заворуев В.В., Якубайлик О.З., Соколова О.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Температурный режим реки Енисей в черте города Красноярска в 2023-2024 годах // Енисейская теплофизика. Тезисы докладов Всероссийского форума. В рамках форума: XIV Семинар вузов по теплофизике и энергетике. Школа молодых ученых «Физические основы современных нефтегазовых технологий». Красноярск, 2025. С. 187-188.

2. Zavoruev V.V., Dergunov A.V., Krasnoschekov K.V., Yakubailik O.E. A Measurement Complex for Studying the Thermophysical Characteristics of the Yenisei River Downstream of the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station Dam // Technical Physics. 2025. V. 70. No. 12. DOI 10.1134/S1063784225700550

1.3. Динамика внутренних волн в замкнутых стратифицированных водоемах на примере озера Шира (Хакасия, Россия)

Внутренние волны в стратифицированных водоемах представляют собой сложное физическое явление, оказывающее значительное влияние на гидрофизические, химические и биологические процессы. Их изучение важно для понимания механизмов переноса энергии, перемешивания водных масс, ресуспензии донных отложений и транспорта растворенных веществ [1]. Однако проведение натурных измерений гидрофизических характеристик (температуры, солености, скорости течений) ограничено дискретностью станций наблюдений. Численное моделирование дает возможность воспроизводить пространственно-временную структуру полей с достаточно высоким разрешением.

Целью настоящей работы являлось исследование динамики внутренних волн в стратифицированных озерах на примере соленого озера Шира (Хакасия) с использованием численной модели Regional Ocean Modeling System (ROMS) [2]. Основные задачи включали:

1. Адаптацию модели ROMS к условиям стратифицированного озера Шира.
2. Верификацию численных алгоритмов модели.
3. Валидацию модели путем сравнения результатов расчетов с данными натурных измерений в летний период.
4. Определение характеристик (периодов, пространственной структуры) внутренних волн, вызываемых ветровым воздействием различного направления.

Объект исследования – оз. Шира (Хакасия, Россия). Это бессточный водоем овальной формы длиной 9.4 км, шириной 5 км и максимальной глубиной 25 м. Летом озеро характеризуется устойчивой стратификацией по температуре и солености (рисунок 15), поэтому в нем можно ожидать появление внутренних волн. Основным внешним фактором, вызывающим течения и волновые процессы в озере, является ветер.

Натурные измерения. В летний период 2015 года были проведены комплексные измерения на оз. Шира. На 10 станциях (Т1–Т10) были установлены цепочки термисторов для измерения температуры воды с интервалом 30 секунд по вертикали с шагом 0.5–1.5 м. На двух станциях (ADCP 600 и ADCP 1200) с помощью акустических доплеровских профилографов тока (ADCP) измерялись трехмерные скорости течений по всему столбу жидкости с вертикальным разрешением 0.5–1 м (рисунок 16).

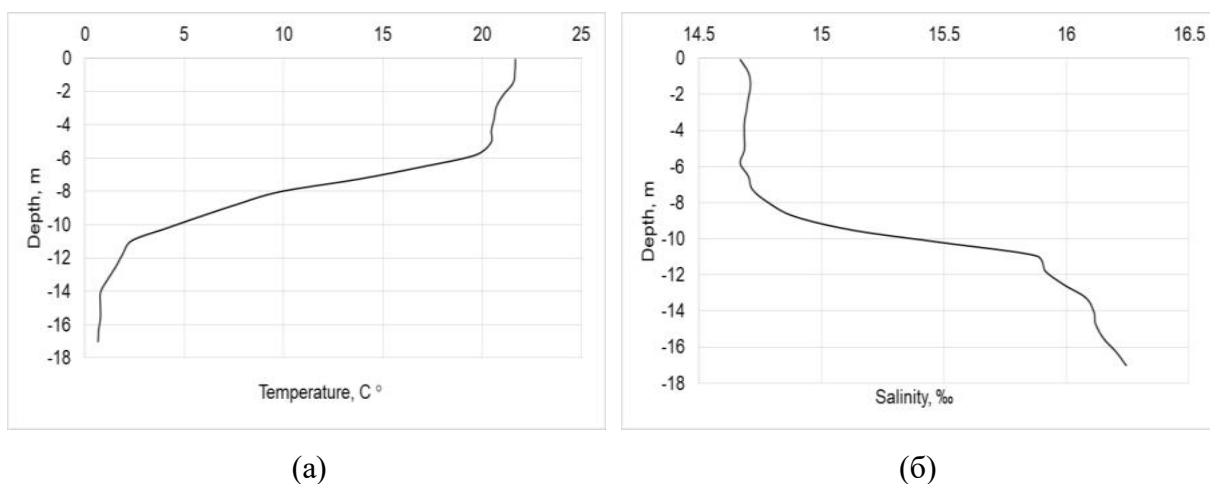


Рисунок 15 – Вертикальные профили температуры (а) и солёности (б) в озере Ши́ра летом 2018 г. (станция Т5)

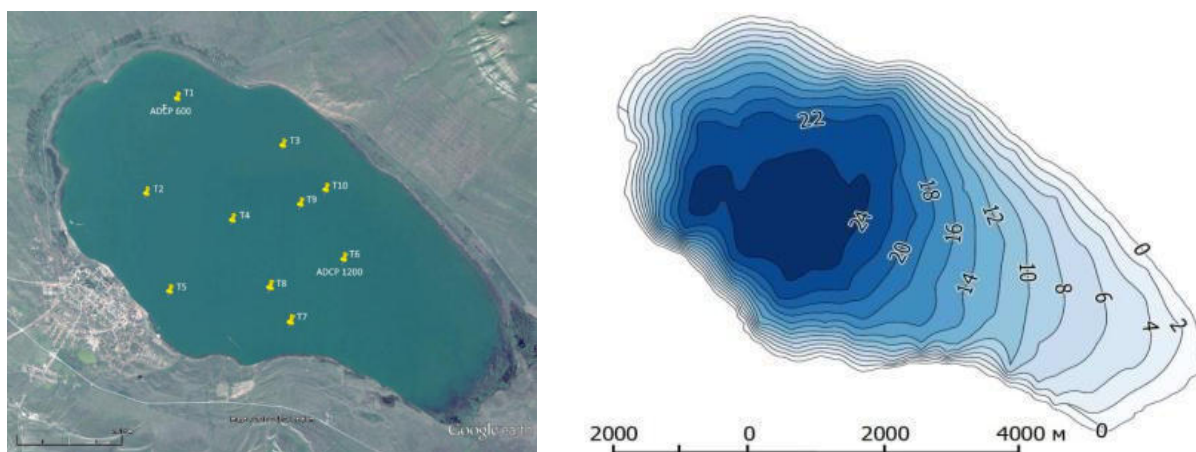


Рисунок 16 – Схема расположения станций с термоцепями (Т1–Т10) и ADCP (слева) и батиметрия оз. Ши́ра (справа)

Численная модель. Моделирование выполнено с использованием трехмерной численной модели течения жидкости ROMS, основанной на приближениях Буссинеска и гидростатики [3]. Модель использует сигма-координаты, следующие за рельефом дна, и сетку Аракавы-С. Для параметризации вертикального турбулентного обмена использовалась KPP схема [4]. На основе батиметрических данных было построено цифровое поле глубин, использованное для создания равномерной расчетной сетки [5] с шагом 15×20 м по горизонтали и 25 уровней по вертикали.

Верификация и валидация. Верификация алгоритмов ROMS проведена путем сравнения численного решения для течения жидкости в прямоугольном бассейне с аналитическим решением для модели с учетом горизонтального турбулентного обмена [6], показавшим хорошее согласование (рисунок 17).

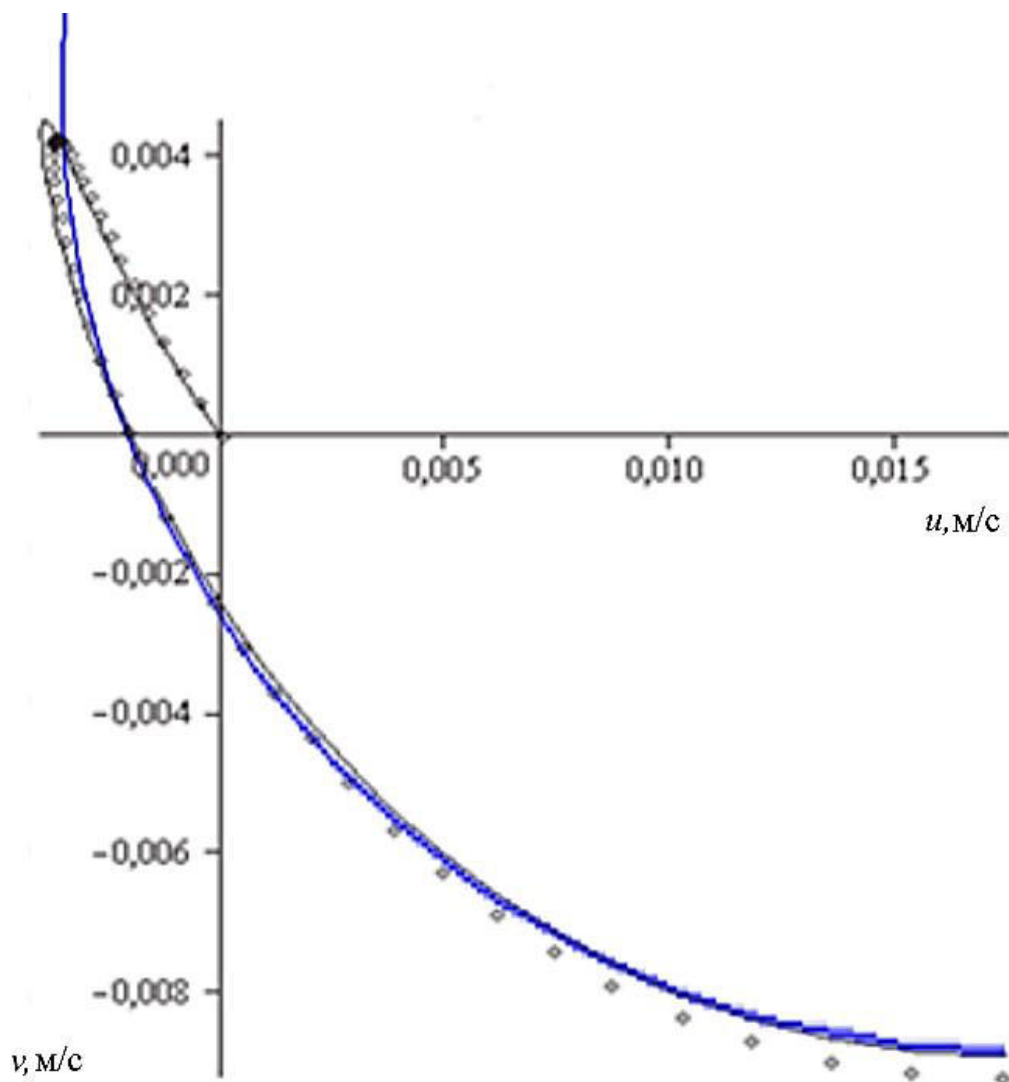


Рисунок 17 – Годографы скорости в центральной точке прямоугольного бассейна: точные решения для модели Экмана (сплошная линия) и с учетом горизонтального турбулентного обмена (ромбики); результаты расчета на основе модели ROMS (синяя сплошная линия)

Валидация модели проведена путем качественного и количественного сравнения результатов моделирования с данными натурных измерений температуры и скоростей течения, полученными в летний период 2015 года.

Спектральный анализ смоделированных и измеренных скоростей течения на горизонте 7.6 м выявил совпадающие пики, соответствующие внутренним волнам с периодами 21.3, 10.6, 7.1 и 5.3 часа (рисунок 18). Анализ колебаний изотерм также показал наличие внутренних волн с периодами 7 и 11 часов как в модельных, так и в данных натурных измерений, с амплитудой вертикальных колебаний до 5 м (рисунок 19). Это подтвердило способность модели ROMS адекватно воспроизводить динамику внутренних волн в озере Шира.

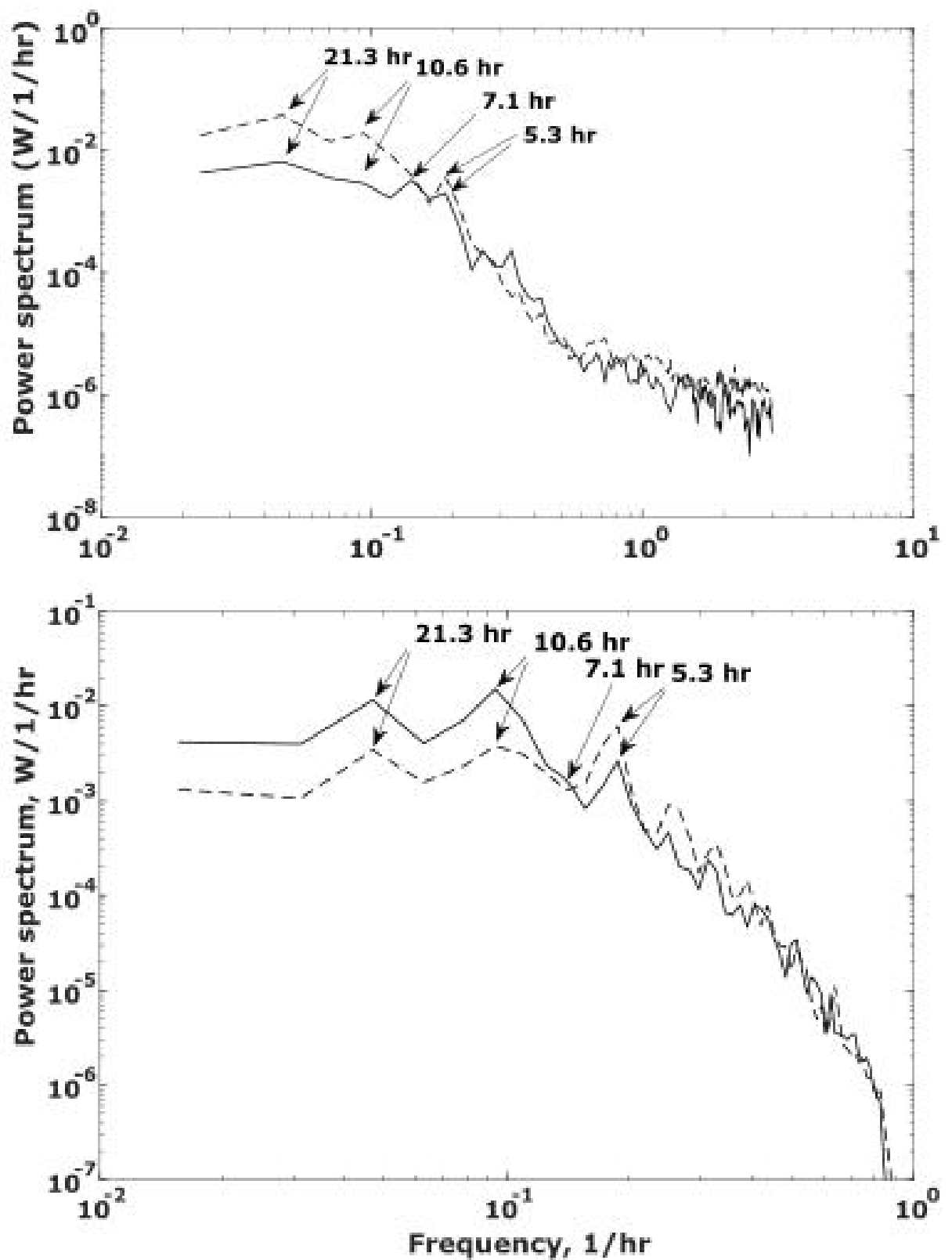


Рисунок 18 – Спектры мощности восточной (пунктирная линия) и северной (сплошная линия) компонент скорости по модельным расчетам на основе ROMS (сверху), для данных измерений ADCP (снизу)

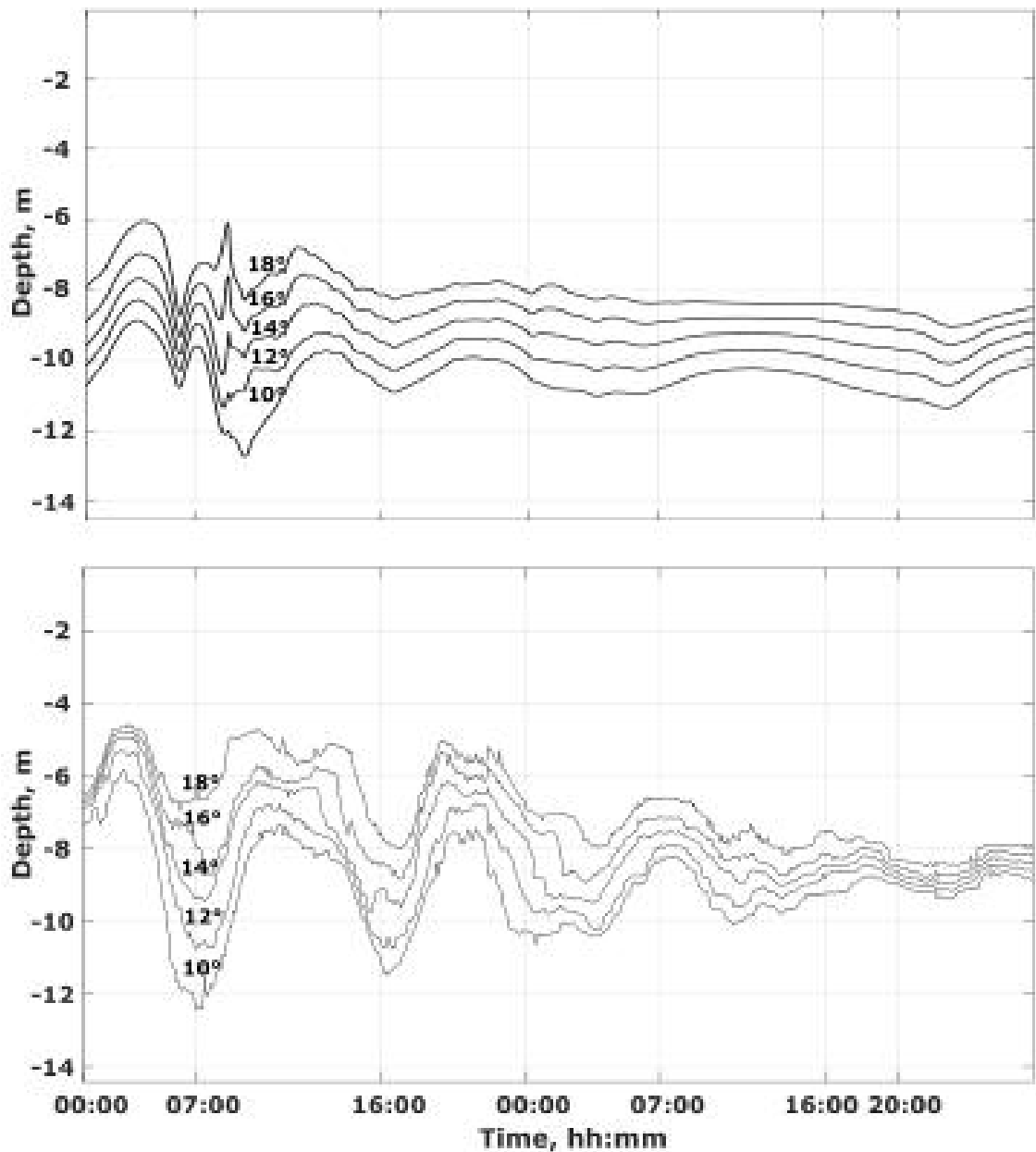


Рисунок 19 – Временные ряды усредненных каждые пять минут изотерм от 10 до 18°C (Озеро Шира, 09.07.2015–10.07.2015). Верхняя панель – результаты моделирования ROMS, нижняя – данные измерений термоцепей

Серии численных экспериментов при разном ветровом воздействии (постоянный ветер, линейно и синусоидально меняющийся) позволили выявить два основных типа внутренних сейш, возникающих после прекращения ветра:

- При западном, юго-западном, северо-западном и северном направлениях ветра наблюдается одноузловая сейша без вращения с периодом около 7 часов. Колебания термоклина (изотерма 10°C) происходят в противофазе на двух противоположных берегах озера (северо-западном и юго-восточном), в то время как в центральной части озера амплитуда колебаний мала (рисунки 20, 22).

- При северо-восточном, восточном, юго-восточном и южном направлениях ветра возникает одноузловая вращающаяся сейша с периодом около 11 часов. Узел колебаний (область с минимальной амплитудой) остается в центре озера, а гребень волны перемещается вдоль берега против часовой стрелки, совершая полный оборот за период волны (рисунки 21, 23).

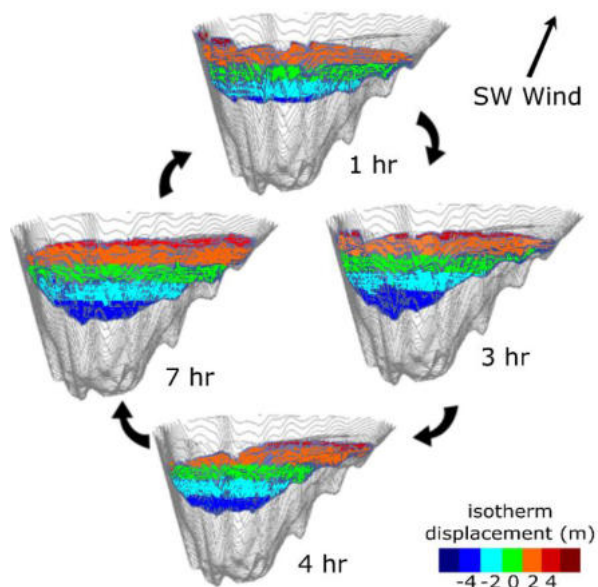


Рисунок 20 – Изоповерхности температуры (10°C), иллюстрирующие структуру внутренней волны через 1, 3, 4 и 7 часов после прекращения юго-западного ветра (одноузловая сейша)

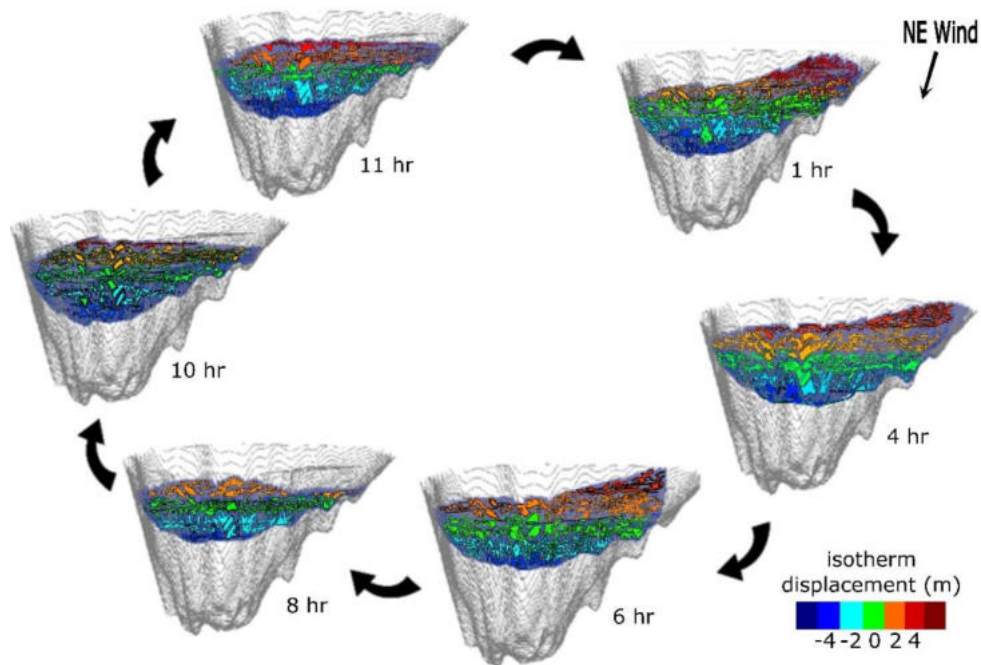


Рисунок 21 – Изоповерхности температуры (10°C), иллюстрирующие структуру вращающейся внутренней волны через 1, 4, 6, 8, 10 и 11 часов после прекращения северо-восточного ветра

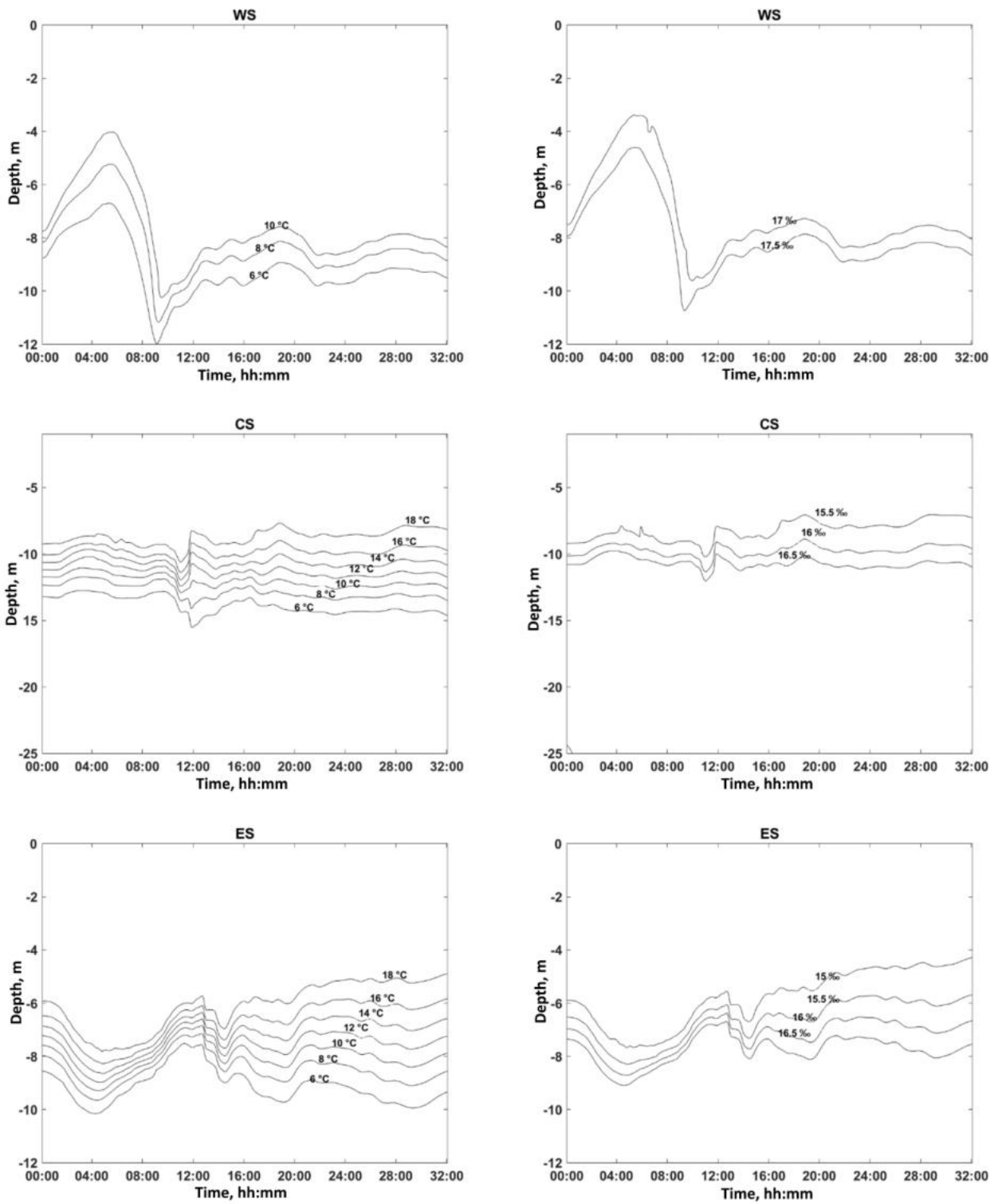


Рисунок 22 – Колебания изотерм и изогалин в случае воздействия юго-западного ветра со скоростью 8 м/с в течение 8 часов, далее 24 часа – без ветра. Слева – изотермы, справа – изогалины. Сверху вниз: WS – западная часть озера, CS – центральная, ES – восточная

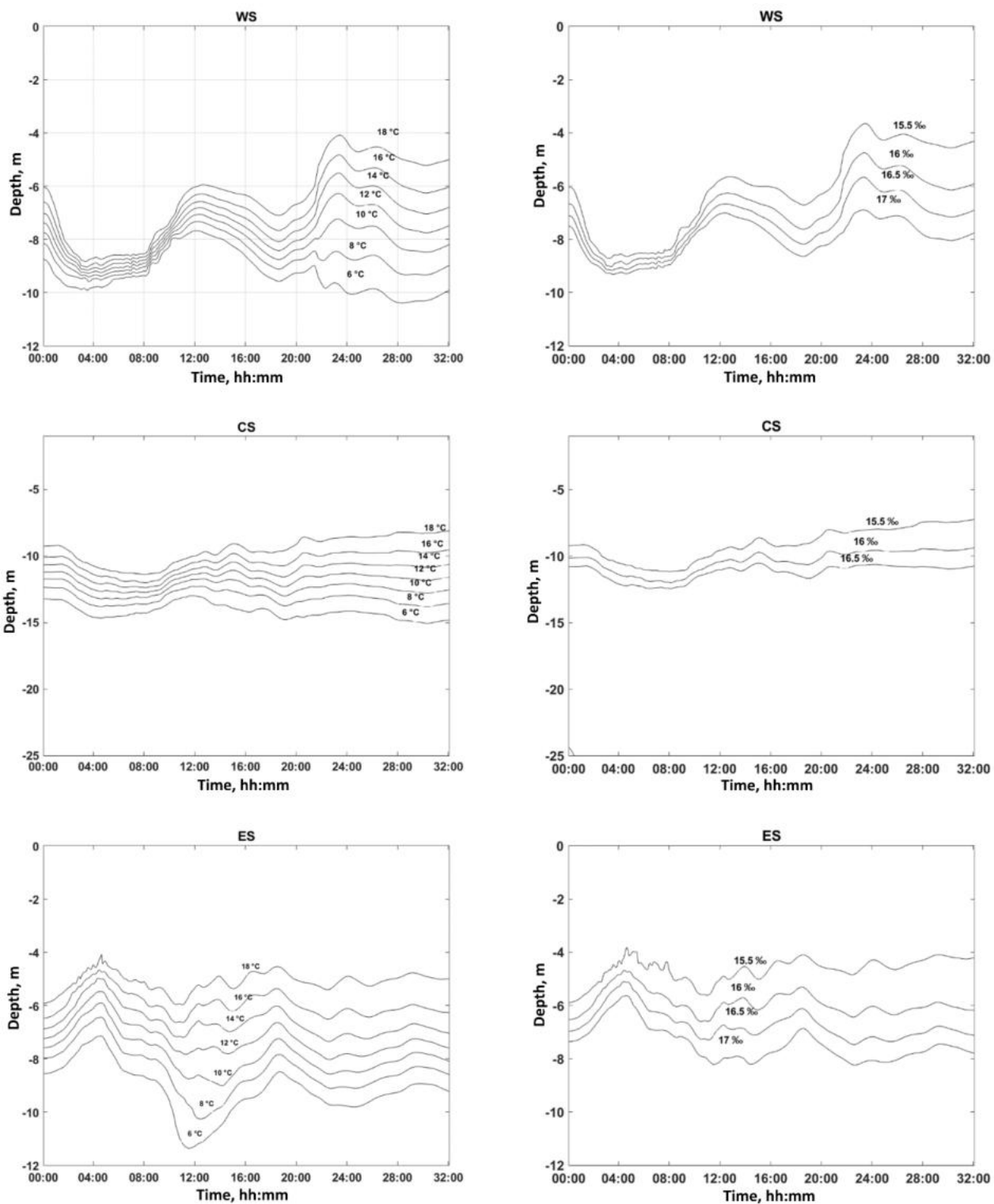


Рисунок 23 – Колебания изотерм и изогалин в случае воздействия северо-восточного ветра со скоростью 8 м/с в течение 8 часов, далее 24 часа – без ветра. Слева – изотермы, справа – изогалины. Сверху вниз: WS – западная часть озера, CS – центральная, ES – восточная

Сравнение колебаний свободной поверхности и изоповерхностей температуры показало, что внутренние и поверхностные волновые движения находятся в противофазе (рисунок 24). Подъем свободной поверхности соответствует опусканию изотерм в термоклине, и наоборот.

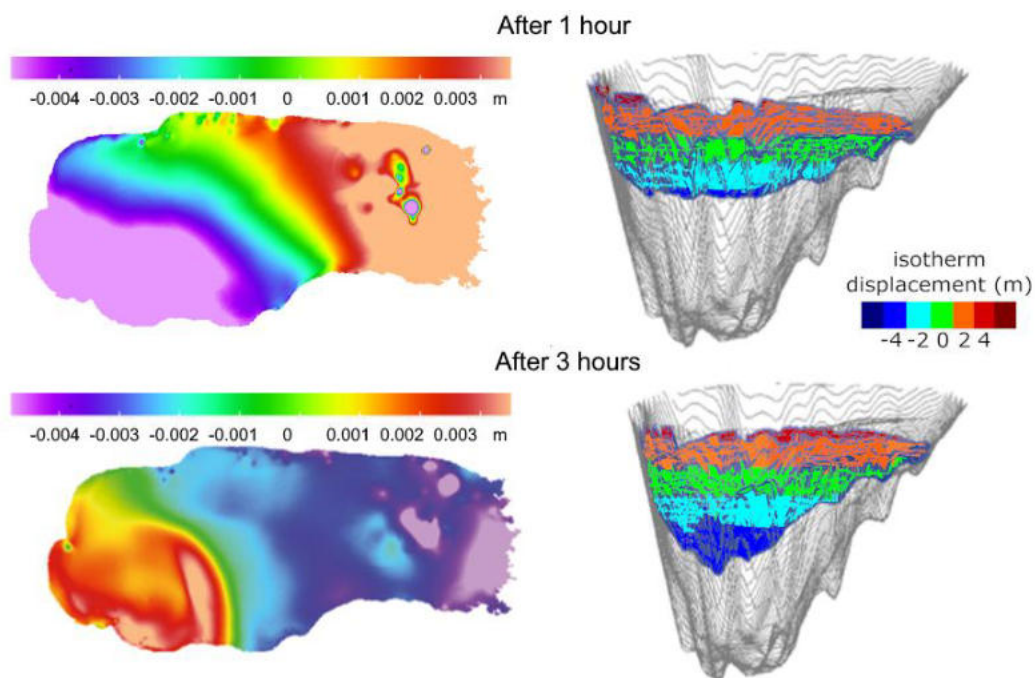


Рисунок 24 – Колебания уровня свободной поверхности (слева) и изоповерхности температуры 10°C (справа) через 1 и 3 часа после прекращения юго-западного ветра (противофаза)

На основе двухслойной модели в длинноволновом приближении и определенных периодов были рассчитаны длины внутренних волн. Для волны с периодом 11 часов длина составила ~17.5 км, что сравнимо с длиной береговой линии озера (24.5 км) и подтверждает ее бассейновый масштаб. Для волны с периодом 7 часов длина составила ~11.1 км.

Результаты моделирования показали, что в стратифицированном озере Шира после ветрового воздействия устанавливаются регулярные внутренние волны масштаба бассейна. Направление ветра определяет тип возникающей сейши: западные ветра генерируют прямолинейные одноузловые сейши, а восточные и южные – вращающиеся. Это может быть объяснено взаимодействием ветрового импульса, стратификации и морфометрии котловины озера.

Выявленные особенности динамики внутренних волн важны для понимания процессов переноса и перемешивания, которые влияют на распределение биогенных элементов, кислородный режим и экосистему озера в целом. Полученные результаты вносят вклад в понимание гидродинамики внутренних волн в стратифицированных озерах и демонстрируют эффективность использования модели ROMS для таких исследований.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Hutter, K., Wang, Y., Chubarenko, I. P. Physics of Lakes. Volume 2: Lakes as Oscillators. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
2. Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): a Split-Explicit, Free-Surface, Topography-Following-Coordinate Oceanic Model // Ocean modelling. 2005. Vol. 9, № 4. P. 347–404.
3. Hedström K. S., Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Ver. 5), U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Alaska OCS Region. OCS Study BOEM 2016-037, Mar. 2018.
4. Large, W. G., McWilliams, J. C., Doney S. C. Oceanic Vertical Mixing: A Review and a Model with a Nonlocal Boundary Layer Parameterization // Rev. Geophys. 1994. Vol. 32, № 4. P. 363–403.
5. Shchepetkin A. F., Volodko O. S., A Method for Reconstructing Bottom Topography for an Enclosed Basin from Scattered, Sparse Measurement Data, J. Oceanol. Res. (Okeanologicheskie issledovaniya), vol. 46, no. 3, pp. 67–84, 2018.
6. Компаниец Л.А., Якубайлик Т.В., Питальская (Володько) О.С. Аналитическое решение одной модели ветрового движения вязкой жидкости (трехмерный случай) // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 3. С. 50–64.

Основные публикации по разделу:

2. Volodko O.S., Lemeshkova E.N., Malcev E.D. The dynamic of internal waves in Lake Shira // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2025. vol. 13, no. 3, p. 61-77.
<https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2025056654>
3. Volodko O.S., Lemeshkova E.N. Vertical Structure of Internal Seiches in a Stratified Lake // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2025. 18(5), 687-693. <https://www.elibrary.ru/QUUJVU>

1.4. Применение методов многомерной статистики для выявления особенностей функционирования водных биологических сообществ

Усиление антропогенного влияния на водные объекты на протяжении последних пятидесяти лет привело к необходимости усиленного мониторинга качества поверхностных вод, развитию методов оценки качества, поисков объективных критериев, комплексных показателей качества вод. В системе Росгидромета контроль качества водной среды осуществляется в основном посредством химических и физико-химических методов, которые не позволяют дать полную характеристику вредного воздействия антропогенных факторов на экосистему в целом. Объективность экспертных оценок состояния водных экосистем должна

обеспечиваться комплексом не только химических, но и биологических показателей [1–3]. Наиболее перспективными индикаторами при биологическом контроле состояния водных объектов общепризнаны организмы зообентоса [3–6].

На формирование донных сообществ и экологическое состояние водных объектов оказывает влияние огромный спектр факторов [2, 5–7] как природного, так и антропогенного характера, тесно связанных между собой. Поэтому при биоиндикационном подходе рекомендуется учитывать гидрологические характеристики водотока и природные факторы среды (например, экорегион, тип водотока, его положение над уровнем моря, размер, уклон, биотоп, тип грунта) [7, 8]. Одним из естественных факторов, влияющим на оценку экологического состояния водотока, является тип донных отложений, поскольку сообщества донных беспозвоночных на различных типах субстратов существенно различаются [4, 5, 7].

На предыдущем этапе работ нами проведена оценка экологического состояния р. Енисей по составу и структуре донных сообществ через комплексный биоиндикационный индекс, разработанный с применением методов многомерной статистики. При этом набор данных формировался по результатам собственных многолетних гидробиологических исследований в р. Енисей. В задачи 2025 г. входил поиск взаимосвязи между типом субстрата и значениями биоиндикационных показателей зообентоса.

Для оценки влияния типа грунта на значения показателей качества воды проводился дисперсионный анализ с использованием параметрического критерия Фишера (F) с поправками Уэлча для степеней свободы для учета разности дисперсии в группах, а также вычислялся коэффициент детерминации R^2 . Нулевые гипотезы отвергались при $p < 0,05$.

Исходный набор данных состоял из объектов «Проба» зообентоса. Список свойств каждого объекта приведен в таблице 2. Свойства делятся на три категории:

1. *Свойства локализации места взятия пробы.* Проба берется на станции, принадлежащей определенному участку реки. На одной станции берутся несколько проб в разных местах, поэтому все пробы в пределах станции перенумерованы. На всем протяжении реки исследованы 5 участков, из них 3 расположены в Верхнем Енисее: 1 – Республика Тыва, между гг. Кызыл и Шагонар (2 станции), 2 – ниже Саяно-Шушенского водохранилища, между гг. Саяногорск и Минусинск (3 станции), 3 – от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангара (10 станций). Участок 4 находится в Среднем Енисее – от устья Ангары до д. Сургутиха (21 станция); участок 5 – в Нижнем Енисее от г. Дудинка до дельты, включая Бреховские острова (12 станций).
2. *Характеристики места взятия пробы.* Как правило, место взятия пробы характеризуется некоторым набором свойств, которые для построения комплексного биоиндикационного показателя качества воды не используются. Однако эти характеристики могут быть

полезны в предварительном или апостериорном анализе. Мы провели дисперсионный анализ биоиндикационных индексов и метрик, разделив пробы по типу грунта, на котором они были взяты. В таблице 2 приведены свойства, которые были в исследуемом наборе, но возможен и другой список этих свойств. Некоторые характеристики сохраняются в форме, указанной при взятии пробы, но дополняются числовым идентификатором, кодирующим ограниченный список значений, который отражает ту или иную классификацию свойства. Например, в нашем случае грунт дополнительно описан свойством IDSoil, значение которого выбиралось из списка: «песчано-галечная смесь», «заиленный», «песок», «макрофиты».

3. Биоиндикационные индексы и метрики качества воды в пробе. Набор метрик и индексов может быть как расширен, так и сужен. Настоящий анализ данных проведен на наборе данных, состоящем из 174 проб, взятых на 48 станциях, принадлежащих 5 участкам р. Енисей. В анализе использовали 13 биоиндикационных индексов и метрик качества воды, рассчитанных для каждой пробы зообентоса.

В Верхнем и Среднем Енисее преобладают грунты твердой фракции от песчано-галечных до каменистых, которые в различной степени могут быть подвержены заиливанию. В низовье увеличивается доля мягкой фракции – илистой и песчаной. Разнообразные макрофиты локально распространены на всем протяжении реки, но наибольшее их развитие зафиксировано ниже Саяно-Шушенской ГЭС. В результате статистического анализа прослежена взаимосвязь между типом субстрата и значениями биоиндикационных показателей зообентоса. Наилучшее качество вод по всем биоиндикационным показателям зафиксировано на твердых грунтах без заиливания, а наихудшее – в песчаных биотопах (таблица 3). Значения n и H в биотопах с заиливанием лишь незначительно отличались от чистых твердых субстратов. Дисперсионный анализ выявил, что типом грунта объяснялось от 6 до 40% вариации данных. Наиболее зависимы от типа грунта ($R^2 > 30\%$) следующие показатели: n , FBI , $BMWP$, $ASPT$, $IBGN$. Для всех индексов и метрик различия в средних оказались достоверными. Полученные нами результаты подтверждаются исследованиями по других водотокам, где удовлетворительное качество вод связано с каменисто-галечными субстратами, на которых развиваются качественно богатые литореофильные сообщества [2, 6, 9]. При этом макрозообентос мягких грунтов в реках часто отличается невысоким разнообразием по сравнению с каменистыми, что выражается в низких показателях качества вод [6, 7].

Таблица 2 – Свойства объекта «Проба» (Sample)

№ п/п	Название	Обозначение (сокращение)	Тип свойства	Комментарии
Локализация места				
1	Идентификатор участка	IDPart	Object (int)	Уникальный идентификатор участка реки. Одному участку соответствует несколько станций. Неопределенные значения недопустимы
2	Участок реки	RiverPart	Object (str)	Название участка реки
3	Идентификатор станции	IDStation	Object (int)	Уникальный составной идентификатор станции, на которой брали пробы. Формат идентификатора IDPart.IDStation, где IDStation – это порядковый номер, присвоенный станции, который является уникальным в пределах участка реки. Одной станции соответствуют несколько проб. Неопределенные значения недопустимы
4	Название станции	place	Object (str)	Название станции.
5	Идентификатор пробы	IDSample	Object (str)	Уникальный составной идентификатор пробы в формате IDPart.IDStation.номер, где номер – это порядковый номер, присвоенный пробе, который является уникальным в пределах станции. Неопределенные значения недопустимы
Характеристики места взятия пробы				
6	Берег	Bank	Object (str)	Характеристика берега (левый или правый, оконечность острова и т.д.)
7	Тип грунта	Soil	Object (str)	Текстовая характеристика грунта, описанная при взятии пробы
8	Макрофиты	Macrophytes	Object (str)	Индикатор наличия макрофитов
9	Идентификатор типа грунта	IDSoil	Object (int)	Числовой идентификатор, отражающий тип грунта из ограниченного списка значений. Список значений определяется исследователем. Неопределенные значения недопустимы.
Биоиндикационные индексы и метрики качества воды в пробе				
10	H	H	float64	Индекс видового разнообразия Шеннона
11	n	n	float64	Количество видов в пробе
12	EPTN	N-EPT	float64	Численность поденок, веснянок и ручейников
13	EPTN%	%-N-EPT	float64	Относительная численность поденок, веснянок и ручейников
14	EPTN/ChN	N-EPT/Ch	float64	Отношение численности группы EPT и хирономид. Допускаются неопределенные значения
15	EPTn	n-EPT	float64	Число видов поденок, веснянок и ручейников.
16	EPTn/Chn	n-EPT/Ch	float64	Отношение числа видов группы EPT и хирономид. Допускаются неопределенные значения
17	K	Balushkina	float64	Индекс Балушкиной
18	FBI	FBI	float64	Family Biotic Index
19	BMWP	BMWP	float64	Biological Monitoring Working Party Index
20	ASPT	ASPT	float64	Average Score Per Taxon Index
21	IBGN	IBGN	float64	Indice Biologique Global Normalize
22	G	G-Idx	float64	Олигохетный индекс Гуднайта

Таблица 3 – Значения биоиндикационных показателей, коэффициенты детерминации (R^2) и значения критерия Фишера (F) при дисперсионном анализе в зависимости от типа субстрата в р. Енисей

Тип субстрата	n	H	EPT_n	EPT_N	$EPT_{N\%}$	EPT_n/Ch_n	EPT_N/Ch_N	FBI	$BMWP$	$ASPT$	$IBGN$	K	G
ПГС	12	2,5	3,1	0,22	21,4	1,3	2,4	4,9	30	5,2	16	2,1	11
Заиленный	10	2,1	0,5	0,03	2,5	0,2	0,8	6,4	15	3,5	8	3,5	31
Песчаный	5	1,8	0,1	0,006	1,1	0,1	0,1	6,7	7	2,5	3	4,1	28
Макрофиты	10	1,8	0,7	0,04	2,5	0,2	0,1	5,2	15	3,6	8	2,1	9
R^2	0,40	0,12	0,26	0,18	0,16	0,10	0,06	0,33	0,39	0,36	0,37	0,09	0,16
F	38,1	7,4	20,0	12,2	10,5	6,0	3,71	27,9	36,8	31,5	33,4	5,3	10,4

Примечание: ПГС – песчано-галечная смесь, галька, камни.

В текущем 2025 г. имеющийся набор данных был дополнен новыми объектами «Проба» зообентоса в количестве 42 позиций. Современный отбор проб зообентоса производился в р. Енисей на участке от плотины Красноярской ГЭС до г. Красноярска, в р. Мана – от с. Нарва до устья. В настоящее время определены качественные и количественные показатели структурной организации донных сообществ, а также проанализирована их пространственная динамика. На основе этих данных будет производиться расчет биоиндикационных показателей и оценено современное экологическое состояние водотоков на исследованных участках. Дополненный датасет в совокупности с гидрологическими и геоморфологическими показателями позволяет расширить список свойств каждого из объектов «Проба» зообентоса, что повышает уровень достоверности многомерного статистического анализа при выявлении абиотических факторов, влияющих на функционирование водных биологических сообществ и экосистем в целом.

По материалам исследований в 2025 г. выявлено, что в р. Енисей на участке от плотины Красноярской ГЭС до г. Красноярска донная фауна качественно бедно представлена, выявлено всего 37 видов. Сообщества характеризовались низким видовым разнообразием (индекс Шеннона H составил 1,85 бит/экз.) Структурообразующий комплекс состоял из амфипод байкальского происхождения, хирономид и ручейников (рисунок 25). Таксоны – индикаторы благоприятного экологического состояния водотока, в частности, поденки, веснянки и ручейники, бедно представлены и качественно, и количественно. В то же время, именно эти группы беспозвоночных являются высоко чувствительными к различного рода

загрязнениям и используются в разнообразных системах биоиндикации поверхностных вод. По продольному профилю реки наибольшая плотность организмов выявлена непосредственно в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (1,3 тыс.экз./м² и 8,3 г/м²), по поперечному профилю (рисунок 26) – в русле реки на отмелях и в прибрежье островов (1,6 тыс.экз./м² и 10,8 г/м²). В среднем по участку реки уровень развития донной фауны обозначен численностью 1 тыс.экз./м² и биомассой 7 г/м². В межгодовой динамике выявлено обеднение видового состава донной фауны Енисея на приплотинном участке по сравнению с исследования начала 2000-ых годов. Кроме того, по истечении 10 лет зафиксировано снижение вдвое общей численности зообентоса на участке от плотины Красноярской ГЭС до г. Красноярск (рисунок 27).

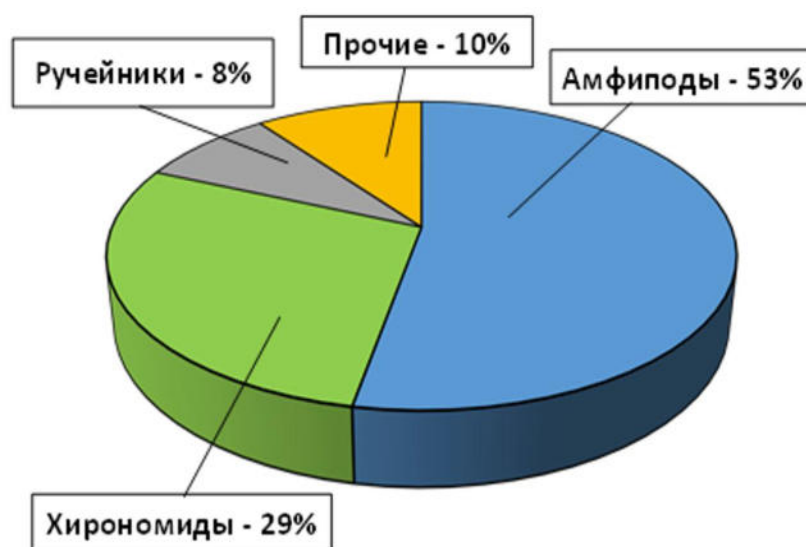


Рисунок 25 – Структурная организация донной фауны (доля от общей численности) в р. Енисей

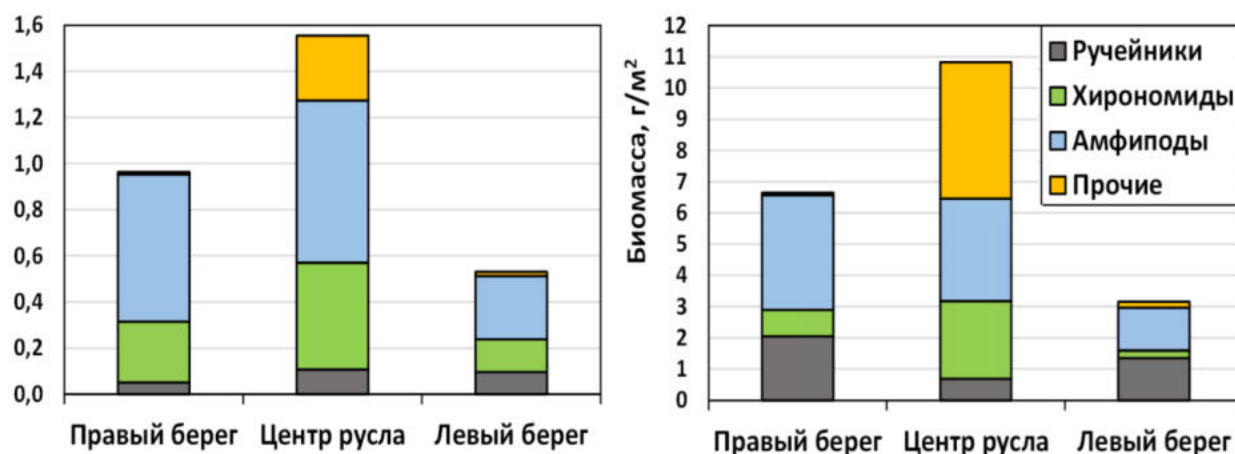


Рисунок 26 – Численность, биомасса и вклад основных таксонов беспозвоночных в сообществах зообентоса в поперечном профиле р. Енисей

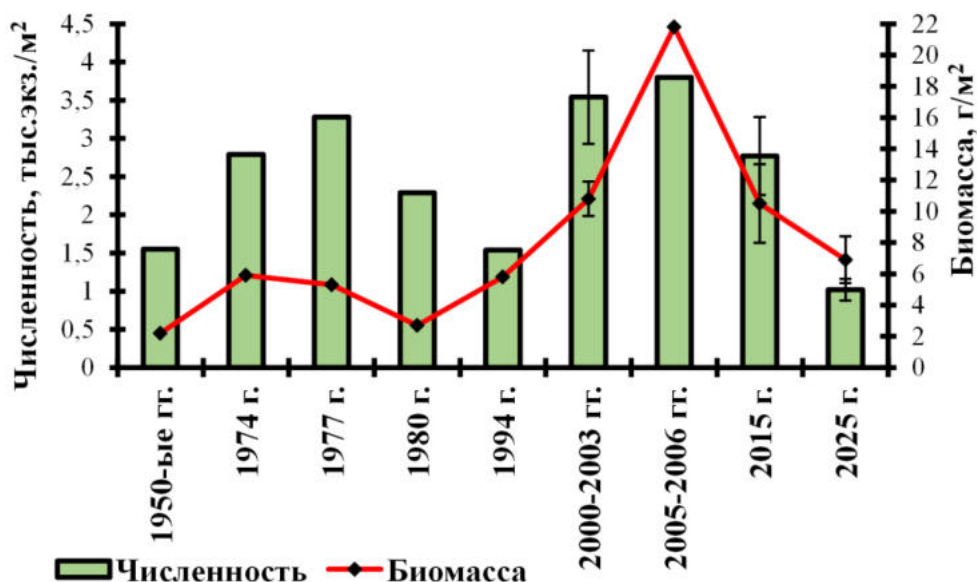


Рисунок 27 – Численность и биомасса зообентоса в р. Енисей на участке выше устья реки Ангары до и после зарегулирования плотиной Красноярской ГЭС

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Sharifinia M., Mahmoudifard A., Namin J.I., Ramezanpour Z., Yap C.K. Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities? // *Chemosphere*. 2016. V. 159. P. 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.064>
2. Головатюк Л.В., Зинченко Т.Д. Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) // *Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки*. 2020. Т. 162, № 1. С. 134–150. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.1.134-150>
3. Golubkov S.M., Balushkina E.V., Golubkov M.S. Restoration of zoobenthic communities and water quality in the river ecosystem after a decrease in the level of organic pollution // *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. № 2. С. 146–155. <https://doi.org/10.1134/S1995425520020031>
4. Yanygina L.V. Macrozoobenthos as an indicator of the ecological state of mountain water-courses // *Russian Journal of Ecology*. 2017. № 48(2). P. 185–190. <https://doi.org/10.1134/S1067413617020114>
5. Brysiewicz A., Wolska M., Czerniejewski P., Wojciechowska A. Impact of selected abiotic components on the variability of macrobenthic community structure in small watercourses // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. №. 29(1). P. 17–23. <https://doi.org/10.15244/pjoes/94840>

6. Baryshev I.A. Evaluating water quality in a large river system in the northern European Russia by macrozoobenthos // Water Resources. 2021. № 48(5). P. 774–781.
<https://doi.org/10.1134/S0097807821050055>
7. Yanygina L.V. Spatial aspects of macroinvertebrate distribution in Altai mountain streams // Inland Water Biology. 2022. № 6. P. 859–865. <https://doi.org/10.1134/s1995082922060207>
8. Павлюк Т.Е. Актуальные вопросы биоиндикации водных экосистем: российский опыт и перспективы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 4. С. 108–126. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-4-108-126>.
9. Andrianova A.V., Shan'ko Yu.V. Biotic indices and metrics of zoobenthos in the assessment of the ecological state of a large mixed-type river // Russian Journal of Ecology. 2022. № 2. P. 128–135. <https://doi.org/10.1134/S1067413622020035>

Основные публикации по разделу:

1. Андрианова А.В., Каропова Е.Д. Оценка экологического состояния р. Енисей по структуре зообентоса при помощи комплексного биоиндикационного показателя // Вестник Томского государственного университета. Биология. *(в печати)*
2. Андрианова А.В., Спицына Т.П., Хилюк А.В. Качество вод реки Енисей по гидрохимическим и биоиндикационным показателям // География и природные ресурсы. *(в печати)*

1.5. Анализ закономерностей распределения макробеспозвоночных в водотоках национального парка «Красноярские Столбы»

Речные системы являются важнейшими резервуарами ландшафтного биоразнообразия. Несмотря на то, что они составляют лишь ничтожную долю (0,0002%) от общего объема воды в мире, в них обитает большая часть глобального биоразнообразия [1]. Национальные парки, особенно расположенные в горных районах, можно рассматривать как природные острова для сохранения биоразнообразия. Донные беспозвоночные играют огромную роль в экосистемах горных водотоков. Пространственное распределение и разнообразие сообществ макробеспозвоночных формируется под влиянием совокупности нескольких факторов окружающей среды, зависящих от гидрологических условий, химических и физических параметров [2].

Национальный парк «Красноярские Столбы» расположен на северо-западных отрогах Восточного Саяна, граничащих со Среднесибирским плоскогорьем, на территории Красноярского края. Естественными границами этой особо охраняемой природной территории служат правые притоки реки Енисей, а именно: река Базаиха на северо-востоке, река Мана и река Большая Слизнева на юго-западе. Территория национального парка «Красно-

ярские Столбы» обладает хорошо развитой гидрографической сетью общей протяжённостью более 300 км. Первые гидробиологические и ихтиологические исследования водотоков этой территории были проведены в 1956–1960 годах. Современные данные о состоянии донных организмов в этих водотоках отсутствуют. Целью нашего исследования была инвентаризация видового состава зообентоса и оценка влияния различных экологических факторов местообитания на разнообразие и распределение донных беспозвоночных в речной сети горного региона, расположенного в пределах национального парка «Красноярские Столбы».

В летний период (июль-август) 2020–2023 гг. были проведены рекогносцировочные исследования макрозообентоса 24 водотоков, дренирующих территорию Национального парка «Красноярские Столбы». Материал для исследований зообентоса был собран и обработан в соответствии со стандартными гидробиологическими методиками [3]. Всего было отобрано 57 количественных и 9 качественных проб зообентоса. Координаты всех проб проб были зафиксированы при помощи GPS и внесены в геоинформационную базу национального парка [4]. Расположение изученных водотоков показано на рисунке 28.

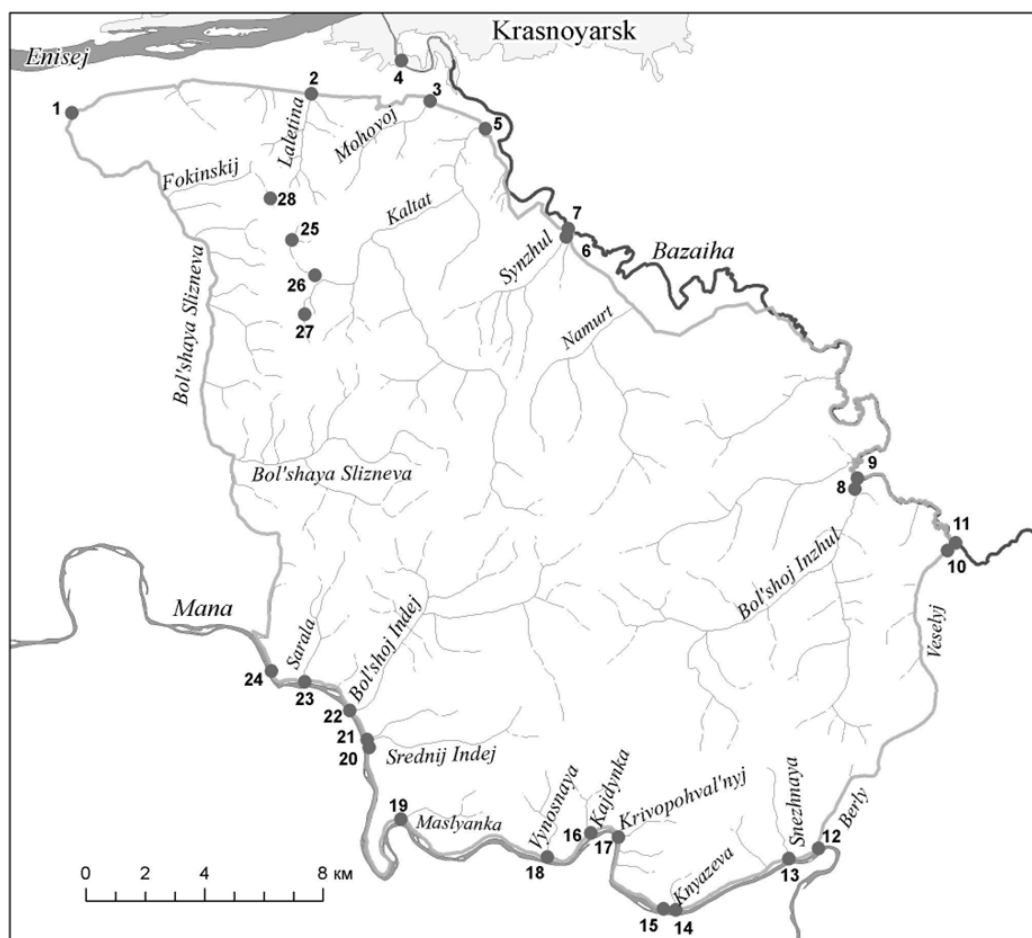


Рисунок 28 – Расположение изученных водотоков в национальном парке

В течение исследования была измерена глубина, прозрачность, температура воды, концентрация растворённого кислорода в воде, рН, минерализация (по NaCl) и содержание органического вещества (по BOD₅). Концентрация растворённого кислорода, процент насыщения воды кислородом и температура воды измерялись с помощью оксиметра Mark-302M, а минерализация воды и рН – с помощью портативного ион-селективного устройства ANION 4120.

При сравнении видового состава изученных водных токов анализируемые данные были разделены на четыре группы следующим образом: 1) речные бассейны (реки Базаиха, реки Енисей, реки Мана); 2) скорость потока (1 – низкая скорость (0,0–0,3 м/с), 2 – средняя скорость (0,3–0,6 м/с), 3 – высокая скорость (более 0,6 м/с)); 3) средний уклон русла (1 – > 70 м/км, 2 – 20–70 м/км, 3 – < 20 м/км); 4) длина основного канала (1 – > 100 км, 2 – 20–100 км, 3 – 20 км); 5) нижний осадок (1 — крупные камни (> 130 мм), 2 — мелкие камни (65–30 мм), 3 — песок и гравий (< 65 мм)).

Обработка статистических данных проводилась в программном обеспечении PAST v. 4.14 [5]. Для выявления закономерностей распределения видов в образцах был применён косвенный метод ординации неметрического многомерного масштабирования (NMDS). Математическая обработка данных основывалась на относительной численности организмов каждой таксономической группы в выборках. При оценке статистической надёжности выявленных групп мы использовали метод ANOSIM. Эта непараметрическая процедура позволила проверять значительные различия между двумя или более группами. Анализ избыточности (RDA) применялся для анализа влияния факторов окружающей среды на основные характеристики макрозообентоса.

Таксономический состав сообществ текучих вод слабо прогнозируем. Тем не менее, можно выявить ассоциации видов и жизненных форм, достоверно связанные с изучаемыми факторами среды. Наиболее распространенной схемой анализа является визуализация выявленных различий с применением ординации, сравнение видового состава на наличие различий с помощью тестов, выявление видов в наибольшей мере, обуславливающих различия в выборках. В исследуемых водотоках было выявлено всего 104 вида бентосных беспозвоночных из восьми классов, а именно: насекомые (91 вид), гастроподы (5 видов), хирудинеи (2 вида), олигохеты (2 вида), арахниды (1 вид), бивалвии (1 вид), ракообразные (1 вид), турбеллария (1 вид). В классе Insecta наибольшее видовое разнообразие было отмечено у двукрылых (36 видов, включая 24 Chironomidae), среди которых чаще всего отмечались роды *Orthocladus* (в 26% образцов) и *Simulium* (28%). Максимальная доля двукрылых в зообентосе была обнаружена в реке Мана (50%), а также в ручьях Виноградная (31%) и Кайдынка (41%). Кроме того, в исследованных водотоках было относительно высокое количество

видов из отрядов Trichoptera (21 вид), Ephemeroptera (14 видов) и Plecoptera (13 видов). Среди Trichoptera в реках чаще всего встречались *Glossosoma* sp. и *Rhyacophila* sp. (по 26% каждая). Среди Ephemeroptera во всех водотоках были выявлены представители родов *Baetis* (79% образцов) и *Rhithrogena* gr. *lepnevae* (47%). Среди Plecoptera чаще всего обнаружился *Isoperla* Bana 1906 (21%). *Philolimnogammarus* sp. были среди постоянных обитателей (77,5%). Представители класса Oligochaeta *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1962 года (40%) и отряда Coleoptera *Noterus* sp. (31%) также были довольно распространены. Максимальное количество видов было выявлено в реке Базариха (55 видов), реке Лалетина (33 вида), реке Мана (29 видов), реке Калтат (29 видов), реке Большая Слизнева (25 видов). В других водотоках этот показатель составлял менее 18 видов. Обследованные водные потоки были схожи по составу видов зообентоса, что подтверждается результатами кластерного анализа (рисунок 29). Состав фауны ручья Беркутовский отличался от других, вероятно, из-за небольшого количества выявленных таксонов макробеспозвоночных.

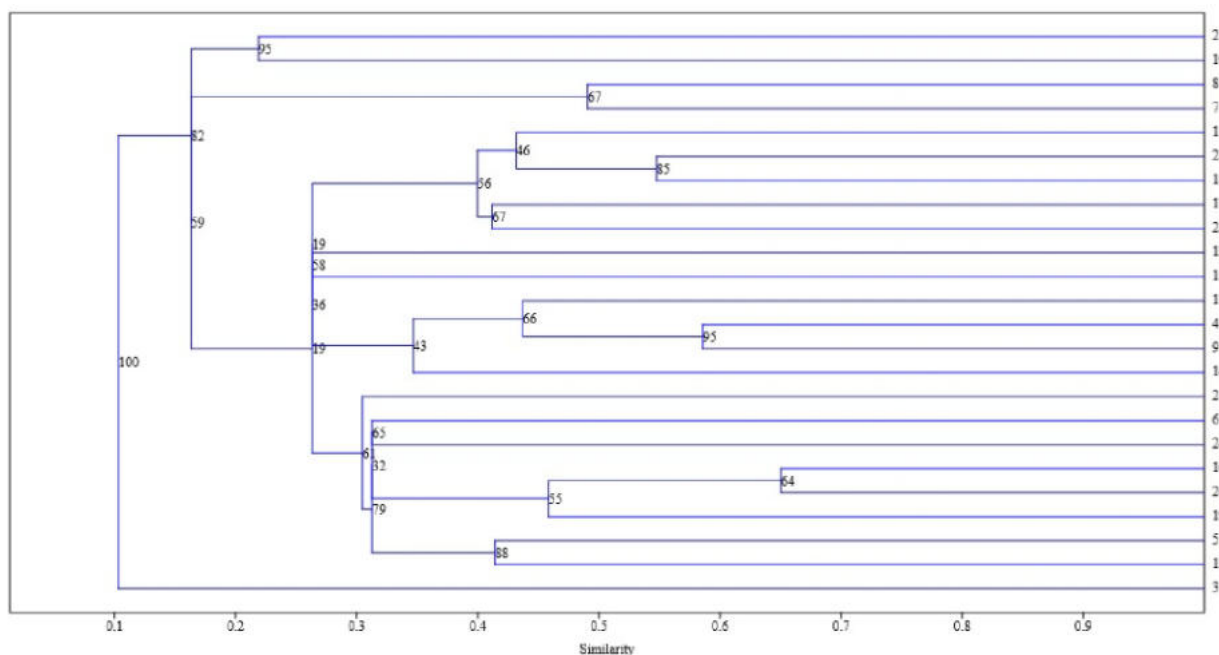


Рисунок 29 – Дендрограмма для иерархической кластеризации (метод средней группы связи, индекс сходства Брея-Кёртиса), основанная на таксономической структуре макрозообентоса в изучаемых водотоках парка

При сравнении видового состава исследованных водотоков пробы были классифицированы на пять групп по следующим параметрам: 1) речной бассейн; 2) скорость течения; 3) средний уклон русла; 4) протяжённость основного русла; 5) тип донного субстрата.

Анализ распределения сообществ макрозообентоса с использованием неметрического многомерного шкалирования (NMDS) и однофакторного анализа сходства (ANOSIM) выявил статистически значимое влияние на их структуру скорости течения, среднего уклона

и протяжённости русла. Для определения видов, вносящих наибольший вклад в различия между выделенными группами, была применена процедура SIMPER. Фактор речного бассейна также показал значимое влияние, однако характер изменения видового состава свидетельствует о постепенном (континуальном) переходе между бассейнами, а не о чётких дискретных границах. Сообщества на разных типах субстрата достоверно различались, однако в пределах одного типа субстрата отмечалось высокое сходство проб.

Многомерная ординация (RDA) позволила установить зависимость основных характеристик сообществ беспозвоночных от градиентов абиотических факторов (рисунок 30). Анализ выявил значимое ($*p* < 0,05$) отрицательное влияние вдоль первой оси (объясняющей 87,4% общей вариации) температуры воды на общую численность макрозообентоса, а также умеренное влияние минерализации, pH и длины русла. Анализ избыточности подтвердил значимое влияние исследованного комплекса факторов на общую численность зообентоса. Отсутствие достоверных связей для других характеристик сообщества (например, индекса разнообразия, биомассы) указывает на вероятное влияние неучтённых переменных, среди которых тип донных отложений может быть ведущим. В изученных водотоках, подверженных частым паводкам, воздействие этого гидрологического фактора, ответственного за перестройку местообитаний, требует дальнейших специальных исследований.

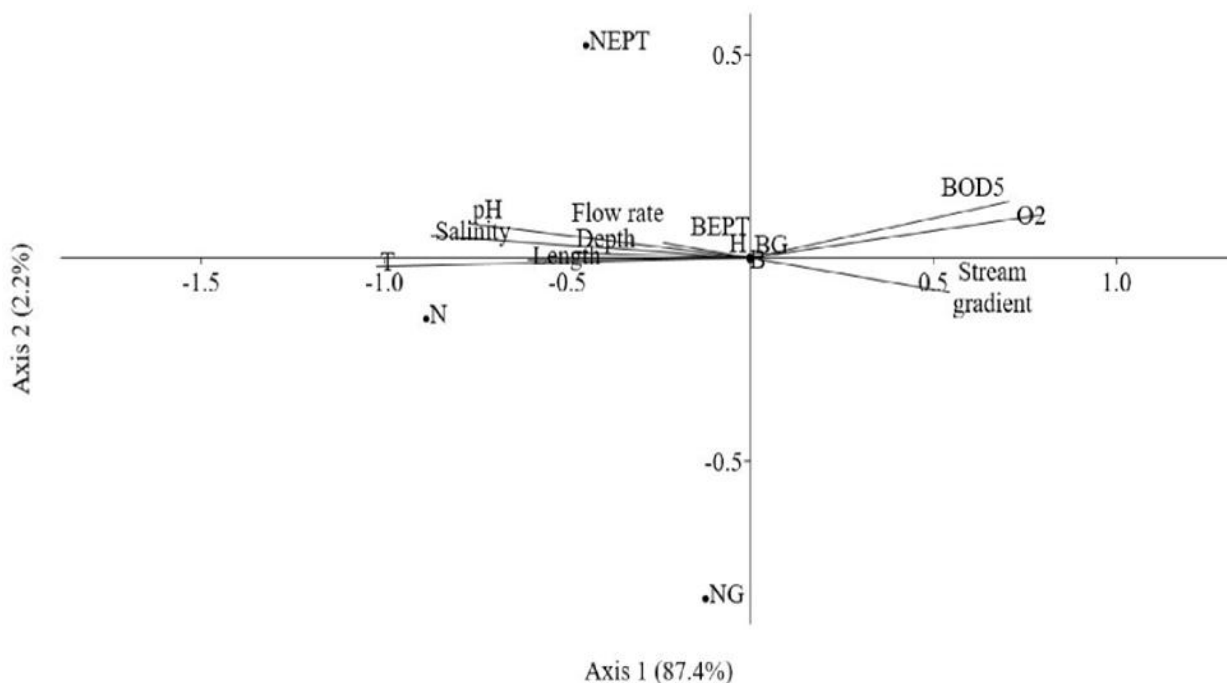


Рисунок 30 – Ординационная диаграмма по методу анализа избыточности (RDA), отражающая взаимосвязь между абиотическими факторами и основными характеристиками сообществ макрозообентоса в водотоках национального парка «Красноярские Столбы»

На рисунке 3 обозначены следующие факторы: T – температура воды; Length – длина основного русла; Stream gradient – средний уклон русла; Depth – глубина; Flow rate – скорость течения; pH – водородный показатель; Salinity – минерализация; O₂ – содержание растворённого кислорода; BOD₅ – биологическое потребление кислорода за 5 суток.

Обозначения характеристик макрозообентоса: H – индекс видового разнообразия Шеннона; N – общая численность зообентоса; B – общая биомасса зообентоса; N_{ЕРТ} – численность групп Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (ЕРТ); В_{ЕРТ} – биомасса групп ЕРТ; N_G – численность Gammaridae; B_G – биомасса Gammaridae.

Для визуализации и анализа таксономической структуры был применён метод неметрического многомерного шкалирования (NMDS) (рисунок 31).

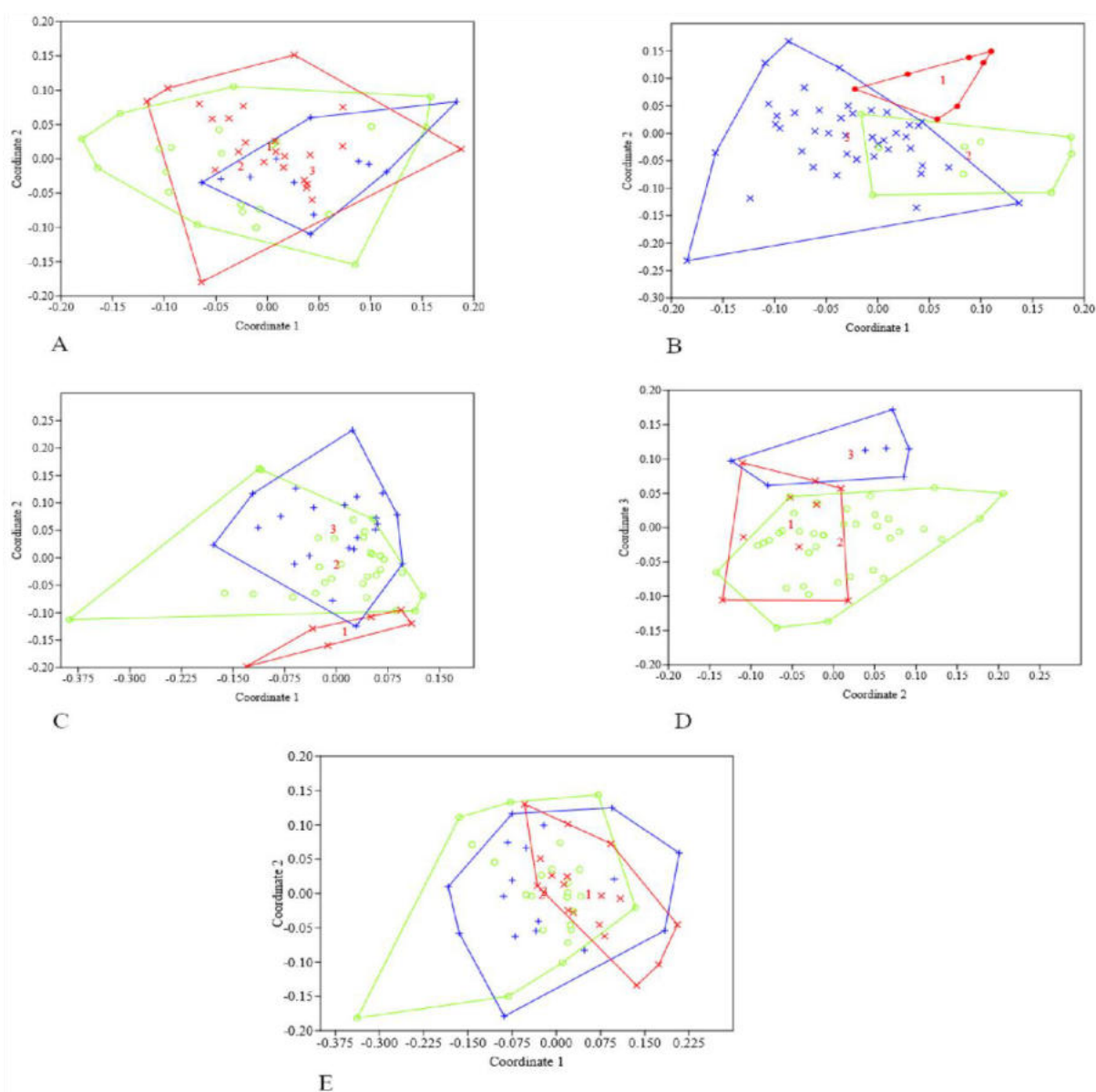


Рисунок 31 – Неметрическое многомерное масштабирование (NMDS) ординация выборочных групп из водотоков парка (индекс сходства Брая-Кёртиса)

На рисунке 31 введены следующие обозначения: Обозначения: А – бассейны рек: 1 – Мана (круг), 2 – Базаиха (крест), 3 – Енисей (плюс). В – длина основного русла: 1 – > 100 км (точка), 2 – 20-100 км (круг), 3 – < 20 км (крест). С – средняя скорость течения: 1 – низкая (0,0–0,3 м/с) (крест), 2 – средняя (0,3–0,6 м/с) (круг), 3 – высокая (> 0,6 м/с) (плюс). D – средний уклон русла: 1 – > 70 м/км (крест), 2 – 20-70 м/км (круг), 3 – < 20 м/км (плюс). Е – донные отложения: 1 – крупные камни (> 130 мм) (крест), 2 – мелкие камни (30–65 мм) (плюс), 3 – песок и гравий (< 65 мм) (круг).

Ординационная диаграмма (рисунок 31) продемонстрировала, что наиболее чёткое разделение проб связано с градиентами скорости течения, длины и среднего уклона русла. Напротив, группировка по бассейнам рек и типам субстрата не выявила дискретных кластеров, что видно по значительному перекрытию их областей на ординации. Этот вывод статистически подтверждён низкими значениями R-статистики (< 0,25) в анализе ANOSIM для этих факторов. В то же время высокие значения R для групп, контрастных по скорости течения, длине и уклону русла, указывают на существенные различия в их видовой структуре, что согласуется с их удалённым и неперекрывающимся положением на диаграмме NMDS.

Для статистической оценки достоверности выделенных на ординации группировок и проверки гипотез о различиях в структуре сообществ был использован однофакторный анализ сходства (ANOSIM). Величина R-статистики для групп, выделенных по признакам «бассейн» и «тип донных отложений», оказалась низкой (< 0,25), что указывает на отсутствие существенных различий в составе сообществ между этими группами. Данный вывод согласуется с ординационной диаграммой, где соответствующие группировки демонстрируют значительное перекрытие. Напротив, сравнительно высокие значения R-статистики были получены при сравнении групп, различающихся по скорости течения (высокая/низкая), длине водотока (>100 км / <20 км) и уклону русла (20–70 м/км / <20 м/км), что свидетельствует о значимых различиях в их видовой структуре. Это визуально подтверждается на диаграмме NMDS, где данные группировки занимают удалённые и неперекрывающиеся позиции.

Для определения таксонов, вносящих наибольший вклад в наблюдаемые различия, был применён анализ SIMPER. Установлено, что основной вклад в дифференциацию сообществ водотоков с высокой и низкой скоростью течения вносят: *Philolimnogammarus* sp. (Gammaridae; 18,6%), *Isoperla* sp. (Plecoptera; 17,3%), *Baetis* sp. (Ephemeroptera; 8,8%) и *Ecdyonurus* sp. (Ephemeroptera; 5,1%).

Различия между сообществами рек (>100 км) и малых ручьёв (<20 км) в наибольшей степени определялись таксонами: *Orthocladius* sp. (Chironomidae; 8,7%), *Baetis* sp. (Ephe-

meroptera; 7,2%), *Philolimnogammarus* sp. (Gammaridae; 6,8%), *Eukiefferiella* sp. (Chironomidae; 6,3%) и *Diamesa baicalensis* Tshernovskii, 1949 (Chironomidae; 5,8%).

Разделение водотоков по градиенту уклона русла было обусловлено главным образом вкладом следующих видов: *Philolimnogammarus* sp. (8,2%), *Baetis* sp. (7,7%), *Orthocladus* sp. (7,5%) и *Eukiefferiella* sp. (5,1%). Вклад прочих таксонов в межгрупповые различия не превышал 5% для каждой из рассмотренных пар.

Анализ избыточности (RDA) взаимосвязи абиотических факторов и характеристик макрозообентоса показал, что наибольшее влияние на его численность оказывает температура воды; умеренное, но статистически значимое воздействие оказывают также протяжённость русла, минерализация и pH воды. Температура выступает ключевым лимитирующим фактором, прямо или опосредованно определяющим распределение и разнообразие гидробионтов, что подчёркивает её важность в мониторинге последствий изменения климата и органического загрязнения. Протяжённость горных водотоков и связанная с ней пространственная гетерогенность местообитаний являются важным условием поддержания высокого биоразнообразия и функционирования экосистем. Влияние гидрологического режима, в частности частых паводков, а также фактора донного субстрата требует дальнейших детальных исследований, так как их вклад в наблюдаемую изменчивость в рамках данного исследования оказался статистически не выражен.

Таким образом, пространственная дифференциация таксономического состава и количественных показателей сообществ макрозообентоса в водотоках национального парка «Красноярские Столбы» определяется комплексом абиотических факторов, среди которых ведущую роль играют температура воды и гидроморфологические характеристики. Прогнозирование структуры таксоценозов на основе выявленных ассоциаций видов с градиентами факторов среды имеет фундаментальное значение для адекватной биоиндикации. Исследования на фоновых и слабо трансформированных участках позволяют установить естественный диапазон изменчивости экосистем и представляют собой перспективную основу для разработки методов экологического мониторинга пресноводных систем в различных регионах.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Sabater S., Elosegi A., Dudgeon D. 2013. River conservation: going against the flow to meet global challenges. In: S. Sabater, A. Elosegi (Eds.): River conservation: challenges and opportunities. Bilbao: Fundacion BBVA. P. 15–35.
2. Costa S.S., Melo A.S. 2008. Beta diversity in stream macroinvertebrate assemblages: among-site and among microhabitat components. *Hydrobiologia* 598(1): 131–138.

3. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
4. Ерунова М.Г., Кнорре А.А. Ретроспективный анализ лесных пожаров на территории национального парка «Красноярские Столбы». Сибирский лесной журнал. 2022. № 5. С. 22-33.
5. Hammer Ø., Harper D., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 1–9.
6. Сушко Г.Г. 2021. Методы сравнительного анализа состава видов насекомых в различных средах обитания с использованием программного обеспечения. Журнал Белорусского государственного университета. Экология 2: 21–28.

Основные публикации по разделу:

1. Vdovina O.N., Tropina E.F., Makarycheva A.Yu., Yerunova M.G. Patterns of macroinvertebrate distribution in watercourses of the Krasnoyarsk Stolby National Park (East Siberia) // *Nature Conservation Research*. 2025. Vol. 10(1). P. 50–65.
<https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2025.004>

1.6. Методика пространственного анализа территории на основе иерархии водосборных бассейнов и многомерных данных

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают получение репрезентативных и детальных сведений о наблюдаемых территориях, требующих последующей обработки и анализа. В данной работе предложен подход к структурированию пространственной информации, основанный на выделении элементарных объектов территории и формировании для них минимального набора дескрипторов. В качестве такого элементарного объекта предложены водосборы 4-го порядка гидрологической сети. Описательный набор параметров включает морфометрические характеристики и многолетние (пятилетние) климатические данные. Для этого набора был выполнен корреляционный анализ, позволивший исключить сильно скоррелированные признаки и сократить размерность исходных данных. К выделенной совокупности водосборов были применены методы линейного и нелинейного кластерного анализа, что позволило получить их группировку по заданным параметрам. Результаты демонстрируют, что методы кластеризации формируют группы объектов со схожими свойствами, причем распределение по кластерам чувствительно к вариациям погодных условий. Настоящее исследование является частью комплексной работы по оптимизации природопользования в Красноярском крае [1].

Целью работы является решение трех взаимосвязанных задач: 1) выбор элементарного территориального объекта, характеризующегося внутренней однородностью свойств; 2) определение набора параметров, адекватно описывающих данный объект; 3) проверка возможности кластеризации выделенных элементарных территориальных единиц на основе выбранного набора дескрипторов.

Проблема определения минимальной территориальной единицы, удовлетворяющей критериям однородности природно-климатических характеристик, сохраняет свою актуальность, поскольку требует учета множества взаимосвязанных факторов и выбора адекватного масштаба анализа [2-5]. Ключевую роль в ее решении играют морфометрические показатели. Рельеф является ведущим фактором, определяющим гидрологические режимы, термические условия, характер растительности и, как следствие, формирующим экологические свойства территории. Альтернативой морфометрическому подходу может выступать использование элементарной ячейки (пикселя) данных, предоставляемых геоинформационными платформами. Однако данный подход представляется дискуссионным: формальный пиксель данных ДЗЗ зачастую объединяет географические объекты с разнородными свойствами, что может привести к существенным погрешностям при последующем анализе. Более адекватной единицей для моделирования и решения задач землепользования и управления представляется речной бассейн (водосбор). Этот подход доказал свою эффективность, в частности, для анализа сельскохозяйственных земель. Соответствующая цифровая модель опирается на такие параметры, как уклон, экспозиция, кривизна поверхности, линии видимости и др.

Дополнительную сложность вносит пространственная неоднородность территории, проявляющаяся в вариациях климата, почвенного покрова, рельефа, геологического основания, растительных сообществ и фауны, а также в физико-географическом положении. Эти особенности традиционно описываются в рамках зональных схем. Существенный вклад в пространственную дифференциацию вносят также различные виды антропогенной деятельности, прежде всего сельское хозяйство.

Была рассмотрена территория, расположенная в южной части Красноярском крае и включающая водосборы четырех средних по масштабу рек (река Кан, река Мана, река Оя и река Туба), общей площадью 89 103 км², охватывающая 6 долгот (91 – 97 в. д.) и 4 широты (52 – 56 с. ш.). На данной территории были выделены водосборы 4-х уровней. Водосбором первого уровня мы считаем бассейны рек, водосбором второго уровня бассейны их притоков и т.д. Для каждого водосбора 4-го уровня был зафиксирован следующий набор параметров: высота над уровнем моря, уклон, преобладающая растительность, ориентация относительно сторон света, TWI, LS, вид почвы, суммарное количество осадков за год, сумма

положительных температур за год, сумма отрицательных температур за год. Данные по осадкам и температуре были взяты за 5 лет (2020-2024 годы). Основная цель исследования – выяснить, группируются ли водосборы 4-го уровня на основе этих параметров и оказывают ли погодные условия влияние на кластеризацию.

Выбранная территория включает в себя различные наземные экосистемные комплексы. В этом районе есть три типа рельефа: холмистая местность с высотой от 200 до 500 м, низкие горы (от 500 до 1 000 м) и среднегорья с высотой от 1 000 до 2 000 м. Средний уровень осадков (за 20-летний период наблюдений) составляет 650 мм в год. Климат также довольно разнообразен. Исследуемая территория демонстрирует большое разнообразие природных и географических объектов. Среди них степь, лесостепь, тайга, смешанные и широколиственные леса. Примерно половину площади занимают сельскохозяйственные угодья, расположенные в основном в долинах. Другая часть площади покрыта горной тайгой и тундрой Саян с крутыми склонами и пересеченным рельефом. Значительная часть площади имеет высокую экономическую ценность для Красноярского края.

Для нашего исследования мы разработали иерархическую модель классификации водосборов для региона, которая состоит из четырех уровней. Для этого мы использовали ГИС Whitebox GAT [6], QGIS (с модулями GRASS) и программное обеспечение ArcGIS.

Исходные данные, лежащие в основе модели:

- MERIT Hydrologically Adjusted Elevations DEM с пространственным разрешением 90 м на экваторе, полученные из последних данных о высотных отметках (MERIT DEM) [7];
- векторный слой геосистемы речных бассейнов с использованием оригинального подхода на основе рельефа MERIT DEM с применением WhiteboxGAT с последующей обработкой данных программным пакетом GRASS в QGIS;
- гидрографическая сеть, перенесенная с российских топографических карт масштабов 1:10 000 000, 1:2 500 000 и 1:1 000 000 в векторных форматах.

Разработана четырехуровневая схема классификации водоразделов притоков рек с учетом детализации векторных слоев гидрографической сети разных масштабов. Всего выделено 1105 водоразделов низшего уровня, со средней площадью примерно 0.008 км².

В проведенном исследовании для получения метеорологических данных были использованы продукты глобальных моделей. Температура поверхности извлекалась из модели Global Forecast System (GFS, Национальная метеорологическая служба США), обеспечивающей прогноз с обновлением четыре раза в сутки. Данные об осадках получены по модели Global Precipitation Measurement (GPM) – международному проекту, направленному на исследование климата и прогнозирование экстремальных явлений. Применялся наиболее точный продукт «IMERG Final Run» [8]. Архив данных GFS (для территории России) и GPM

(глобальное покрытие) сформирован и ежедневно пополняется в Институте вычислительного моделирования СО РАН. Пространственное разрешение данных составляет 0.25° для GFS и 0.1° для GPM [9].

Для агрегации данных по водосборным бассейнам был разработан специализированный программный комплекс. Его функция – расчет средневзвешенных значений метеорологических и спутниковых показателей (с приборов MODIS аппаратов Terra/Aqua) для каждого полигона, заданного в векторном формате ESRI Shapefile. Алгоритм учитывает площадь пересечения каждого пикселя растровых данных (форматы GeoTIFF и GRIB2) с границей водосбора. Результаты, охватывающие период с 2019 по 2024 годы, сохраняются в базу данных PostgreSQL с модулем PostGIS с возможностью экспорта в CSV. Реализация выполнена на Python 3 с использованием библиотек GDAL/OGR и Bash.

Был выполнен корреляционный анализ, который выявил наличие сильно скоррелированных пар среди исходных параметров (коэффициенты корреляции $|r|$ от 0.75 до 0.95 для высоты, уклона, индекса TWI, сумм положительных и отрицательных температур). Для исключения мультиколлинеарности эти параметры были исключены из дальнейшего рассмотрения. Окончательный редуцированный набор для кластеризации включил: тип растительности, экспозицию склона, тип почвы, количество осадков и сумму отрицательных температур.

Кластерный анализ проводился в 5-мерном пространстве признаков с использованием линейных и нелинейных методов: k-средних, метода главных компонент и метода упругой карты. Применение метода k-средних не позволило получить статистически устойчивое разделение на кластеры даже для $k=2$; увеличение числа кластеров приводило к дальнейшей дестабилизации результатов.

Далее мы использовали метод главных компонент. Поскольку погодные данные (температура и осадки) меняются в зависимости от года, мы рассмотрим дополнительно, как кластеризуются параметры, не зависящие от погоды. В этот набор были включены высота над уровнем моря, растительность, ориентация по сторонам света и вид почвы. Высота над уровнем моря была включена в набор, чтобы не потерять информацию. В наборах с погодными данными эта информация косвенно учитывается в параметре суммарная отрицательная температура, так как они сильно скоррелированы. Для всех наборов данных по годам и без учета погодных данных было получено распределение точек на два кластера. Состав кластеров совпадает для всех наборов. Вид кластеров в пространстве первых трех главных компонент показан на рисунке 32.

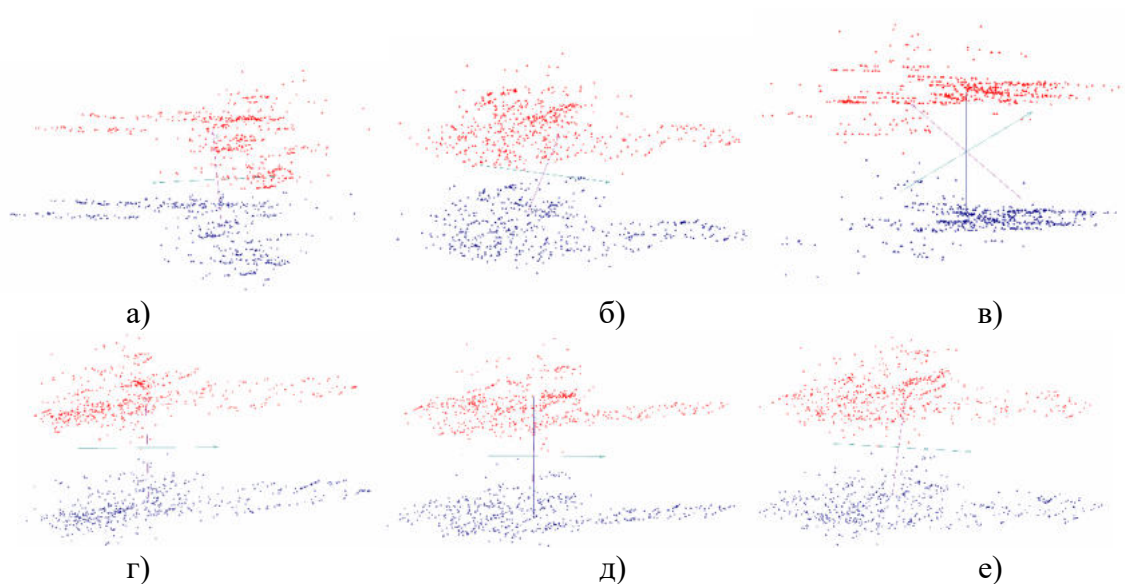


Рисунок 32 – Сравнение кластеризации водосборов по постоянным и метеорологическим параметрам в пространстве первых трех главных компонент: а) без учета погодных данных, б-е) с учетом осадков и температуры за 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 годы соответственно

Основной параметр, влияющий на разделение водосборов по кластерам – ориентация по сторонам света. Большая часть водосборов кластера 1 ориентирована на восток, а кластера 2 на запад. Высота над уровнем моря и уклон в среднем меньше, а суммарная положительная температура выше в кластере 1. Виды почвы в кластере 1 преимущественно дерново-подзолистые, дерново-таежные кислые и серые лесные. В кластере 2 кроме этих почв значительную часть составляют подбурые таежные. В кластере 1 преобладающая растительность смешанный лес и земли сельскохозяйственного назначения. В кластере 2 кроме этих видов растительности большое количество лиственного и темнохвойного леса.

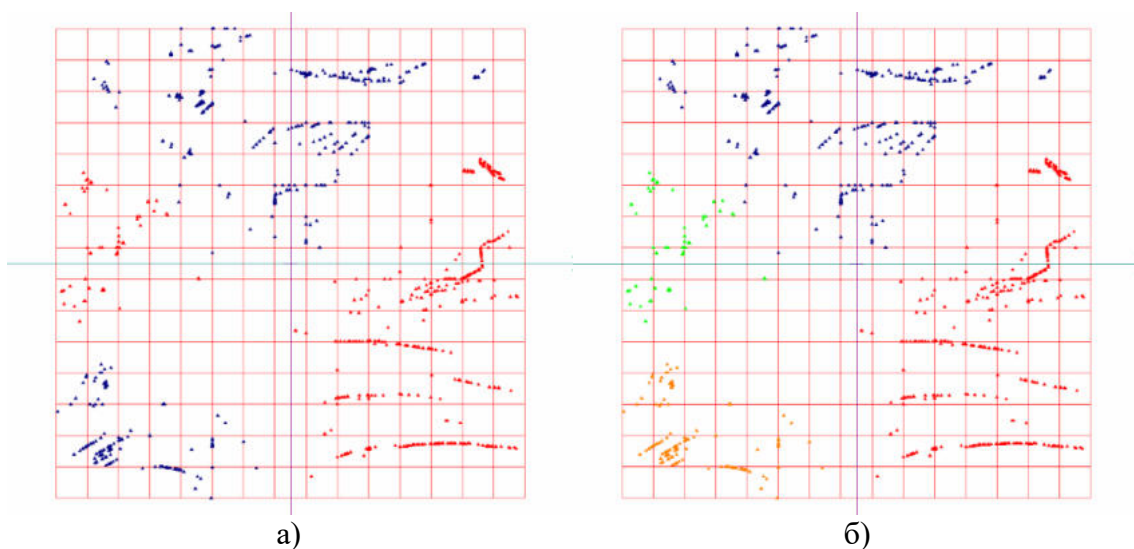


Рисунок 33 – Деление на подкластеры исходных кластеров для метода упругой карты. Точки окрашены: а) в цвета исходных кластеров, б) как самостоятельные кластеры

Далее полученная кластеризация была использована в методе упругой карты [10]. Использовалась мягкая 16×16 упругая карта. Было обнаружено, что точки, относящиеся к одному кластеру, делятся на подкластеры. Пример показан на рисунке 33а). Этот набор параметров не включает погодные данные. При разделении на 4 кластера из кластера 1 (обозначен синим цветом) выделился кластер 3 (обозначен оранжевым цветом) с меньшими высотами над уровнем моря (среднее значение для этого кластера 389, для кластера 1 среднее значение 723), более высокой суммарной отрицательной температурой (для кластера 3 среднее значение $-1771,86$, для кластера 1 среднее значение $-2081,3$) и ориентацией водосборов из этого кластера на запад. Из кластера 2 (обозначен красным цветом) выделился кластер 4 (обозначен зеленым цветом). В этот кластер попали водосборы с меньшей высотой над уровнем моря (для кластера 2 среднее значение $977,75$, для кластера 4 среднее значение $675,12$), преобладают лиственные леса и сельскохозяйственные угодья (в кластере 2 преобладают лиственные и темнохвойные леса), более высокой суммарной отрицательной температурой (для кластера 4 среднее значение $-1818,01$, для кластера 2 среднее значение $-2450,72$) и ориентацией водосборов из этого кластера на восток.

Для наборов параметров, включающих погодные данные, на 4 кластера разделились данные за 2024 год, данные за все остальные годы разделились на 3 кластера. На рисунке 34 показана получившаяся кластеризация по годам с учетом погодных данных и без них. Для данных за 2024 год состав кластеров схож с составом кластеров без погодных данных, но количество водосборов в кластерах 3 и 4 меньше. Для остальных лет в третий кластер попадают водосборы из кластера 1 с ориентацией на запад и более высокой суммарной отрицательной температурой.

Проведенное исследование подтверждает эффективность предложенного подхода. Использование водосборов низких порядков в качестве элементарных территориальных единиц позволяет получать статистически устойчивые результаты кластеризации.

Анализ показал, что линейный метод главных компонент обеспечивает воспроизводимое разделение на два кластера как для наборов данных, включающих погодные параметры, так и для наборов без них. Применение нелинейного метода упругой карты позволило осуществить более детальную стратификацию, выделив внутри основных кластеров дополнительные подкластеры, объединяющие водосборы со специфическими характеристиками. Установлено значимое влияние метеорологических условий на результаты классификации. Так, аномально теплые условия 2024 года (жаркое лето и мягкая зима) привели к формированию четырех кластеров, в то время как для предыдущих лет с близкими климатическими характеристиками наблюдалось схожее разделение на три кластера.

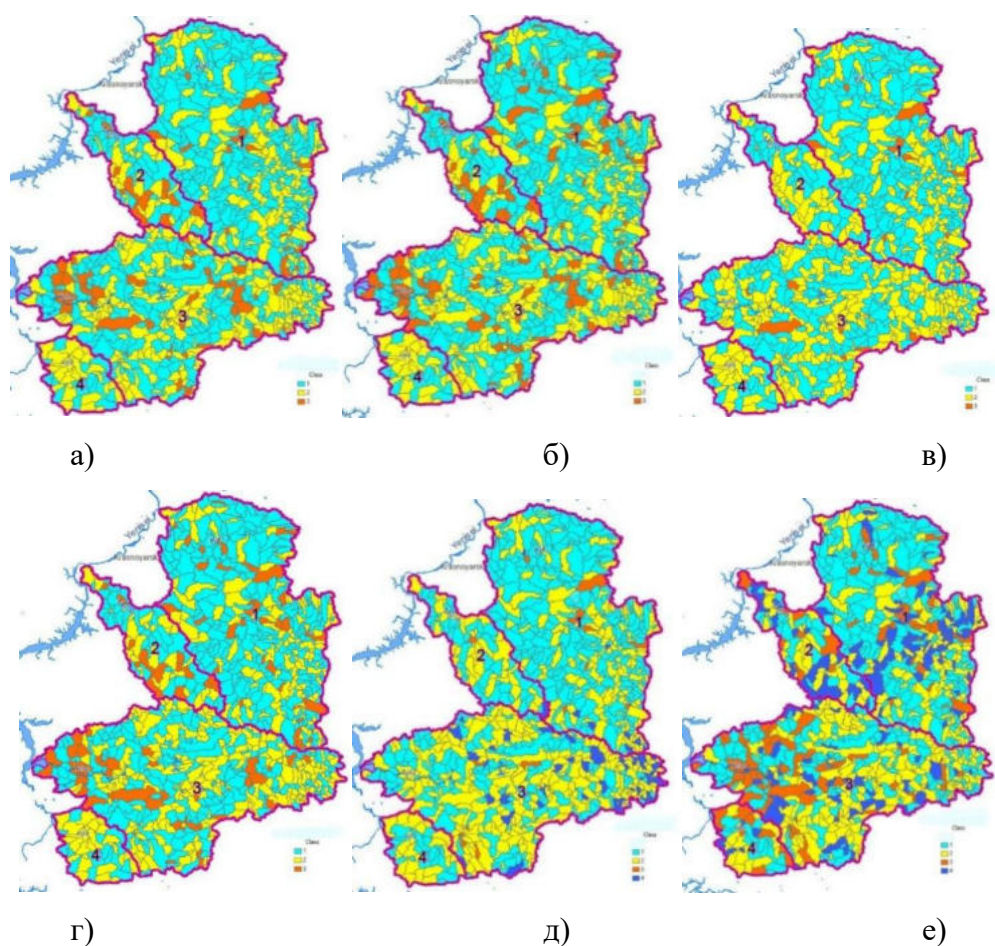


Рисунок 34 – Пространственное распределение кластеров по годам: а–д) результаты кластеризации с включением метеорологических параметров (2020–2024 гг.), е) результаты кластеризации без учета погодных данных

Таким образом, в работе представлен новый методический подход к пространственному анализу территорий для задач землепользования и управления природными ресурсами. Подход основан на интеграции стабильных географических признаков (водосбор, морфометрия, почвы, растительность) и динамических климатических показателей (температура, осадки).

Предложенная методика продемонстрировала свою эффективность для идентификации относительно компактных и гомогенных территориальных единиц. Выбор элементарных водосборов в качестве базового объекта анализа является методически обоснованным.

Полученные результаты свидетельствуют, что даже ограниченный набор дескрипторов обеспечивает устойчивую классификацию как в статическом (без учета погоды), так и в динамическом (с учетом метеорологических данных) контекстах.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Erunova M.G., Yakubailik O.E. Methods and Technologies for Spatial Analysis of Regional Ecosystems based on the Watershed Approach // Integrated Environmental Assessment and Management. 2023. v. 19. № 4. P. 972-979. <https://doi.org/10.1002/ieam.4652>
2. Sardooi E.R., A. Azareh, B. Choubin, S. Barkhori, V.P. Singh and S. Shamshirband, “Applying the remotely sensed data to identify homogeneous regions of watersheds using a pixel-based classification approach”, Applied Geography, no. 111, pp. 102071, Oct. 2019.
3. Indrayani P., Y. Mitani, I. Djamaluddin, and H. Ikemi, “A GIS based evaluation of land use changes and ecological connectivity index”, Journal of Geomatics and Planning, no. 4, pp. 9–18, Mar. 2017.
4. Lu C.Y., W. Gu, A.H. Dai, and H.Y. Wei, “Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: A case study of Schisandra sphenanthera Rehd. et Wils. in Qinling Mountains, China”, Ecological Modelling, no. 242. pp. 105–115, Sep. 2012.
5. Mendoza M.E., E.L. Granados, D. Geneletti, D.R. Pérez-Salicrup, V. Salinas, “Analyzing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the lake Cuitzeo watershed Mexico (1975–2003)”, Applied Geography, no. 31, pp. 237–250, Jan. 2011.
6. Lindsay J.B., “Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis”, Computers & Geosciences, no. 95, pp. 75–84, Oct. 2016.
7. Yamazaki D., D. Ikeshima, J. Sosa, P.D. Bates, G.H. Allen and T.M. Pavelsky, “MERIT hydro: a high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset”, Water Resources Research, no. 55, pp. 5053–5073, May 2019.
8. Rajani K. et al. “Review of GPM IMERG performance: A global perspective”, Remote Sensing of Environment, vol. 268, pp. 112754, Jan. 2022.
9. Kadochnikov A.A., “Development of data collection system for monitoring the atmospheric air state in Krasnoyarsk region”, International conference “InterCarto. InterGIS, Apatity, Russia, vol. 27, is. 2, pp. 205-217, Aug. 2021.
10. Gorban, A.N. and A. Zinovyev, “Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps”, IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Paris, France, pp. 1–9, Oct. 2015.

Основные публикации по разделу:

1. Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Сенашова М.Ю. Влияние погодных условий на кластеризацию водосборов четырех рек Красноярского края на основе ДЗЗ // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. № 6(64). С. 166-172.

2. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА Г. КРАСНОЯРСКА: ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

2.1. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН

Коллектив проекта занимается исследованиями и разработками в области мониторинга атмосферного воздуха г. Красноярска уже около десяти лет. За это время была создана и постоянно модернизируется «Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» (КНЦ СО РАН). Её аппаратная, программная и аналитическая базы непрерывно совершенствуются. Накоплен уникальный практический опыт решения задач оперативной оценки экологического состояния природной среды, технической поддержки и обеспечения бесперебойной работы измерительного оборудования, взаимодействия с различными структурами и организациями, представителями органов власти и бизнеса, науки и образования.

Целью создания Системы является обеспечение научно-исследовательского мониторинга, научных исследований, направленных на получение новых знаний о закономерностях пространственно-временного загрязнения воздушной среды городской агломерации и прогнозирование загрязнения атмосферы, разработка и совершенствование методов экологического мониторинга и мероприятий по охране окружающей среды, оперативного информирования населения, природоохранных служб и заинтересованных организаций, в том числе органов государственного экологического надзора.

Основа городской системы мониторинга – сеть измерительного оборудования: датчики концентрации взвешенных частиц PM_{2.5}, метеостанции, фиксирующие основные погодные параметры, датчики температуры воды в Енисее, а также специализированные приборы – метеорологические профиломеры МТР-5, термокосы для измерения температуры воздуха над рекой, анемометры и видеокамеры для наблюдения за туманами. Проводятся экспериментальные исследования атмосферы над руслом Енисея с помощью квадрокоптеров – регистрируются вертикальные профили температуры и концентрации взвешенных частиц PM_{2.5}.

Программно-технологическая платформа разработки – Геопортал ИВМ СО РАН, его подсистема «Данные оперативного мониторинга». В отчётный период проводились работы по технической поддержке инфраструктуры, оптимизации сбора и агрегации данных для веб-визуализации, а также созданию новых аналитических интерфейсов. Выполнялась техническая модернизация оборудования – обновление дисковой подсистемы (система хранения данных).

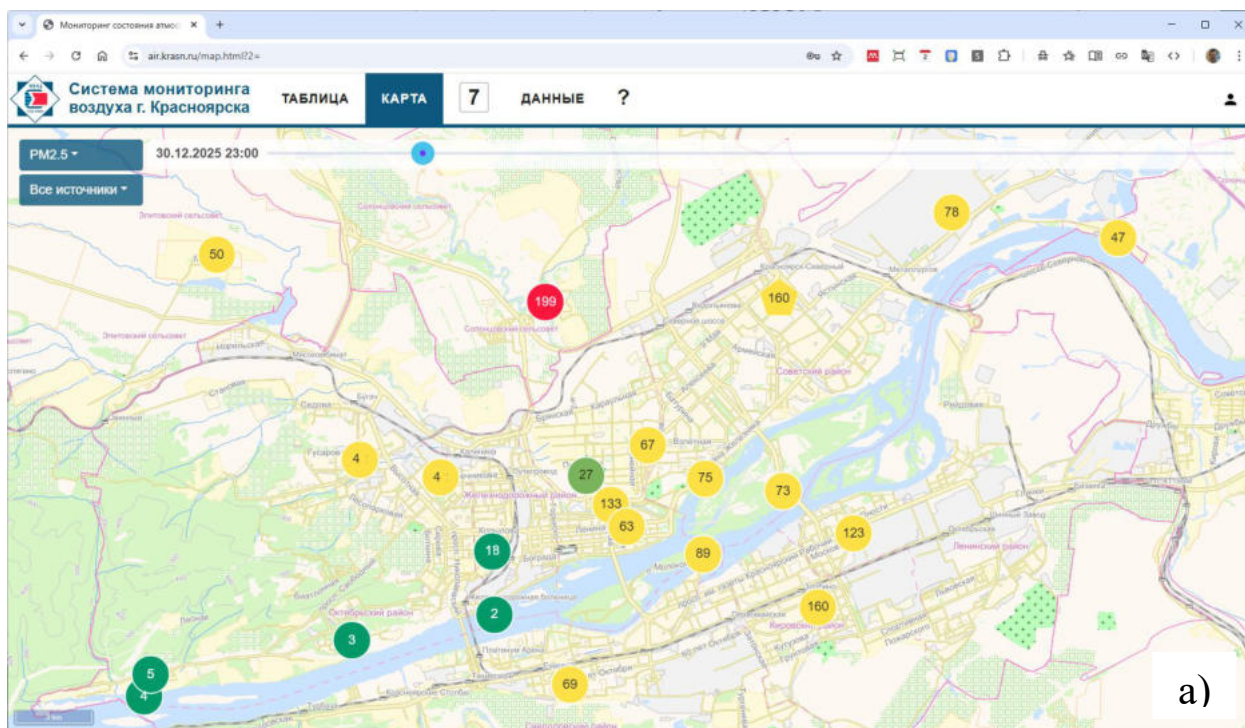


Рисунок 35 – Интерфейсы пользователя «Системы мониторинга воздуха КНЦ СО РАН»: а) картографический веб-интерфейс, б) средние значения загрязнения воздуха, скорости и направления ветра за выбранные пользователем 7 дней

Публичная часть Системы доступна по веб-адресу: <https://air.krasn.ru/> (рисунок 35). Доступный пользователям интерфейс предоставляет возможность просмотра архива и анализа накопленных данных.

В качестве примера рассмотрим эпизод повышенного загрязнения атмосферы 1 декабря 2025 г. – среднесуточная концентрация PM2.5 в этот день составила 49 мкг/м³, что почти в 1,5 раза превышает уровень ПДК (= 35 мкг/м³). Можно обратить внимание на то,

что с некоторым опережением загрязнения атмосферы по времени наблюдалось понижение скорости ветра практически до штилевых условий (рисунок 35б). Данные температурного профилера МТР-5 показывают, что продолжительность температурной инверсии в рассматриваемый период составила около 2 суток, а ее интенсивность днем 1 декабря 2025 г. превышала 10°C (рисунок 36).

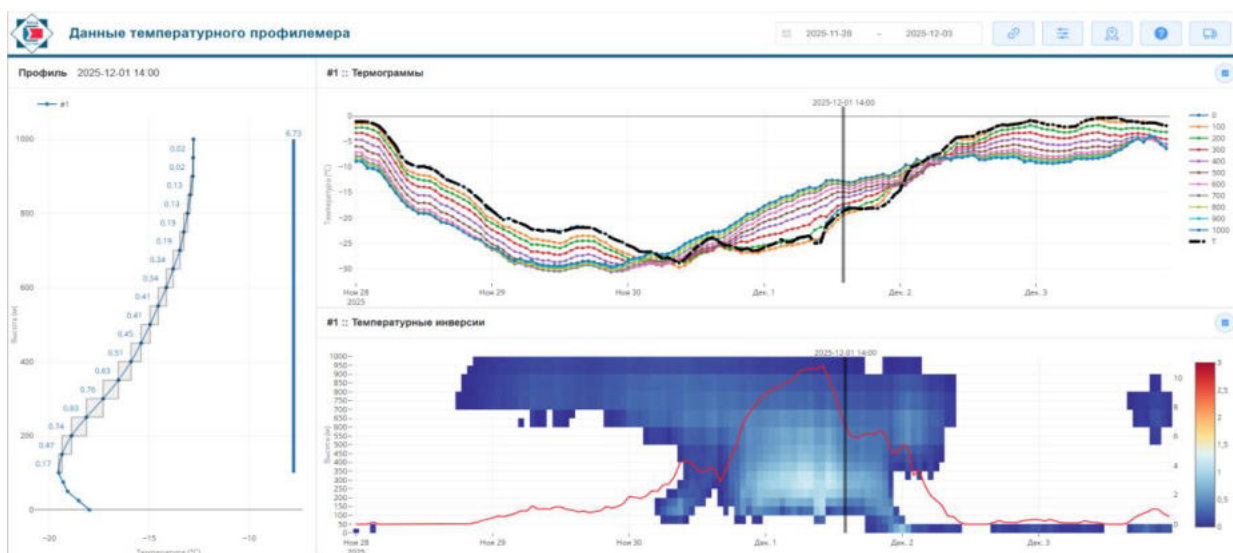


Рисунок 36 – Температурная инверсия 1 декабря 2025 г.: данные метеорологического профилера МТР-5 показывают повышение температуры с высотой на вертикальном профиле температуры (слева), «переворот» термограмм при инверсии – графиков температуры на разных высотах (вверху), тепловую карту интенсивности инверсии на разных высотах по времени и график ее суммарной интенсивности (внизу)

Подсистема видеомониторинга «Система мониторинга воздуха КНЦ СО РАН», в которой накапливается архив фотоизображений с нескольких десятков камер с периодичностью 1 раз в 10 минут, позволяет визуальнo сравнить уровень степень загрязнения атмосферы в разные дни. На рисунке 37 показаны фотоснимки с одного и того же ракурса съемки при чистой атмосфере и наличии смога над городом. 1 декабря в 14:00 над р. Енисей практически не было тумана, а над правобережьем города наблюдался смог. По 25-этажным зданиям микрорайона «Тихие зори» в правой центральной части снимка можно сделать оценку высоты распространения повышенных концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} – она составляет около 300 м. По данным профилера МТР-5 интенсивность инверсии на этой высоте составляет не менее 5°C.

Приведенные возможности системы мониторинга и анализа данных по атмосфере крайне важны для дальнейших исследований, связанных с численным моделированием.

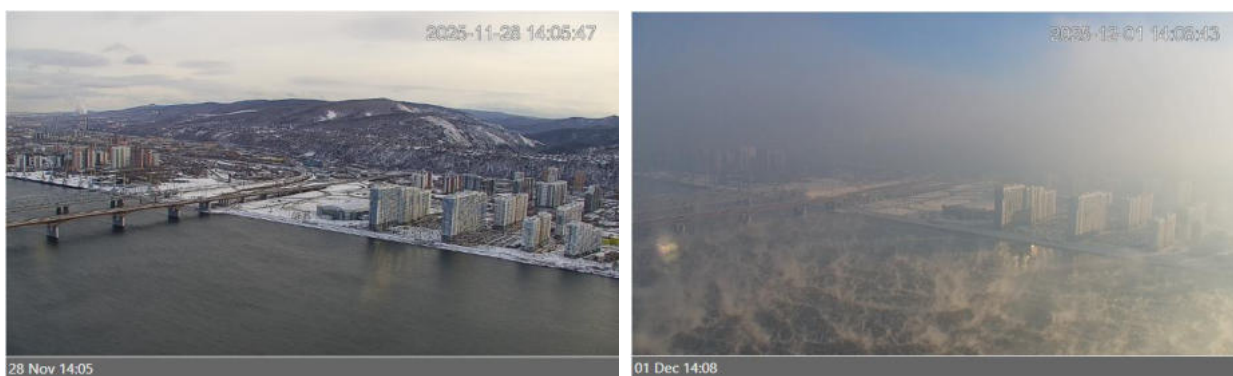


Рисунок 37 – Температурная инверсия 1 декабря 2025 г.: данные подсистемы видеомониторинга с IP-видеокамеры ИВМ СО РАН на 28 ноября 2025 г. (слева) и 1 декабря 2025 г. (справа), размещенной на городской телебашне Красноярска на высоте ~213 м над уровнем воды в р. Енисей

Результаты, полученные «Система мониторинга воздуха КНЦ СО РАН», позволили сделать вывод о значительном влиянии автономных источников теплоснабжения (АИТ) Красноярска (преимущественно – печное отопление на буром угле) на загрязнение атмосферы города – в официальных оценках вклад АИТ в общее загрязнение города считался относительно невысоким. По итогам обсуждения этих результатов на нескольких заседаниях общественно-экспертного совета по вопросам экологии при Губернаторе Красноярского края, руководством края был принят ряд решений, направленных на радикальное уменьшение выбросов АИТ – обеспечить ускоренную замену устаревших котлов на современные экологичные установки, переход на более экологичное и безопасное топливо.

Практический результат – в настоящее время идут интенсивные работы по установке новых экологически эффективных котлов в частном секторе. Их доля составляет ~15% от общего количества (установлено порядка 3000 шт. за 2 года).

Уже с сентября 2025 г. малому и среднему бизнесу города и края запрещено использовать сжигание бурого угля в старых неэффективных котлах согласно Постановлению Правительства Красноярского края № 779-п от 22.10.2024 «О введении ограничения использования твердых видов топлива, сжигание которых приводит к загрязнению атмосферного воздуха на территориях отдельных муниципальных образований Красноярского края». Только в Красноярске на современные технологии должны перейти 760 предприятий. По всему краю их насчитывается 1200 шт.

Предполагается развитие исследований по данной теме, в том числе – изучение различных аспектов формирования и разрушения температурных инверсий над Красноярском, их влияния на загрязнение воздушной среды города.

2.2. Унифицированный программный интерфейс доступа к архиву данных мониторинга окружающей среды

Создана и активно развивается система научно-исследовательского мониторинга SensorHub на базе Геопортала ИВМ СО РАН. В ней организован сбор, хранение и агрегация распределенных данных о состоянии приземного слоя атмосферы г. Красноярска. Источниками данных служат сети мониторинга воздуха и внешние информационные системы, с которых в автоматическом режиме выполняется загрузка данных. В результате накоплен архив разнородных данных мониторинга характеристик атмосферы города за 7 лет. Данные хранятся в реляционной базе данных, наполнение и получение данных реализовано через веб-сервисы, настройка выполняется через веб-приложение администратором системы. Примененные решения успешно зарекомендовали себя при создании ряда специализированных веб-систем для анализа метеорологических и экологических данных.

Информационная модель SensorHub состоит из нескольких основных сущностей. Верхним структурным элементом, предназначенным для группировки данных по разделам, является *проект*. На этом уровне реализовано разграничение прав доступа пользователей. В проекте создаются *площадки наблюдения*, которые характеризуют пространственное размещение датчиков. Результаты измерений привязаны к *показателям* – это температура, влажность, давление, концентрация PM_{2.5} и другие. Справочник показателей разбит на тематические разделы, у каждого показателя заданы единицы измерения и тип данных (целое, число, строка). Собираемые данные с датчиков по отдельным площадкам записываются в таблице значений. Это таблица фактов с такими измерениями, как дата-время, показатель и площадка. На основе первичных значений автоматически рассчитываются агрегированные значения. Для наполнения и получения данных реализован прикладной программный интерфейс (API) в виде веб-сервиса на основе REST подхода и XML документов.

Продолжительная эксплуатация разработанной системы и реализация на ее основе ряда информационно-аналитических систем выявило некоторые недочеты. Для их устранения была доработана модель данных, программный интерфейс и реализованы следующие функции:

- возможность гибко объединять площадки наблюдения из различных источников в одном наборе данных с дополнительной метаинформацией произвольной структуры;
- поддержка нескольких вариантов выдаваемой структуры данных в ответе сервиса;
- возможность разграничивать доступ к периоду, за который будут доступны данные, уровням агрегации, глубине архива данных;

- возможность преобразовывать единицы измерения показателей и задавать точность округления выдаваемых результатов.

Для удобства и гибкости настройки введено понятие *набора данных*, который описывает подмножество данных с различных площадок наблюдения, которые будут доступны пользователю. Поддерживаются следующие настройки:

- Список выбранных площадок наблюдения из разных проектов. Есть возможность указать другой кодовой идентификатор и пользовательское наименование для каждой площадки.
- Список доступных показателей. У показателей можно откорректировать кодовый идентификатор, точность округления, единицы измерения (множитель).
- Общее ограничение на доступный период данных, а также скользящее ограничение на глубину доступного архива в зависимости от уровня агрегации данных. Например, 20 минутные данные могут быть доступны не старше 1 месяца от текущей даты, а среднесуточные – не старше года.
- Метаинформация произвольной JSON структуры, которая может использоваться для дополнительного конфигурирования клиентского приложения.
- Список пользователей, которые имеют право получать данные.

Все указанные параметры настраиваются через веб-интерфейс конфигурирования системы администратором.

Программный интерфейс (API)

Веб-сервис системы был переработан, сохранен REST подход, но основным форматом ответов выбран более распространенный JSON. Базовая структура всех запросов, следующая:

<http://<сервер>/api/<версия API>/<объект>.<формат>?uid=<uid>&<param>>,

где:

- версия API – версия интерфейса, параметр предназначен для развития сервиса и поддержки устаревших версий программного интерфейса;
- объект – составной идентификатор объекта URI, например, «set/air» - метаданные набора данных с кодовым идентификатором «air»;
- формат – формат выдаваемого ответа (JSON, GeoJSON);
- uid – ключ пользователя для доступа к сервису, может указываться как в параметрах, так и в HTTP заголовке;
- param – дополнительные параметры для конкретного запроса.

Ниже приведены основные запросы, реализованные для поддержки наборов данных.

1. *Получить описание и структуру набора данных.* [GET /sets/<id>](#).

На входе передается уникальный или кодовый идентификатор набор данных. Ответа сервиса (рисунок 38) содержит основные атрибуты, период данных, ограничения на доступность данных, список площадок наблюдения с их характеристиками и местоположениями, упорядоченный список показателей и дополнительную метаинформацию для клиентского приложения.

```
{
  "status": { "code": 1, "message": "OK" },
  "data": {
    "id": 15, "code": "knc-meteo",
    "name": "КНЦ-МТР - Посты мониторинга",
    "last_time": "2025-12-12 13:32:47",
    "period_begin": "2021-11-09 00:00:00", "period_end": null,
    "period_limit": {"raw": null, "hour": null, "day": null},
    "sites": [
      { "id": 4363, "name": "Караульная", "timing": "regular",
        "geom_x": 92.674777, "geom_y": 55.973219, "geom_alt": 146 },
    ],
    "indicators": [
      { "id": 348, "code": "p-pm2", "name": "PM2.5", "units": "мкг/м3" },
      { "id": 103, "code": "m-t", "name": "Температура воздуха", "units": "°C" },
    ],
    "config": {}
  }
}
```

Рисунок 38 – Пример ответа на запрос в JSON формате

2. *Получить площадки наблюдения в виде слоя.* [GET /sets/<id>/sites.geojson](#).

В ответ на этот запрос возвращается точечный слой в формате GeoJSON, который можно открыть в каком-либо ГИС приложении. Если какой-то пост мониторинга является мобильным – возвращается его последнее местоположение.

3. *Получить актуальные данные.* [GET /sets/<id>/data/last](#).

Возвращаются последние измеренные данные на площадках наблюдения, есть возможность установить фильтры на список площадок и показателей. Формат выдаваемых данных похож на запрос 4 (рисунок 39А). Значения показателей с площадки могут изменяться не синхронно, например, метеоданные обновляются каждые 20 минут, а концентрация примесей – каждые 10 минут. В поле «time» выдается последнее время, когда пришли какие-либо данные по площадке (максимальное по всем показателям). Если значение показателя обновлялось слишком давно (установлен порог – 1 сутки), то он не попадает в выборку. Это

сделано для корректной обработки ситуации, когда один из датчиков выходит из строя и перестает выдавать данные. Получить полные данные с фиксацией индивидуального времени получения и учетом устаревших можно через альтернативный запрос [GET /sets/<id>/data/last-alt](#), формат выдаваемых данных похож на запрос 4 (рисунок 39В).

4. Получить данные из архива. [GET /sets/<id>/data/archive](#).

В ответе передается выборка из архива данных с заданным уровнем агрегации. Параметры определяют дополнительные фильтры на данные:

- `time_begin`, `time_end` – дата начала и окончания выборки (YYYY-MM-DD HH:mm:ss);
- `time_interval` – интервал агрегации данных (raw – без обработки, 20min, hour, 6hours, day, month);
- `sites` – площадки наблюдения (список идентификаторов), если не задан – все;
- `indicators` – показатели (список кодовых идентификаторов), если не задан – все.

Структура ответа сервиса показана на рисунке 39А. Для удобства выполняется группировка значений отдельных показателей по времени измерения для каждой площадки. Если такая группировка не нужна – есть альтернативная версия запроса [GET /sets/<id>/data/archive-alt](#) (рисунок 39В). Если запрашиваются данные с большим интервалом агрегации и интересна дополнительная статистика – поддерживается третий вид запроса (рисунок 39С). Для каждого показателя кроме среднего значения выдается минимальное, максимальное, стандартное отклонение и количество использованных измерений.



Рисунок 39 – Примеры ответов на запрос получения архивных данных в JSON формате

На глубину архива данных и количество возвращаемых записей в одном запросе администратором могут быть наложены ограничения. Такие инструменты позволяют избежать избыточной нагрузки на базу данных и сервисы, а также предотвратить полное скачивание данных.

Система научно-исследовательского мониторинга SensorHub построена на основе свободно распространяемых технологий и программного обеспечения с возможностью развертывания под разные операционные системы. Основным языком программирования является PHP 8 с использованием фреймворка для разработки масштабируемых веб-приложений Yii 2. Для хранения атрибутивных и пространственных данных используется популярная СУБД PostgreSQL 12 с расширением PostGIS 3.

2.3. Определение минимально достаточной конфигурации сети датчиков загрязнения атмосферного воздуха методами регрессионного анализа

В рамках данного исследования формулируется следующая научно-практическая проблема. Пусть задана пространственно-распределенная сенсорная сеть, регистрирующая значения некоторого контролируемого параметра. Требуется для каждого датчика идентифицировать минимальный поднабор остальных датчиков, показания которых статистически значимо объясняют его собственные измерения.

Решение данной проблемы позволяет решить три актуальные задачи организации систем мониторинга:

Задача 1. Определение минимальной достаточной подсистемы датчиков, обеспечивающей репрезентативное описание состояния контролируемого параметра на всей территории наблюдения. Такая подсистема сохраняет полноту описания, сравнимую с полной сетью, однако удаление из неё любого элемента приводит к снижению точности модели.

Задача 2. Выявление групп взаимозаменяемых датчиков, что может быть использовано, в частности, для восстановления пропущенных значений в временных рядах данных на основе информации со схожих сенсоров.

Задача 3. Идентификация датчиков, не имеющих статистических аналогов в сети, показания которых не могут быть адекватно восстановлены по данным других точек наблюдения. Для таких датчиков, в целях повышения отказоустойчивости системы, рекомендуется предусматривать резервирование. Данная задача, таким образом, является обратной по отношению к задаче 2.

В качестве предметной области рассматривается мониторинг концентрации взвешенных частиц PM_{2.5} в приземном слое атмосферы урбанизированных территорий на примере г. Красноярска. Актуальность задачи обусловлена тем, что уровень PM_{2.5} является

надежным индикатором общего загрязнения атмосферного воздуха, коррелирующим с концентрацией ряда других, менее доступных для непрерывного измерения, загрязнителей.

Предлагаемый алгоритмический подход носит апостериорный характер и предназначен для анализа достаточности и избыточности уже развернутых систем мониторинга произвольного параметра. Он позволяет оценить оптимальность исторически сложившейся конфигурации сети и предложить варианты её модификации без потери информативности.

В работе проводится сравнительный анализ двух разновидностей систем мониторинга PM2.5 в г. Красноярске:

1. Краевая ведомственная информационно-аналитическая система (КВИАС) Министерства экологии Красноярского края, включающая 9 стационарных постов, оснащенных сертифицированными анализаторами пыли модели E-ВAM (производитель оборудования – компания Met One Instruments Inc., США).
2. «Система мониторинга воздуха КНЦ СО РАН», состоящая приблизительно из 20 постов, оборудованных оптическими сенсорными станциями CityAir (Новосибирск).

Используемые методы

Предлагаемый алгоритм основан на свойствах линейных регрессионных моделей и статистических критериях оценки их качества.

Пусть известно множество $X \in R^{n \times d}$, состоящее из d связанных выборок (признаков) мощности n . Каждая выборка представляется вектор-столбцом $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)^T$, $j = 1, \dots, d$. Здесь и далее верхний индекс T означает транспонирование. Отметим, что X также можно рассматривать как множество строк-наблюдений $x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d)$, $i = 1, \dots, n$. Пусть каждому наблюдению x_i соответствует скалярный отклик y_i , $i = 1, \dots, n$, т.е. задан вектор $y = (y_1, \dots, y_n)^T$. На основе этой информации в регрессионном анализе необходимо построить алгоритм оценки значения отклика \hat{y} по входному набору значений факторов $\hat{x} = (\hat{x}^1, \dots, \hat{x}^d) \notin X$. Алгоритм называют регрессионной моделью, а множество пар $D = (y_i, x_i)$ – обучающим, $i = 1, \dots, n$.

В случае линейной регрессионной модели прогнозное значение отклика $\hat{y} \in R$ ищется в виде линейной комбинации входных факторов:

$$\hat{y} = f_{\omega}(\hat{x}) := \omega_0 + \omega_1 \hat{x}^1 + \dots + \omega_d \hat{x}^d.$$

Если мы остаемся в рамках классической статистики, то вектор параметров $\omega = (\omega_0, \dots, \omega_n)^T$ находится как точечная оценка максимума функции правдоподобия

$$\hat{\omega} = \arg \max_{\omega} \mathcal{L}(\omega|D) = \arg \min_{\omega} (-\log \mathcal{L}(\omega|D)),$$

что эквивалентно минимизации по ω логарифма вероятности наблюдать тестовую выборку при параметрах ω :

$$\hat{\omega} = \arg \min_{\omega} (-\log(p(D|\omega))). \quad (1)$$

Отметим, что функция правдоподобия в этом случае определяет, насколько правдоподобны наблюдаемые данные D при условии того, что гипотеза линейной регрессии с параметрами ω верна. В предположении независимости наблюдений и нормально распределенной ошибки $\varepsilon = y_{true} - f(\hat{x})$ по теореме Гаусса-Маркова метод наименьших квадратов

$$\hat{\omega} = \arg \min_{\omega} \sum_{i=1}^n (y_i - f_{\omega}(x_i))^2$$

дает наилучшую линейную несмещенную оценку ω :

$$\hat{\omega} = (X_1^T X_1)^{-1} X_1^T y. \quad (2)$$

Здесь для корректной записи через X_1 обозначена матрица наблюдений, полученная из матрицы X , добавлением 1 в каждое наблюдение x_i нулевым элементом. В случае системы датчиков наблюдения нельзя считать абсолютно независимыми, что, среди прочего, делает матрицу X_1 в (2) плохо обусловленной.

В анализе данных для оценки ω вместо принципа максимального правдоподобия используют байесовскую интерпретацию линейной регрессии, т.е. точечную оценку минимума вероятности апостериорного распределения, которое описывает насколько правдоподобна гипотеза линейной регрессии при наблюдаемых данных. В этом случае вместо (1) имеем:

$$\hat{\omega} = \arg \min_{\omega} (-\log(p(D|\omega)p(\omega))).$$

Таким образом, для получения параметров $\hat{\omega}$ необходимо предположить вид априорного распределения вероятностей $p(\omega)$, т.е. насколько правдоподобна гипотеза линейной регрессии с параметрами ω «до наблюдения данных». При построении нашего алгоритма мы будем использовать априорное распределение параметров как распределение Лапласа, которое дает метод LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator).

Метод LASSO является L_1 -регуляризацией метода наименьших квадратов

$$\hat{\omega}_{\text{LASSO}} = \arg \min_{\omega} \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_{\omega}(x_i))^2 + \lambda \sum_{i=0}^n |\omega_i| \right) \quad (3)$$

и в силу свойств нормы L_1 точно зануляет часть параметров в векторе $\hat{\omega}_{\text{LASSO}}$. Мы воспользуемся этой идеей, строя для каждого датчика (будем называть его в этот момент целевым) регрессию LASSO, что обоснованно ограничит набор датчиков лишь теми, которые описывают показания целевого датчика. В то же время, в этом наборе будет содержаться некоторое

количество датчиков, показания которых коллинеарны или почти коллинеарны, т.е. могут быть объяснены друг через друга с большой точностью. В общем случае количество таких датчиков в наборе больше 1, т.е. следует говорить о мультиколлинеарности. Заметим, что параметр λ является внешним для модели.

Достоверным показателем оценки коллинеарности признака является *VIF* (Variance Inflation Factor)

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2}, \quad (4)$$

где R_i^2 показывает, какую долю дисперсии i -го датчика объясняет регрессия наименьшими квадратами по всем остальным датчикам. Если $VIF > T$, то необходимо исключить этот признак из регрессии. Таким образом, хорошим способом избавления от коллинеарности показаний в наборе датчиков является итерационное удаление из набора признака с самым высоким $VIF > T$, после чего показатели *VIF* должны быть пересчитаны для нового набора датчиков, и процесс исключения при необходимости повторен, пока все *VIF* не станут меньше T . Здесь T – это порог, который выбран для оценки коллинеарности, он является внешним параметром алгоритма. На практике обычно полагают $T=5$, что соответствует факту, что регрессия по всем остальным датчикам объясняет более 80% дисперсии показаний исследуемого датчика.

Отметим проблему использования показателя *VIF* при мультиколлинеарности данных, т.е. в случае, когда показания не двух, а нескольких датчиков сразу коллинеарны. Коэффициент детерминации R^2 определяется моделью линейной регрессии на основе наименьших квадратов (2). В случае мультиколлинеарности линейная регрессия для i -го датчика будет в свою очередь содержать один или несколько коллинеарных признаков, и, следовательно, матрица $X_1^T X_1$ будет плохо обусловленной, а нахождение $(X_1^T X_1)^{-1}$ вычислительно неустойчиво, что, как уже обсуждалось, затрудняет оценку соответствующего ω из наименьших квадратов. В нашем алгоритме предлагается использовать сингулярное разложение матрицы $X_1 = V \Sigma^{-1} U^T$ для вычисления $(X_1^T X_1)^{-1} X_1^T$ в оценке $\hat{\omega}$ в (2), тогда:

$$\hat{\omega} = V \Sigma^{-1} U^T y. \quad (5)$$

Здесь V и U – матрицы, составленные из левых и правых сингулярных векторов X_1 .

После того, как для каждого датчика определен минимальный набор датчиков, по которым можно восстановить его показания, решение Задачи 1 лежит в плоскости графов и сводится к нахождению минимального вершинного покрытия.

Алгоритм нахождения минимальной подсистемы датчиков, показания которых объясняет показания всех датчиков системы мониторинга

INPUT: Дана система мониторинга S , состоящая из d датчиков, у которых известны показания $x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d)$ в моменты времени t_i , $i = 1, \dots, n$. Пусть так же задан порог коллинеарности T .

1. Минимальный набор датчиков $S_{min} = \emptyset$.
2. Для каждого j -го датчика из S выполнить:
 - 2.1. Применить алгоритм LASSO к системе показаний $D_j = (x_j, x_i)$, $i = 1, \dots, n, i \neq j$, получить набор параметров $\hat{\omega}_{LASSO}^j$, на основе которого выделить подсистему датчиков S_j , для которых соответствующие параметры отличны от нуля.
 - 2.2. Для каждого датчика $k \in S_j$ рассчитать VIF_k по формуле (4). Для расчета коэффициента детерминации R_k^2 использовать модель линейной регрессии наименьшими квадратами с оценкой параметров (5) с помощью сингулярного разложения матрицы, соответствующей системе показаний $D_k = (x_k, x_i)$, $i \in S_j, i \neq k$.
 - 2.3. Пока $\max_{k \in S_j} VIF_k > T$ выполнять:
 - 2.3.1. Удалить из системы S_j датчик с максимальным VIF ;
 - 2.3.2. Пересчитать новые VIF_k для каждого датчика $k \in S_j$. Для расчета R_k^2 использовать модель линейной регрессии с оценкой параметров (5).

В результате решена *Задача 2*.

3. Для каждого j -го датчика из S выполнить:

Если $S_j = \emptyset$, то j -й датчик включить в S_{min} .

В результате определена подсистема «независимых» датчиков, для которых не существует набора других датчиков, способных их восстановить, т.е. решена *Задача 3*.

4. Для всех датчиков S/S_{min} построить неориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{v_i\}$ – множество вершин, соответствующих датчикам из S/S_{min} .
 $E = \{E_{ij}\}$ – множество ребер, $E_{ij} = (i, j)$ определено для каждого датчика $j \in S/S_{min}$ и каждого датчика $i \in S_j$.
5. Найти минимальное вершинное покрытие графа G , т.е. наименьший набор вершин, такой, что каждое ребро графа инцидентно хотя бы одной вершине из этого набора.
6. Добавить датчики, входящие в минимальное вершинное покрытие графа G в набор S_{min} .

OUTPUT: Итоговый набор датчиков S_{min} будет являться решением *Задачи 1*.

Результаты работы алгоритма для двух подсистем мониторинга

Алгоритм был опробован на данных о загрязнении PM_{2.5} двух упомянутых выше систем мониторинга, основанных на датчиках разного типа.

Для системы КВИАС выявлено, что показания датчиков «Кубекино», «Березовка», «Северный», «Солнечный» плохо согласуются с остальными датчиками системы, поэтому все эти посты необходимы при построении общей картины загрязнения, а также рекомендованы к дублированию для снижения числа пропусков из-за технических сбоев. Показания датчика, расположенного на посту «Кировский», могут быть восстановлены через показания датчика «Черемушки». Таким образом, минимальная подсистема датчиков сети КВИАС, выявленная согласно предложенному алгоритму: «Березовка», «Ветлужанка», «Кубекино», «Покровка», «Свердловский», «Северный», «Солнечный», «Черемушки».

Для датчиков системы КНЦ СО РАН показано, что только один датчик, расположенный в районе «Песчанка» не согласуется ни с одним другим датчиком системы. Показания датчиков «Академгородок» и «Удачный» взаимозаменяемы. Показания датчика, расположенного на посту «Кировский», могут быть восстановлены через показания датчика «Спутник», а данные с поста «Телевизорный» показаниями датчика «Ветлужанка». Согласно оставшимся зависимостям, может быть выделена следующая минимальная подсистема, описывающая общую экологическую ситуацию: датчики «Академгородок», «Ветлужанка», «Дрокино», «КРАЗ», «Молокова», «Песчанка», «Свердловский», «Солонцы», «Спутник», «Шахтеров».

Обсуждение и дальнейшее развитие алгоритма

Результаты работы алгоритма на реальных данных являются предварительными по двум причинам.

Во-первых, сами данные содержат большие пропуски, связанные с простоями аппаратуры, различные выбросы, соответствующие сбоям аппаратуры. Некоторые датчики за период наблюдения включались в систему мониторинга, некоторые, наоборот, выводились из эксплуатации. В связи с этим продолжается разработка алгоритмов обработки первичных данных наблюдений. Алгоритмы направлены, как на поиск максимально возможных для анализа периодов наблюдений, так и поиск выбросов, заполнение пропусков и т.д. Результаты анализа, приведенные выше, получены на данных за максимальный период 2019 – 2023 гг, в который работало максимальное количество датчиков. Данные были очищены от выбросов вручную и с помощью простейших алгоритмов разведочного анализа данных. Для отбора данных пригодных для анализа написано несколько нетривиальных сценариев обработки сырых данных.

Во-вторых, есть вопросы, связанные с развитием самого предлагаемого алгоритма.

Отметим некоторые из них:

1. Требуется адаптация к нашим задачам методов оценки корректности алгоритма LASSO. При использовании классической линейной регрессии наименьшими квадратами существуют критерии проверки гипотез, как о значимости самой линейной регрессии в целом, так и значимости каждого коэффициента, а также полезные оценки качества построенной регрессии и информационные критерии, используемые для сравнения различных моделей. Все эти вопросы необходимо контролировать и для метода LASSO. В литературе описаны подходы к решению обозначенных задач. Их следует апробировать на реальных данных, выявить наиболее подходящие и включить в наш алгоритм.
2. В настоящее время внешние параметры моделей (параметр λ в (3), порог коллинеарности T) подбираются вручную. Необходимо внедрить процедуру валидации для их подбора, что тоже нетривиальная задача для алгоритма LASSO.
3. В контексте решения проблемы с плохой обусловленностью матриц для вычисления VIF, представляется интересным рассмотреть задачу прямого поиска наборов датчиков, наблюдения которых коллинеарны. В литературе описаны ее решения, например, основанные на пропорциональной декомпозиции дисперсии.
4. Кроме того, поскольку наши данные являются временными рядами, необходимо адаптировать алгоритмы (особенно, будущие, связанные с валидацией) к этому факту.

Основные публикации по разделу:

1. Petrakova V., Karepova E. Algorithm for segmentation of multimodally distributed time series in accordance with their modes // Journal of Computational Science, 2026. Vol. 94. P. 102765
2. Karepova E., Shan'ko Yu., Tokarev A., Petrakova V. Temporal patterns of instrumentation failures in atmospheric boundary layer observational systems //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – V. 646. – P. 00011.
3. Петракова В.С., Кареева Е.Д. Алгоритм сегментации мультимодального временного ряда в соответствии с модами его распределения // "XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева «Решетневские чтения»", Ч. 2, С. 122-124.
4. Кареева Е.Д., Петракова В.С. Алгоритм извлечения унимодально распределенных выборок из мультимодально распределенного ряда // Материалы XXVIII Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем – 2025». Красноярск. ИВМ СО РАН, 2025. С. 54-61.

2.4. Оценка репрезентативности модели NCEP GFS для анализа метеоусловий и загрязнения воздуха в Красноярске

Красноярск – это достаточно сложный объект исследования. Из-за холмистого рельефа перепад высот над уровнем моря составляет до 400 метров. При этом город стоит на реке Енисей, которая разделяет его на две половины. Здесь сосредоточены промышленные объекты, плотный автомобильный трафик, районы с частным сектором и т.д. [1, 2]

Одним из главных факторов возникновения повышенного загрязнения воздуха в городе являются метеорологические условия. Ранее было показано, что температурная инверсия и низкая скорость ветра определяют накопление частиц PM_{2.5} в воздушной среде [3-5]. Температурные инверсии препятствуют вертикальному рассеянию вредных примесей в воздухе, а отсутствие ветра – горизонтальному. Инверсии характеризуются мощностью (толщина инверсионного слоя в метрах), интенсивностью (перепад температуры от нижней границы инверсионного слоя до верхней) и типом (приземные, приподнятые, смешанные).

По данным системы мониторинга воздуха КНЦ СО РАН в зимний период часто наблюдается значительное загрязнение воздуха взвешенными частицами PM_{2.5} с превышением среднесуточной ПДК в несколько раз. Эти периоды повышенного загрязнения обычно характеризуются низкой скоростью ветра и наличием температурных инверсий, интенсивность которых достигает 15°C и более в отдельные дни (рисунок 40).

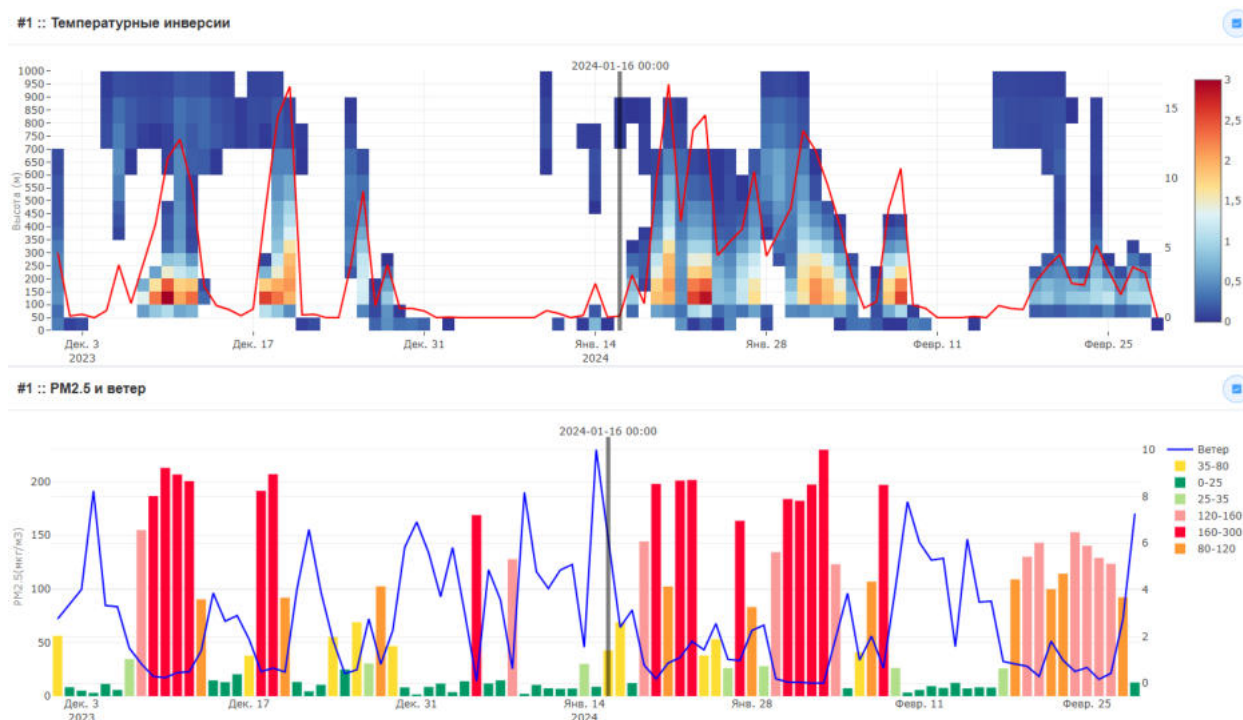


Рисунок 40 – Температурные инверсии (сверху), скорость ветра и загрязнение атмосферы Красноярска (снизу) за период с декабря 2022 по февраль 2023 года

В дополнение к инструментальным измерениям системы мониторинга КНЦ СО РАН, в настоящем исследовании были использованы данные глобальной модели прогноза погоды NCEP Global Forecast System (GFS). Эта модель предоставляет рассчитанные метеорологические поля, ассимилирующие информацию от глобальной сети наблюдений. Её ключевыми преимуществами являются глобальный охват и высокая временная непрерывность выходных данных. В связи с этим возникает задача оценки степени репрезентативности и сопоставимости метеорологических данных, рассчитанных моделью GFS, с результатами прямых инструментальных измерений.

В научной литературе представлены исследования, в которых анализируются параметры нижнего слоя атмосферы – такие как температурная стратификация, статистика возникновения и характеристики температурных инверсий, скорость и направление ветра – на основе данных численных моделей прогноза и реанализа.

В рамках настоящей работы был выполнен сравнительный анализ температурной стратификации атмосферы, а также скорости и направления приземного ветра для территории Красноярска по данным модели NCEP GFS и наземных измерений.

Данные модели GFS предоставляются 4 раза в сутки в 0, 6, 12 и 18 часов по всемирному объединенному времени (UTC). Были использованы данные анализа о температуре воздуха на десяти вертикальных уровнях: поверхность, 2, 80, 100 м, 1000-850 мбар, а также информация о геопотенциальной высоте выбранных изобарических поверхностей и две компоненты ветра на уровне 10 м.

Для оценки применимости данных модели прогноза погоды NCEP GFS в задачах исследования температурной стратификации атмосферы города Красноярска было проведено сравнение температурных профилей модели GFS с данными температурного профилемера МТР-5, установленного в центре Красноярска. Исследование охватывало 3-месячный зимний период: декабрь 2022 г., январь и февраль 2023 г.

Сравнительный анализ температуры воздуха по данным модели GFS и профилемера МТР-5 был выполнен на четырех вертикальных уровнях, соответствующих 50, 300, 600 и 900 метрам над уровнем поверхности. Он показал высокую согласованность данных – коэффициент корреляции находился в пределах от 0,91 до 0,98 (рисунок 41).

Наименьшая разница абсолютных значений температуры воздуха между двумя наборами данных достигается на больших высотах. В приземном слое можно наблюдать наибольшие различия температуры. Средняя разница абсолютных значений температуры между данными модели GFS и профилемера МТР-5 на уровне 50 метров составила $2,8 \pm 0,2$ °С, на уровне 300 метров – $1,35 \pm 0,11$ °С, на уровне 600 метров – $1,22 \pm 0,1$ °С, на уровне 900 метров – $1 \pm 0,1$ °С.

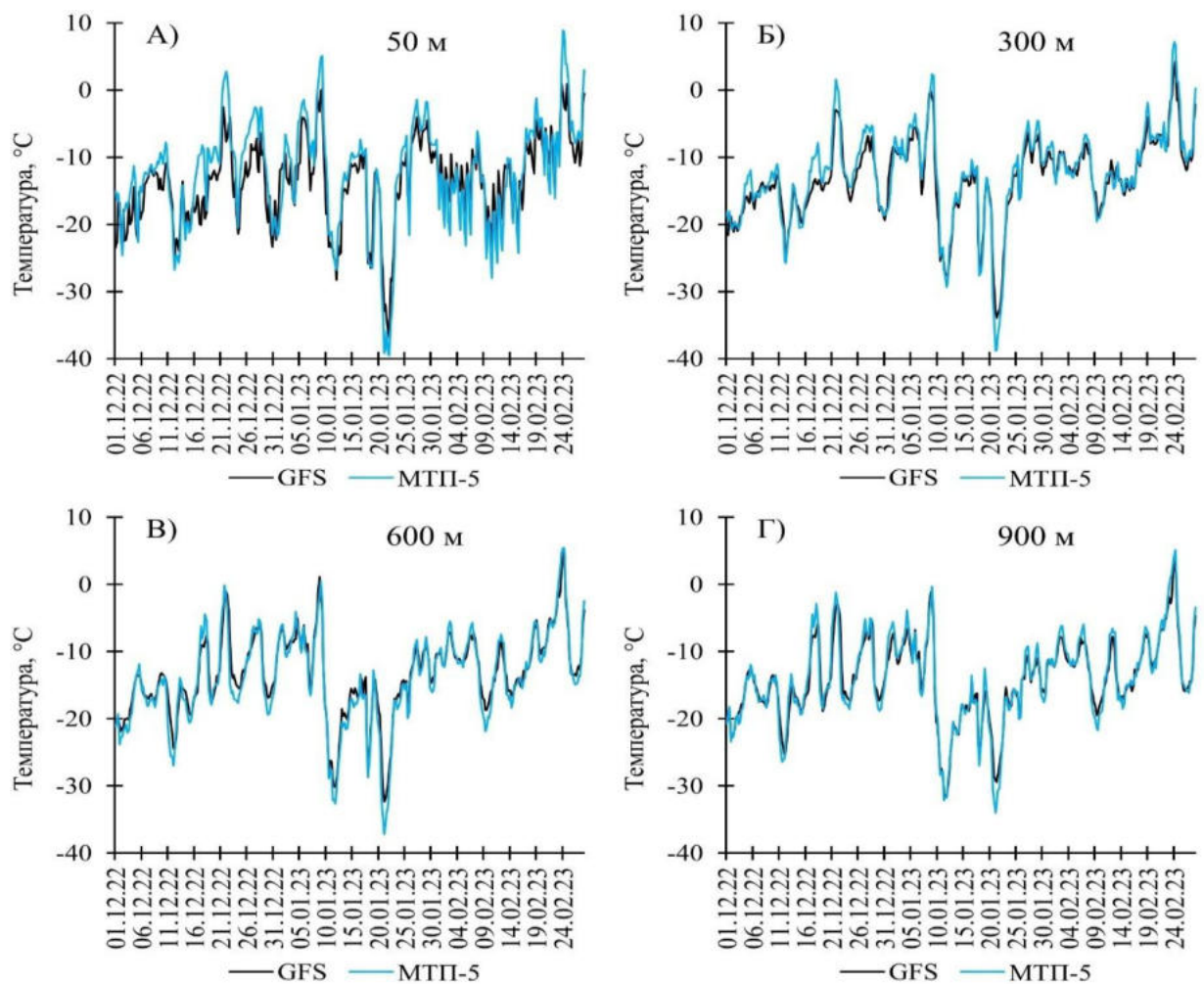


Рисунок 41 – Сравнение температуры воздуха по данным GFS и МТП-5 на четырех вертикальных уровнях

Проведен анализ статистики общего количества дней с инверсией температуры атмосферы в течение выбранного периода исследования (таблица 1). Для января 2023 года модель GFS показала на 6 дней с инверсиями атмосферы меньше по сравнению с МТР-5, для остальных месяцев оба набора данных показали равно количество дней с инверсиями.

По данным модели GFS за период наблюдения было выявлено 67 дней с приземной инверсией, по данным профилемера МТР-5 – 52 дня. Обратная ситуация с количеством дней с приподнятой инверсией. Здесь, по данным модели GFS, количество дней равнялось 60, а по данным профилемера МТР-5 – 68 дней (таблица 4).

По данным модели GFS средняя величина инверсий температуры в декабре 2022 г. и январе 2023 г. была выше ($3,3^{\circ}\text{C}$ и $4,12^{\circ}\text{C}$, соответственно), по данным МТП-5 – $2,2^{\circ}\text{C}$ в декабре и $3,4^{\circ}\text{C}$ в январе. В феврале 2023 г. данные МТП-5 показали более высокую среднюю величину инверсии температуры, по сравнению с моделью GFS ($5,1$ и $4,14^{\circ}\text{C}$, соответственно) (таблица 4).

Таблица 4 – Общая статистика событий инверсий температуры по данным модели GFS и профилера МТП-5 для зимнего периода 2023 года

	Декабрь 2022		Январь 2023		Февраль 2023	
	GFS	МТП-5	GFS	МТП-5	GFS	МТП-5
Дней с инверсией	30	30	22	28	26	26
Дней с приземной инверсией	24	14	18	17	25	21
Дней с приподнятой инверсией	26	27	13	18	21	23
Средняя толщина инверсии, м	539	377	499	347	446	403
Средняя величина инверсии, °С	3,3	2,2	4,12	3,4	4,14	5,1

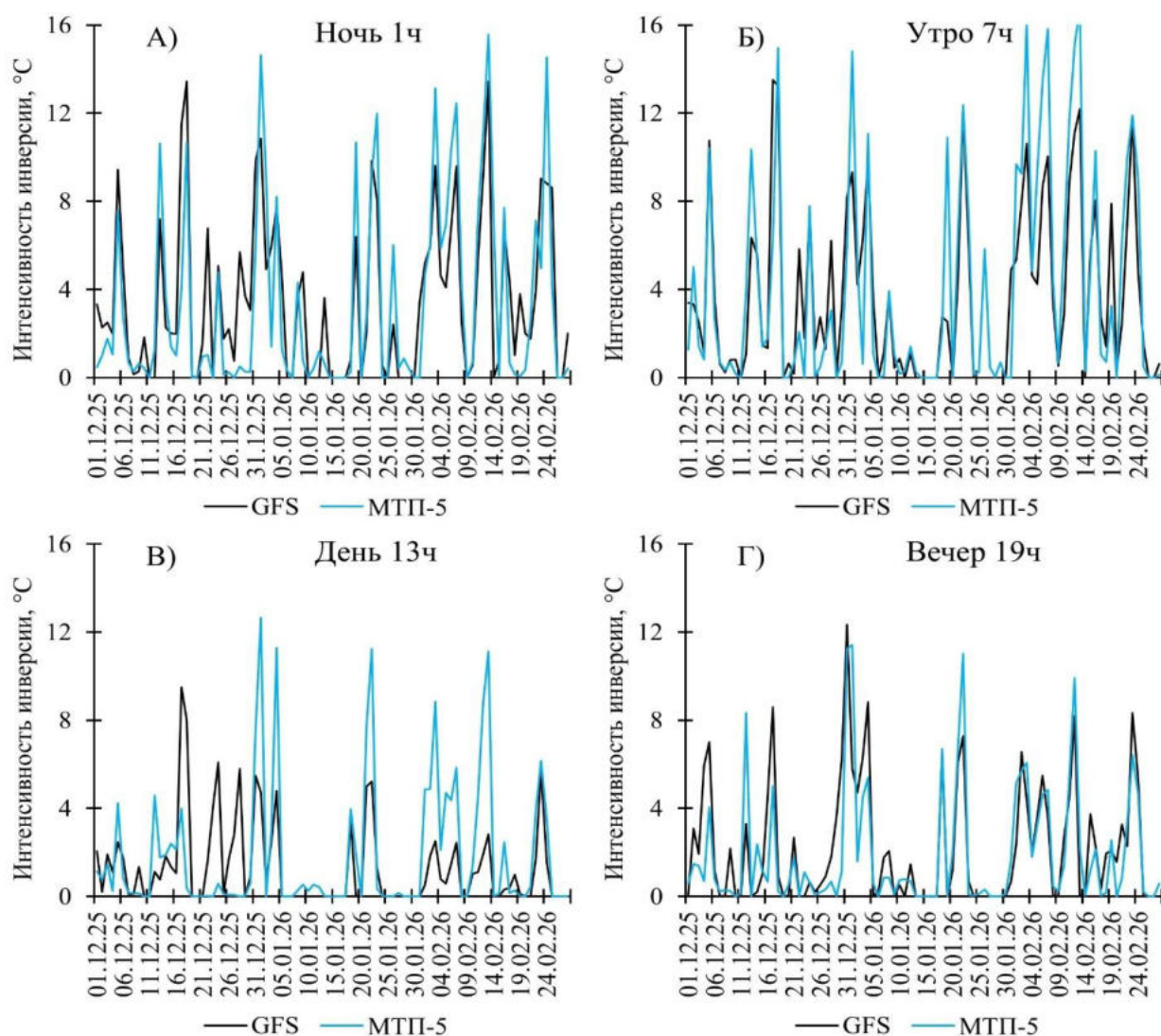


Рисунок 42 – Сравнение интенсивности инверсий ночью, утром, днем и вечером по данным модели GFS и профилера МТП-5

Сравнение значений интенсивности инверсий температуры по четырем моментам времени (1ч, 7ч, 13ч, 19ч) показало, что наилучшая сходимость данных утром (коэффициент корреляции 0,85). Хуже всего данные согласуются днем (коэффициент корреляции 0,54). В утреннее и вечернее время корреляция между значениями интенсивности инверсий по данным модели GFS и профилемера МТП-5 составила 0,81 (рисунок 42).

При этом, анализ средней разницы абсолютных значений показал, что лучше всего данные модели GFS и профилемера МТП-5 согласуются для вечернего времени (средняя разница составила $1\pm 0,3^{\circ}\text{C}$). Средняя разница абсолютных значений интенсивности инверсий ночью составила $1,8\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, утром – $1,7\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, днем – $1,5\pm 0,45^{\circ}\text{C}$.

Для оценки применимости данных о скорости и направлении ветра модели прогноза погоды NCEP GFS для условий Красноярска было проведено сравнение данных модели GFS для уровня 10 метров от поверхности земли с тремя наземными метеостанциями: метеостанция, установленная на крыше ИВМ СО РАН, два автоматизированных поста наблюдения Среднесибирского УГМС в черте города «АМС Красноярск» и «АМК Красноярск Опытное поле», которая расположена вблизи города.

Период исследования – с декабря 2022 года по февраль 2023 года. Временное разрешение данных составило 4 раза в сутки: ночь (1ч), утро (7ч), день (13ч), вечер (19ч).

Таким образом, было получено по 360 измерений за период исследования для каждого набора данных.

Сравнение направления ветра показало, что данные модели GFS лучше всего согласуются с данными «АМК Красноярск опытное поле» (рисунок 43). В обоих случаях преобладающим направлением ветра являлся юго-западный.

По статистике, за период наблюдения, данные модели GFS в 32% случаев показывали юго-западный ветер, в 19% – юго-юго-западный, в 16,7% – западно-юго-западный, в 14% – южный ветер. Данные «АМК Красноярск опытное поле» показали юго-западное направление ветра в 37,8% случаев, юго-юго-западный в 24,8% случаев, западно-юго-западный ветер в 20% случаев. Метеостанция ИВМ СО РАН показала в 41,6% случаев западный ветер, а также, западно-юго-западный ветер в 20% случаев и юго-западный в 9,6% случаев. Метеостанция «АМС Красноярск» в 38,6% случаев показала западно-юго-западный ветер, в 17,9% случаев юго-западный ветер, в 8,9% случаев – юго-юго-западный ветер (рисунок 43).

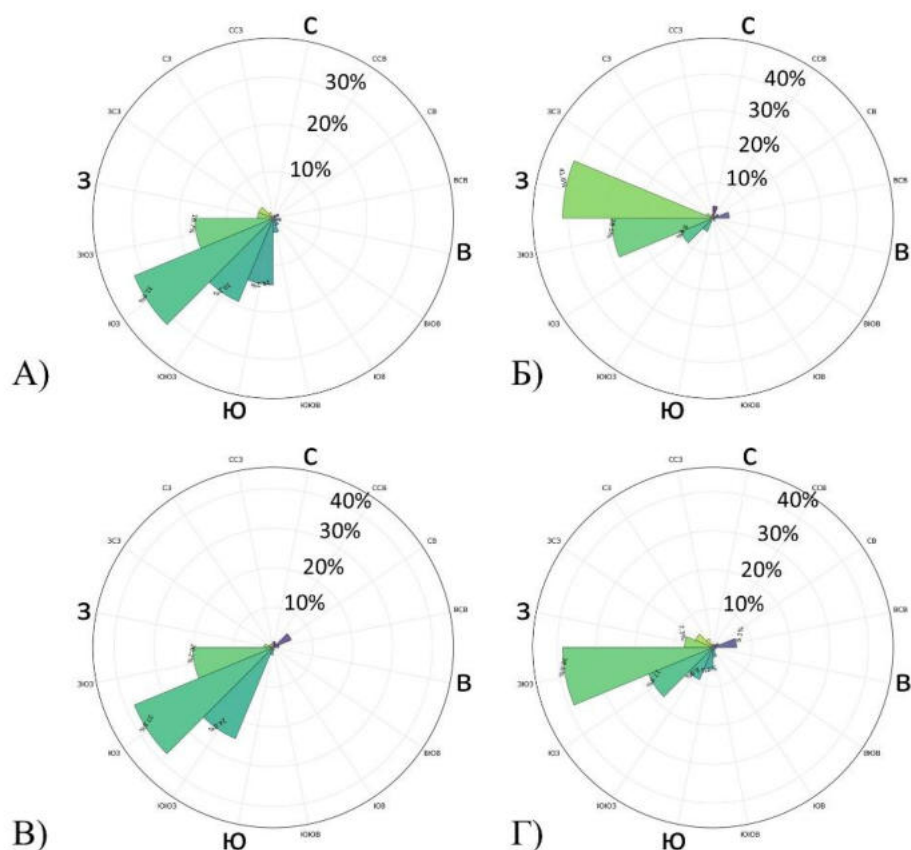


Рисунок 43 – Розы ветров за период с декабря 2022 года по февраль 2023 года: А) по данным модели GFS, Б) по данным метеостанции ИВМ СО РАН, В) по данным метеостанции «АМК Красноярск опытное поле», Г) по данным метеостанции «АМС Красноярск»

Сравнение скорости ветра за период исследования показало высокую согласованность данных модели GFS с показаниями наземных метеостанций (коэффициент корреляции составил от 0,63 до 0,7) (рисунок 44).

Стоит отметить не очень высокую согласованность данных о скорости ветра между некоторыми наземными метеостанциями, например, сравнение данных с постов «АМК Красноярск опытное поле» и «АМС Красноярск» показало коэффициент корреляции, равный 0,55.

В большинстве случаев, данные метеостанции ИВМ СО РАН показывали более высокие значения, в сравнении с данными модели GFS. В то же время, данные автоматизированных постов Среднесибирского УГМС, наоборот, чаще всего демонстрировали более низкие значения скорости ветра в сравнении с данными модели GFS (рисунок 5).

Средняя скорость ветра за период исследования по данным модели GFS составила $2,77 \pm 0,2$ м/с, для метеостанции ИВМ СО РАН – $3,3 \pm 0,2$ м/с, для метеостанции «АМК Красноярск опытное поле» – $1,9 \pm 0,18$ м/с, для метеостанции «АМС Красноярск» – $1,3 \pm 0,12$ м/с.

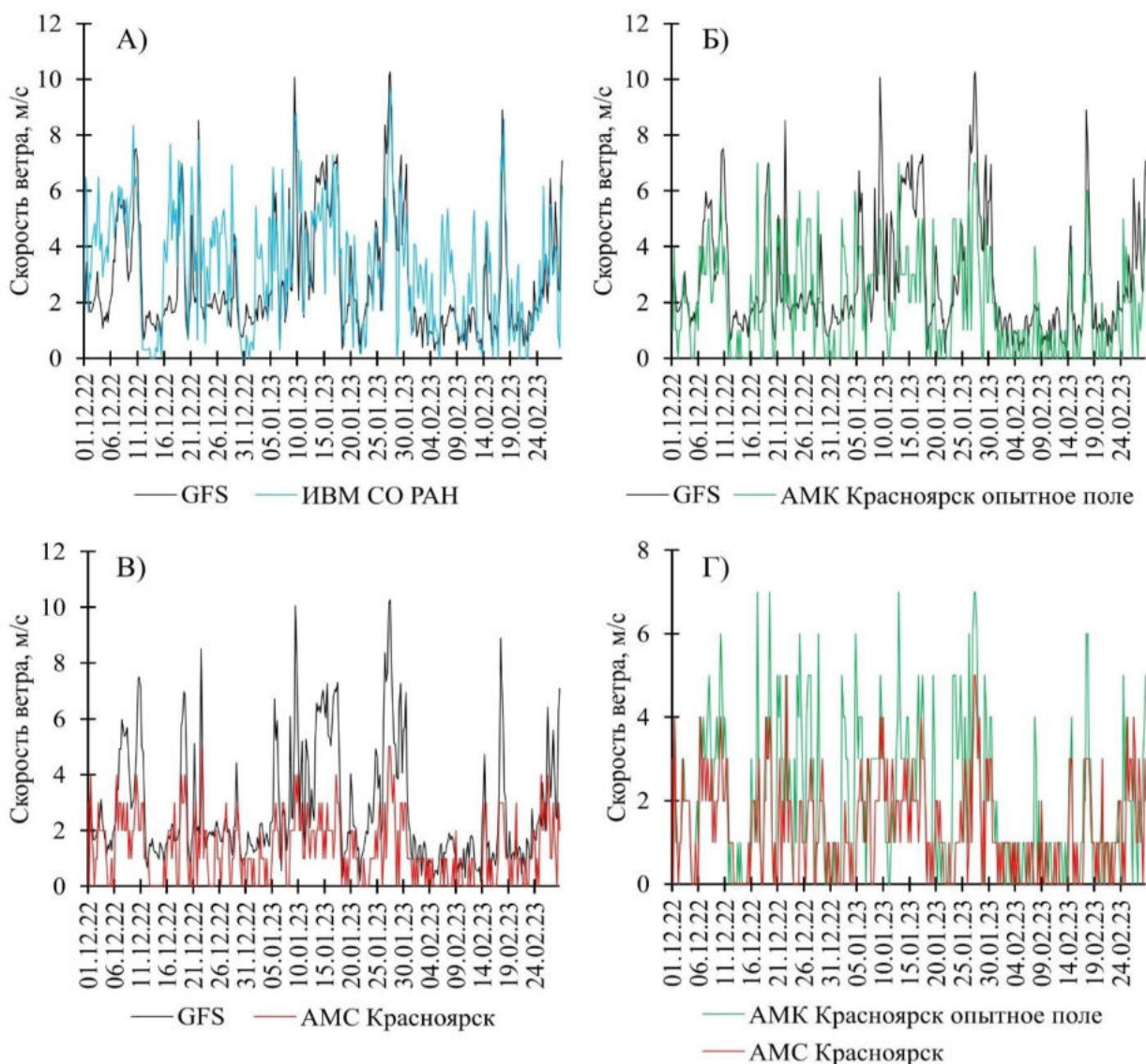


Рисунок 44 – Сравнение приземной скорости ветра в Красноярске за период с декабря 2022 г. по февраль 2023 г. по четырем наборам данных

Проведено сравнение скорости ветра по данным модели GFS и наземных метеостанций отдельно для четырех временных моментов в течение периода исследования: ночь (1ч), утро (7ч), день (13ч), вечер (19ч).

Анализ показал, что по значениям корреляции скорости ветра в разные моменты суток лучше всего данные модели GFS согласуются с постом мониторинга «АМС Красноярск» в ночное и утреннее время. Однако, днем и вечером общая согласованность данных модели GFS при сравнении с наземными станциями в большинстве случаев выше (корреляция от 0,56 до 0,82), лучше всего в это время данные модели GFS согласуются с данными метеостанции ИВМ СО РАН (таблица 5).

Таблица 5 – Корреляция данных скорости ветра между моделью GFS и метеостанциями для 4 моментов времени

	1ч	7ч	13ч	19ч
GFS – ИВМ СО РАН	0,60	0,56	0,82	0,78
GFS – «АМК Красноярск опытное поле»	0,58	0,62	0,74	0,56
GFS – «АМС Красноярск»	0,66	0,65	0,77	0,67

При анализе разниц абсолютных значений скорости ветра между моделью GFS и наземными метеостанциями выявлено, что в большинстве случаев (кроме утра 7ч) лучше сходимость с данными метеостанции ИВМ СО РАН (разница от $1,2 \pm 0,2$ м/с до $1,6 \pm 0,27$ м/с), хуже всего сходимость скорости ветра с постом мониторинга «АМС Красноярск» (разница значений скорости ветра от $1,45 \pm 0,22$ м/с до $1,7 \pm 0,33$ м/с) (таблица 6).

Таблица 6 – Разница абсолютных значений скорости ветра между моделью GFS и метеостанциями для 4 моментов времени

	Ночь 1ч	Утро 7ч	День 13ч	Вечер 19ч
GFS – ИВМ СО РАН	$1,35 \pm 0,2$ м/с	$1,6 \pm 0,27$ м/с	$1,23 \pm 0,17$ м/с	$1,2 \pm 0,2$ м/с
GFS – «АМК Красноярск опытное поле»	$1,45 \pm 0,22$ м/с	$1,5 \pm 0,22$ м/с	$1,45 \pm 0,26$ м/с	$1,5 \pm 0,26$ м/с
GFS – «АМС Красноярск»	$1,46 \pm 0,25$ м/с	$1,55 \pm 0,3$ м/с	$1,7 \pm 0,33$ м/с	$1,6 \pm 0,3$ м/с

Выводы

Проведенное сравнение температуры воздуха Красноярска на различных вертикальных уровнях показало, что данные модели GFS лучше согласуются с данными профилера МТР-5 на больших высотах (средняя разница абсолютных значений до $1 \pm 0,1$ °С на 900 метрах). На приповерхностных уровнях увеличивается средняя разница абсолютных значений температуры воздуха ($2,8 \pm 0,2$ °С на 50 метрах).

По количеству дней с инверсиями температуры оба набора данных показали одинаковые результаты, за исключением января, когда модель GFS показала на 6 дней меньше. Однако по данным МТР-5 количества приземных инверсий было меньше, а приподнятых – больше на всем периоде исследования в сравнении с данными GFS.

При сравнении значений интенсивности инверсий наихудшая согласованность данных проявилась для дневного времени (13ч), наилучшая – утром и вечером (1ч и 19ч. соответственно).

Анализ направления ветра за период исследования показал лучшую согласованность данных модели GFS для автоматизированного поста мониторинга «АМК Красноярск опытное поле» с преимущественно юго-западным направлением ветра. Метеостанция ИВМ СО РАН и пост мониторинга «АМС Красноярск» показали преимущественно западное направление ветра.

Сравнение значений скорости ветра показало, в целом, высокую согласованность данных модели GFS с тремя наземными станциями мониторинга (корреляция от 0,63 до 0,7). Сравнение данного параметра для четырех моментов времени показало, что лучше всего данные модели GFS согласуются с данными метеостанции ИВМ СО РАН ночью, днем и вечером (средняя разница абсолютных значений от $1,2 \pm 0,2$ м/с до $1,35 \pm 0,2$ м/с)

Таким образом, расчетные данные глобальных моделей прогноза погоды имеют ряд недостатков и не всегда передают реальную картину состояния атмосферы города. Однако, могут способствовать, в качестве дополнительных данных, решению различных задач исследования метеорологических процессов приземного слоя атмосферы.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Song B. et al. Effect of high-level fine particulate matter and its interaction with meteorological factors on AECOPD in Shijiazhuang, China // *Scientific Reports*. 2022. 12(1). P. 8711.
2. Kaufman, Y.J., Tanré, D., Boucher, O. A satellite view of aerosols in the climate system // *Nature*. 2002. V. 419. №. 6903. P. 215-223.
3. Hou P., Wu S. Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality // *Scientific reports*. 2016. V. 6. №. 1. P. 23792.
4. Volodko O. et al. Influences of meteorological conditions in PM_{2.5} levels in Krasnoyarsk city atmosphere // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2023. V. 392. P. 02022.
5. Дергунов А. В., Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э. Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации // *Вычислительные технологии*. 2022. Т. 27. №. 3. С. 84-94.

Основные публикации по разделу:

1. Дергунов А.В., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Сравнение интенсивности температурных инверсий по данным модели NCEP GFS и инструментальных измерений // *Енисейская теплофизика: Тезисы докладов Всероссийского форума. В рамках форума: XIV Семинар вузов по теплофизике и энергетике, Красноярск, 14–19 апреля 2025 года.* – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2025. С. 238-239. EDN: IEUEPV.

2.5. Формирование и последствия зимних температурных инверсий в атмосфере Красноярска

В атмосфере ряда промышленных городов России и зарубежных стран регистрируются повышенные концентрации загрязняющих веществ, обусловленные индустриальными и транспортными выбросами, дымами лесных пожаров и частных домовладений, рельефом местности и неблагоприятными метеоусловиями (НМУ). К числу НМУ, прежде всего, следует отнести ситуации, вызывающие формирование температурных инверсий, которые приводят к затруднению переноса примесей в верхние слои атмосферы [1].

Анализу повторяемости инверсий и их влиянию на уровни загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске посвящена статья [2]. В работе [3] исследовано влияние приподнятой инверсии на приземное содержание концентрации атмосферных газов в Москве по данным 2002-2016 гг. В [4] показано, что при сочетании приземной инверсии и слабого ветра средние концентрации исследуемых аэрозольных характеристик увеличиваются до 3 раз, а при северо-западном ветре – до 7-8 раз относительно средних уровней за сезон в г. Томске. Анализ формирования температурных инверсий в Санкт-Петербурге представлен в работе [5]. Первые исследования вертикальных профилей температуры атмосферы в г. Красноярске отражены в работах [7,8]. Отметим также, что в ряде зарубежных работ рассматривается влияние температурных инверсий на концентрацию PM_{2.5}: в Чили [9], Китае [10, 11], Индии [12].

В зимний период в атмосфере г. Красноярска значительно увеличивается концентрация веществ, антропогенного происхождения, которая приводит при НМУ к возникновению многочасовых и многосуточных смогов над городом и ухудшению социально-экономических условий жизни населения, которое составляет свыше 1 млн. человек.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости формирования зимних инверсионных температурных слоев в атмосфере Красноярска с 2022 г. по 2024 г. в зависимости от метеоусловий и рельефа. Проанализировано влияние вида (радиационные, адвективные), категории (приземная, приподнятая) и интенсивности инверсии на концентрацию PM_{2.5}.

Методы исследования.

В работе использовались данные с нескольких систем наблюдения за атмосферой города Красноярска (рисунок 45). Атмосферное давление, температура воздуха и концентрация PM_{2.5} регистрировались на постах системы мониторинга воздуха «Красноярского научного центра СО РАН», созданной авторами. Станции этой сети в режиме реального времени выполняют измерения каждые 5 минут. Вертикальный профиль температуры атмосферы

регистрируется до высоты 1000 метров с интервалом 50 метров профилемером МТП-5, который размещен в центре города на берегу р. Кача (рисунок 45, Качинская). Измерения выполняются каждые 5 минут в автоматическом режиме. Направление и скорость ветра определяются на посту мониторинга краевой ведомственной системы наблюдения (рисунок 45, Покровка). Общая облачность определяется на метеостанции «Опытное поле» (рисунок 45) по данным сайта <http://rp5.ru>.

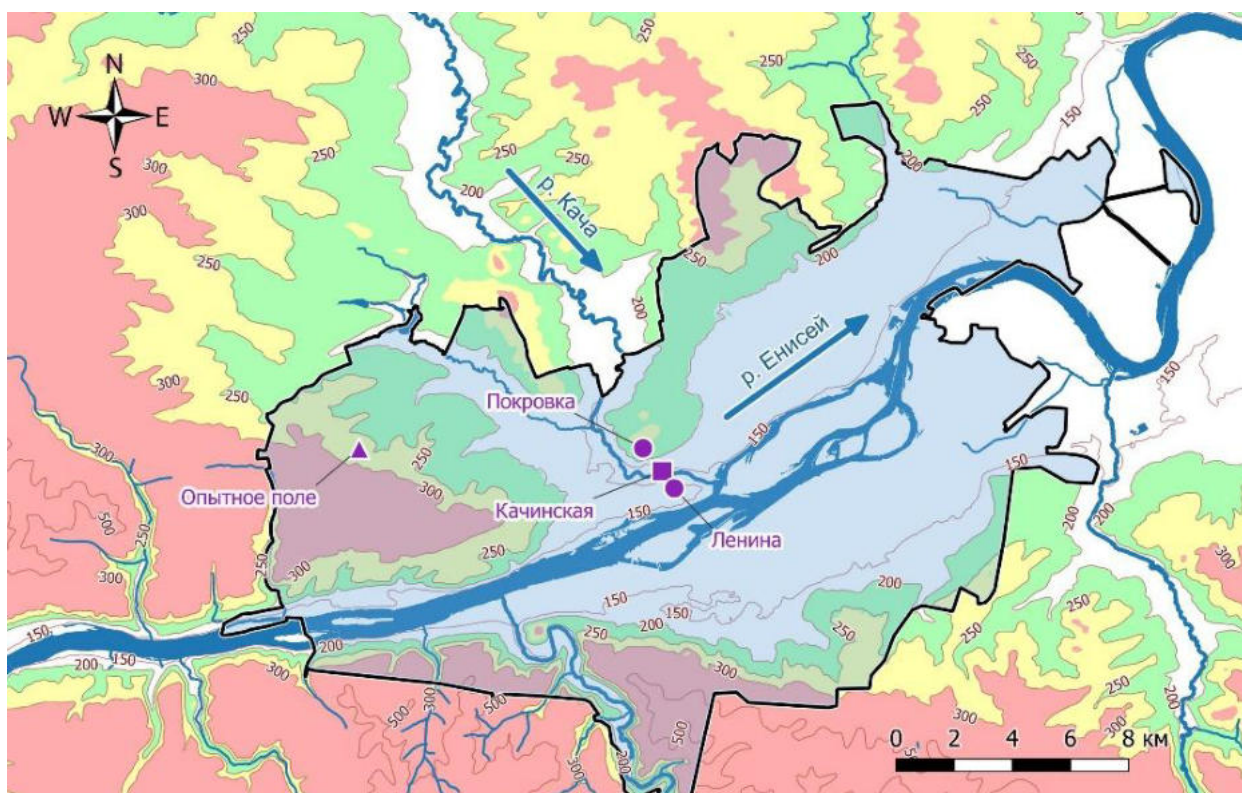


Рисунок 45 – Карта области исследования

Результаты и обсуждение

Были проведены исследования формирования температурных инверсий $T_a(h, t)$ (где h – высота над поверхностью Земли, t – время) в атмосфере г. Красноярска которые имеют длительность от нескольких часов до нескольких суток. Анализ ситуации показал формирование двух видов инверсии: радиационной и адвективной.

Многочасовая радиационная инверсия

Рассмотрим характерный пример формирования многочасовой инверсии с 14:00 23 декабря до 16:00 24 декабря 2022 г. На рисунке 46 представлена временная динамика метеопараметров, интенсивности и границ инверсии и концентрации $PM_{2.5}$.

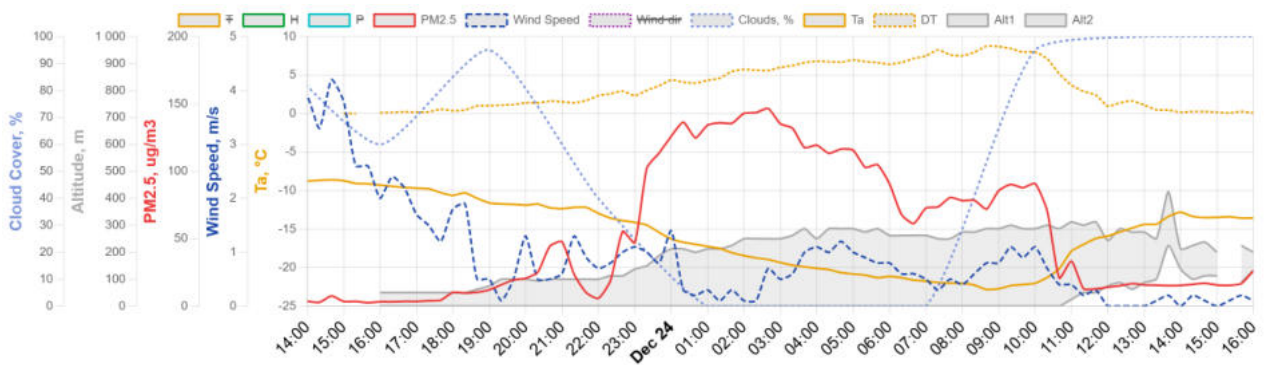


Рисунок 46 – Температура атмосферы $T_a(0, t)$ (1), интенсивность инверсии ΔT (2), границы инверсионного слоя (3), скорость ветра (4), концентрация $PM_{2.5}$ (5), общая облачность (6)

Согласно рисунку 46, температура $T_a(0, t)$ начала снижаться в 14:00 23 декабря с -8°C , достигла минимума -23°C в 09:00 24 декабря, затем стала увеличиваться. Скорость ветра упала ниже 2 м/с после 16:00 23 декабря. В 16:00 23 декабря начинается формирование приземной инверсии. Интенсивность инверсии достигает максимального значения $\Delta T=8.7^\circ\text{C}$ с мощностью инверсии $\Delta H \approx 300$ м в 09:00 24 декабря (при минимуме $T_a(0,t)$). В последующем $T_a(0, t)$ увеличиваются, а ΔT уменьшается. В 11:00 24 декабря приземная инверсия переходит в приподнятую форму, и исчезает к 16:00. Отметим, что после 19:00 23 декабря и до 10:00 24 декабря была слабая облачность. Увеличение концентрации $PM_{2.5}$ начинается с 18:00 23 декабря, достигает максимума величины 150 мкг/м^3 в 02:00 24 декабря и после перехода инверсии в приподнятую форму становится ниже предельно допустимых суточных концентраций $ПДК_{сс} = 35 \text{ мкг/м}^3$.

На рисунке 47 представлена временная динамика вертикального распределения температуры атмосферы $T_a(h, t)$, полученная с профилемера МТР-5. В начальный момент времени 14:00 23 декабря температурный градиент был отрицательный с величиной $\gamma \approx 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/м}$. С понижением температуры $T_a(0, t)$ (рисунок 46) начинается также охлаждение воздуха на других высотах и в 16:00 образуется, как уже было сказано выше, приземная инверсия при $T_a(0, t) = -9^\circ\text{C}$ с мощностью $\Delta H \approx 50$ м (рисунок 47А). Таким образом причиной формирования инверсии является уменьшение $T_a(0, t)$ и передача тепла сверху вниз. Определим причину такого охлаждения.

При слабом ветре и малой облачности суточный температурный режим приземного слоя атмосферы в основном обусловлен теплообменом воздуха с подстилающей поверхностью земли в вязком слое атмосферы с последующей передачей тепла в верхние слои за счет турбулентной теплопроводности. В результате поведение $T_a(0, t)$ с некоторым временным запаздыванием копирует поведение температуры подстилающей поверхности, тепловой

баланс которой в основном определяется поглощением солнечного излучения W_s и испусканием тепловой инфракрасной радиации (ТИР) W_T .

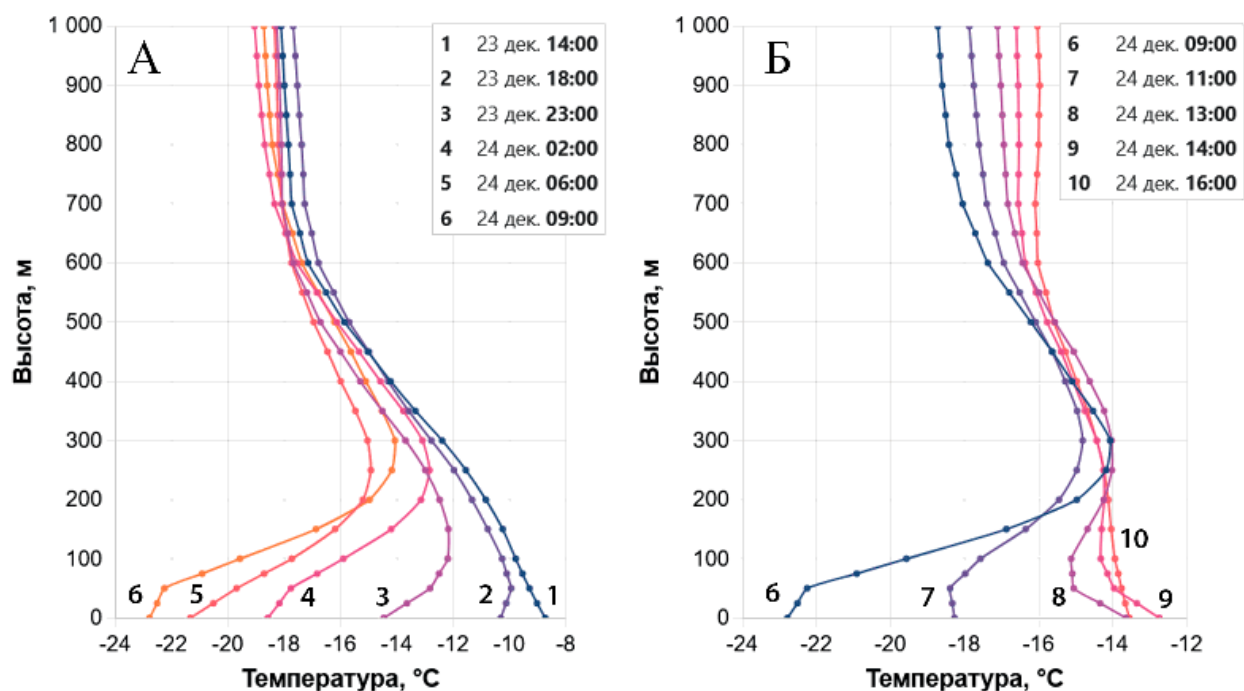


Рисунок 47 – Динамика вертикального распределения температуры воздуха $T_a(h, t)$ на посту Качинская в период роста (А) и уменьшения (Б) интенсивности инверсии

В ночное время (в начале суток) уменьшение температуры подстилающей поверхности обусловлено испусканием W_T . После восхода солнца, при $W_s > W_T$ начинается рост температуры. Соответственно также начинается, с некоторым сдвигом по времени, увеличение $T_a(0, t)$. После полудня солнечная радиация уменьшается и в момент $W_s = W_T$ температура подстилающей поверхности достигает максимума, а в последующем уменьшается, что наиболее эффективно происходит в безоблачную погоду. Соответственно идет уменьшение $T_a(0, t)$, которое приводит к началу формирования инверсионного слоя (рисунок 46). Рост величины интенсивности инверсии ΔT продолжается до момента, когда в утреннее время $W_s = W_T$ и $T_a(0, t)$ достигает минимума, а в последующем, с увеличением $T_a(0, t)$, ΔT уменьшается и возникает срыв инверсии.

При увеличении $T_a(0, t)$, тепло передается снизу вверх в более высокие слои атмосферы (рисунок 47Б). Это приводит в 11:00 к преобразованию приземной инверсии в приподнятую с нижней границей около 50 м (рисунок 46), а в дальнейшем к срыву инверсии и восстановлению отрицательного градиента температуры с высотой после 16:00 24 декабря. Таким образом, анализ данных показывает, что рассматриваемый вид инверсии является радиационным.

Многосуточная радиационная инверсия

В период длительных НМУ формируются многосуточные радиационные инверсионные слои и город погружается в состояние длительного смога, наиболее опасного для здоровья населения.

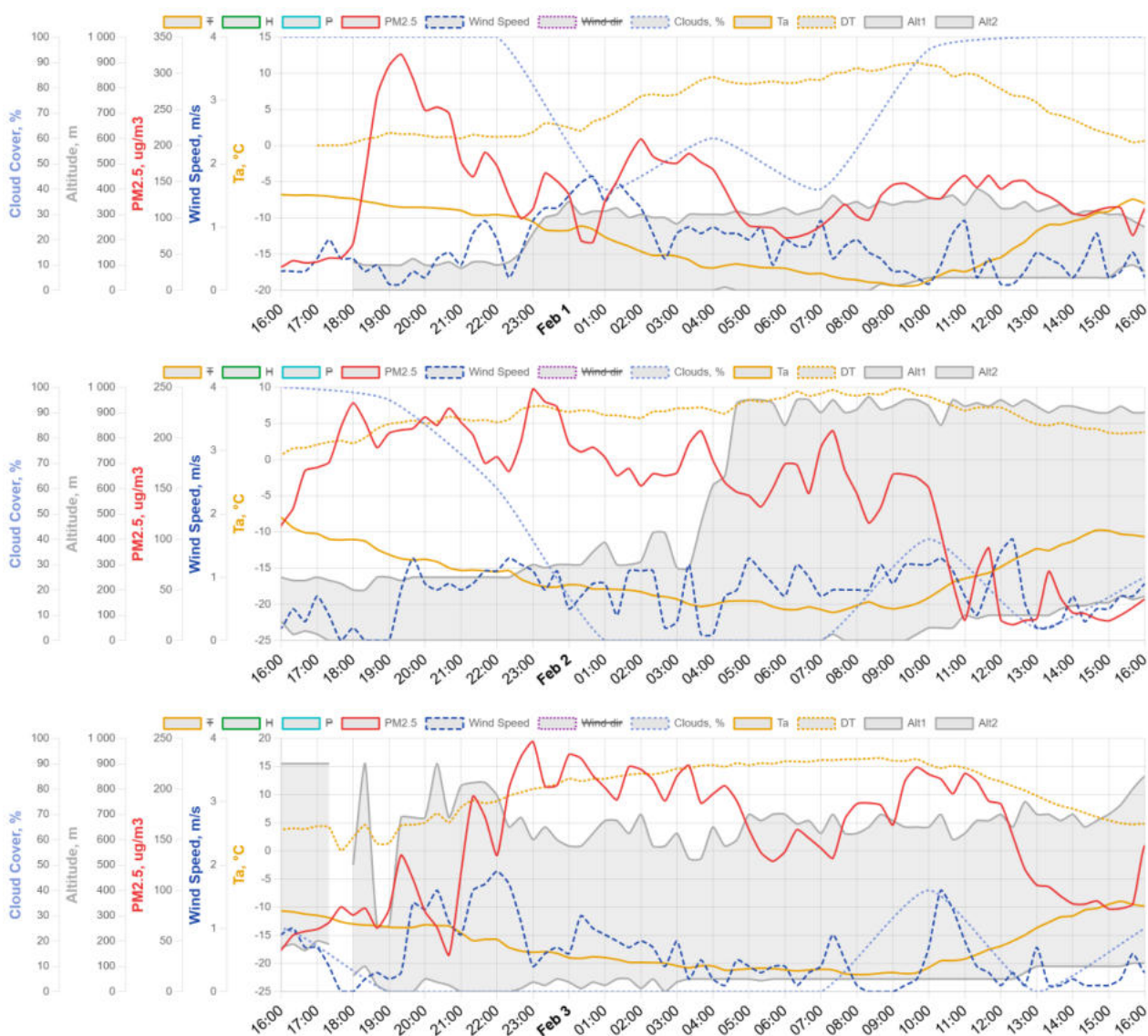


Рисунок 48 – Температура атмосферы $T_a(0, t)$ (1), интенсивность инверсии ΔT (2), границы инверсионного слоя (3), скорость ветра (4), концентрация $PM_{2.5}$ (5), общая облачность (6)

Рассмотрим характерный пример такой инверсии, которая существовала с 18:00 31 января по 16:00 3 февраля 2023 года. Согласно рисунку 48 видно, что $T_a(0, t)$ имеет квазипериодический суточный временной характер. Максимальные значения T_a в течение суток наступают около 15:00 (после полудня), минимальное значение T_a достигается около 09:00 (после восхода). Такие суточные режимы формируются при слабом ветре (менее 2 м/с) и отсутствии или малой облачности. Интенсивность, в основном приземной, инверсии ΔT имеет также квазипериодический суточный характер и изменяется в противофазе по

отношению к $T_a(0, t)$. Максимальная величина инверсии изменяется от 10 до 15°C. Мощность инверсии находится в диапазоне от 300 до 1000 м. Концентрация $PM_{2.5}$ достигает 350 $мкг/м^3$ и минимальна, соответственно, в межсуточный период.

Адвективная инверсия

На рисунке 49 представлено формирование длительной инверсии с 30 декабря 2022 по 2 января 2023, не имеющей суточного периодического характера. Рассмотрим причины её образования.

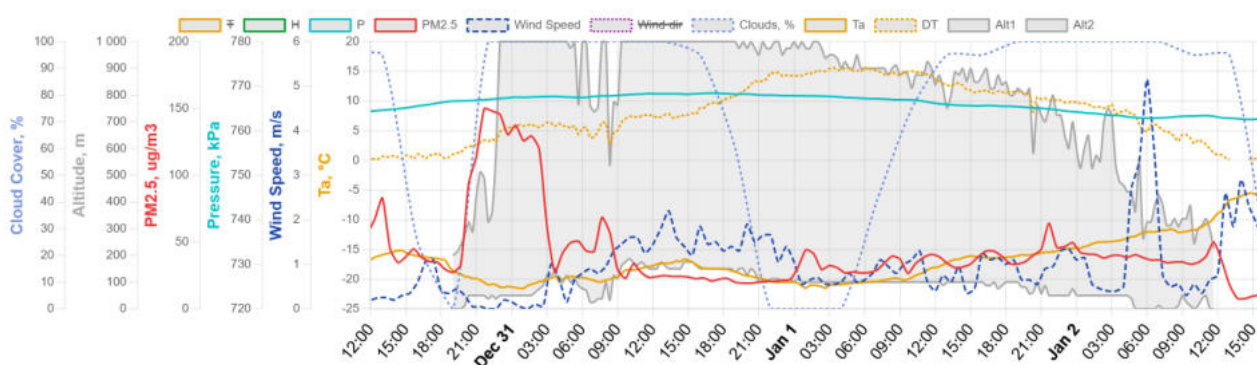


Рисунок 49 – Скорость ветра (1), температура атмосферы $T_a(0, t)$ (2), интенсивность инверсии ΔT (3), границы инверсионного слоя (4), атмосферное давление (5), концентрация $PM_{2.5}$ (6), облачность (7)

Согласно рисунку 49, главной особенностью формирования приподнятой инверсии в этот период является уменьшение скорости ветра ниже 2 м/с, многосуточные колебания $T_a(0, t)$ и повышение атмосферного давления. Такие метеоусловия: увеличения атмосферного давления, уменьшение ветра и температуры воздуха связаны с формированием антициклонов в Восточной Сибири.

На рисунке 50 представлено вертикальное распределение $T(h, t)$ за рассматриваемый период. В начальный момент времени 14:00 30 декабря вертикальное распределение $T_a(0, t)$ соответствует $\gamma \approx 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$. Видно, что до высоты 300м идет уменьшение температуры воздуха (охлаждение), а выше – идет увеличение температуры (нагревание). Механизмом формирования инверсии является адвекция: подтекание холодного воздуха на низких высотах и натекание теплого воздуха на больших высотах (рисунок 50А). Отметим, что формирование адвективной инверсии обусловлено натеканием теплого воздуха на верхние слои атмосферы описано в [13]. В нашей ситуации этот механизм также дополняется подтеканием холодного воздуха в нижние слои атмосферы.

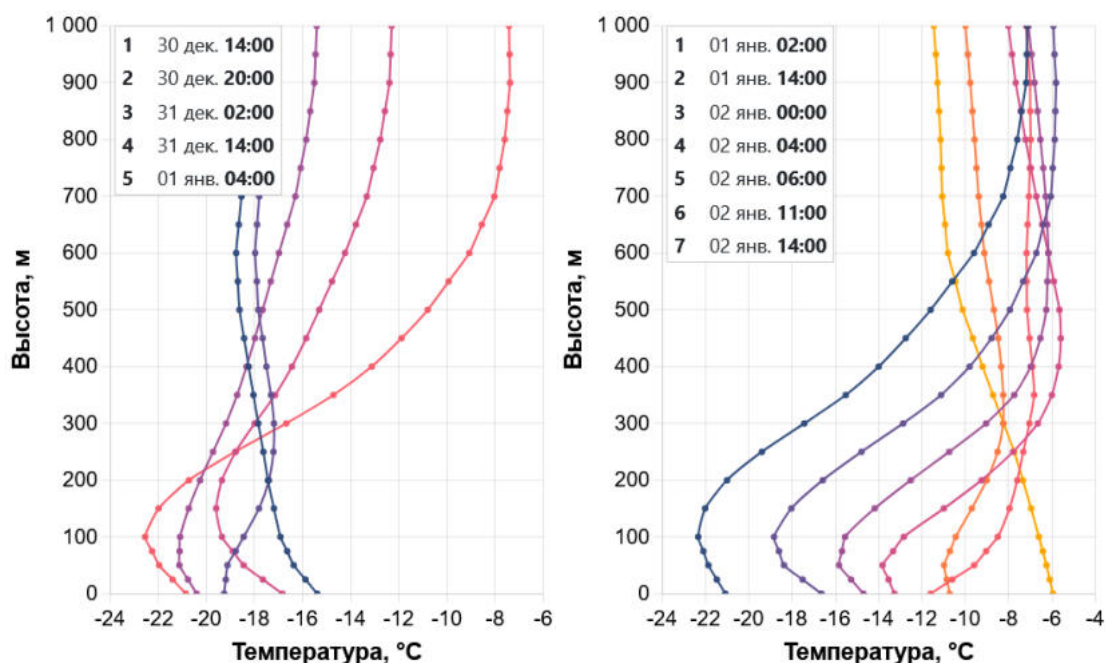


Рисунок 50 – Динамика вертикального распределения температуры воздуха 30 декабря – 2 января 2023 г. (А – рост, В – падение интенсивности инверсии)

Максимальное значение $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ достигается при минимальном значении $T_a(0, t) = -21^{\circ}\text{C}$ в 04:00 1 января 2023 г. Далее идет рост $T_a(0, t)$ и уменьшение ΔT (рис. 6Б). Это происходит при подтекании теплого воздуха в нижние слои атмосферы. При скорости ветра более 2 м/с происходит срыв инверсии (12:00 2 января). Рост $\text{PM}_{2.5}$ начинается с формирования приземной инверсии (в 19:00 30 декабря), а при переходе к приподнятой (в 20:00 2 января, с нижней границей менее 100м) инверсии концентрация $\text{PM}_{2.5}$ уменьшается и остается ниже 50 мкг/м^3 (рисунок 50).

Количественные характеристики инверсий

За зимние периоды с 2022 по 2024 гг. было зарегистрировано 87 температурных инверсий, из них 76 радиационных и 11 адвективных. Продолжительность радиационных инверсий в зимний период составило 91 сутки, адвективных – 27 суток. Отметим, что радиационная инверсия в основном является приземной, а адвективная – приподнятой.

Влияние скорости ветра на формирование инверсии

Для того, чтобы инверсионный слой сформировался над городом необходимо выполнение следующего условия: время его формирования должно быть меньше характерного времени ветрового движения атмосферы через город. Если принять размер города в 25 км (см. рисунок 45), а характерное время формирования инверсии 4 часа (с 14:00 до 18:00) (рисунок 47), получаем, что это возможно при скорости ветра менее 1.8 м/с. Отметим, что в

период инверсии скорость ветра менее 2 м/с (рис. 2, 4) и соответственно необходимое условие выполняется.

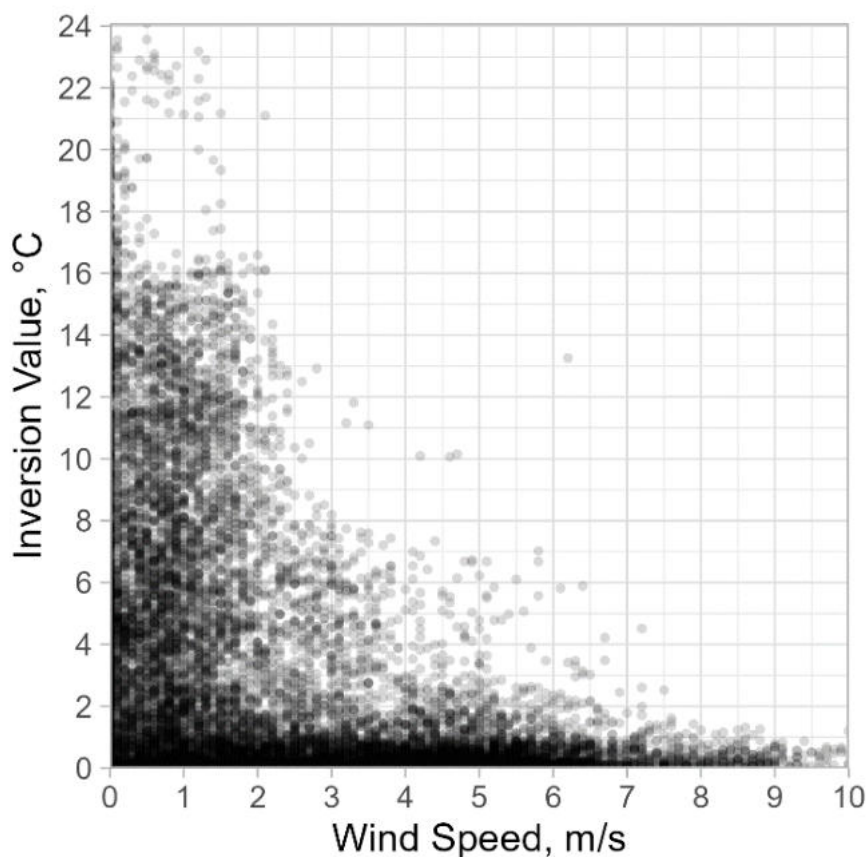


Рисунок 51 – Точечная диаграмма зависимости интенсивности инверсии от скорости ветра

На рисунке 51 видно, что интенсивность инверсии при скорости ветра менее 2 м/с может достигать значения 24°C и по мере увеличения скорости ветра интенсивность инверсии уменьшается, что связано с затруднением формирования инверсионного слоя.

Влияние температурных инверсий на загрязнение атмосферы

В данном разделе представлена зависимость концентрации $PM_{2.5}$ от категории и интенсивности инверсии в атмосфере. Использовались данные регулярных измерений, усредненные по 20 минутным интервалам.

На рисунке 52 показана вероятность реализации концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере в зависимости от высоты нижней границы инверсионного слоя. Данные представлены в виде площадной диаграммы с накоплением. Инверсии были распределены по следующим категориям: 1 – приземная и приподнятая с нижней границей до 50 м, 2 – приподнятая с нижней границей от 50 м до 100 м, 3 – приподнятая с нижней границей от 100 м до 200 м, 4 – приподнятая с нижней границей более 200 м.

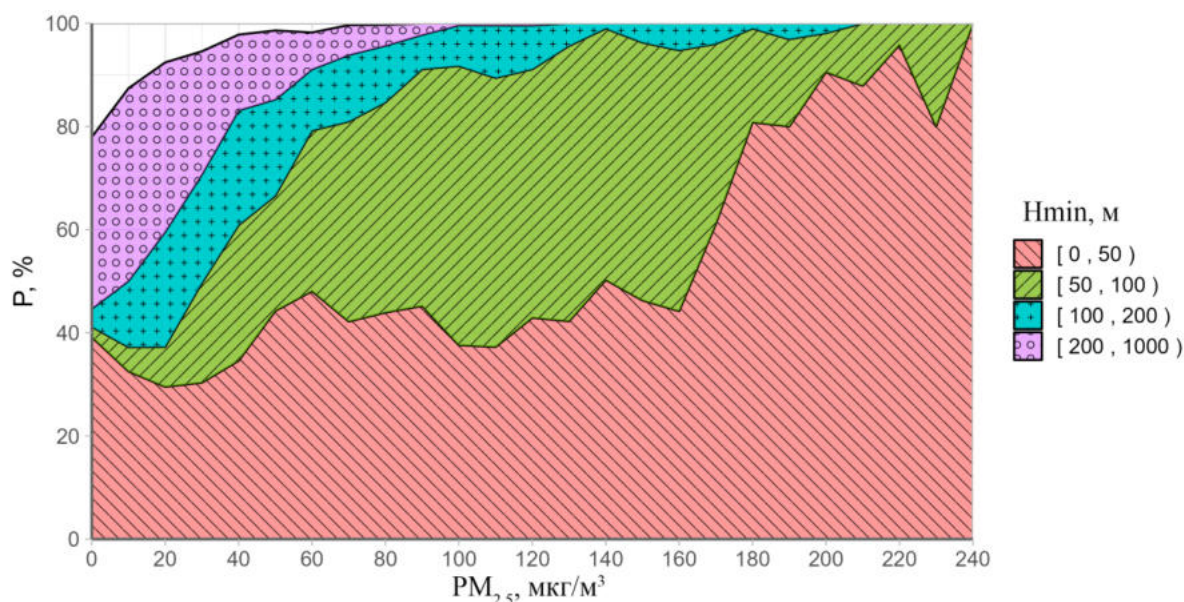


Рисунок 52 – Зависимость концентрации $PM_{2.5}$ от высоты нижней границы температурной инверсии, где H_{min} – высота нижней границы инверсии, P – вероятность реализации

Из полученных результатов следует, что, концентрации $PM_{2.5}$ на уровне предельно допустимых среднесуточных концентраций ($ПДК_{сс} = 35 \text{ мкг/м}^3$) с вероятностью 96% обусловлены инверсией. При этом вклад нижней границы инверсионного слоя будет составлять: до 50м – 32%, 50-100м – 23%, 100-200м – 22%, более 200м – 20%. Роль приподнятых температурных инверсий с нижней границей более 100 м уменьшается с увеличением концентрации частиц $PM_{2.5}$, и для концентраций более 180 мкг/м^3 определяющий вклад дает приземная инверсия и приподнятая с нижней границей до 50 м.

Вероятность концентраций $PM_{2.5}$ от интенсивности инверсии показана на рисунке 53 в виде площадной диаграммы с накоплением. Повышенные величины температурной инверсии естественно обуславливают возникновение более высоких концентраций $PM_{2.5}$ в атмосфере. Повторяемость величины инверсии на уровне концентраций $PM_{2.5}$ равных $ПДК_{сс}$: $\Delta T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$ – 23%, $1 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 3 \text{ }^\circ\text{C}$ – 23%, $3 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 5 \text{ }^\circ\text{C}$ – 13%, $5 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$ – 20%, $\Delta T \geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ – 17%. С возрастанием концентрации $PM_{2.5}$ доля инверсии с $\Delta T > 5 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивается, и при $PM_{2.5} > 120 \text{ мкг/м}^3$ становится определяющей.

Таким образом, можно сделать вывод, что определяющую роль в загрязнении атмосферы играют инверсии 1 и 2 категории, нижняя граница которых расположена от 0 до 100 м с $\Delta T > 5 \text{ }^\circ\text{C}$. При таких условиях выбросы запираются в котловине города, минимальная глубина которой около 100 м. Для инверсий с нижней границей более 100 м инверсионный купол становится выше глубины котловины города и соответственно роль рельефа уменьшается.

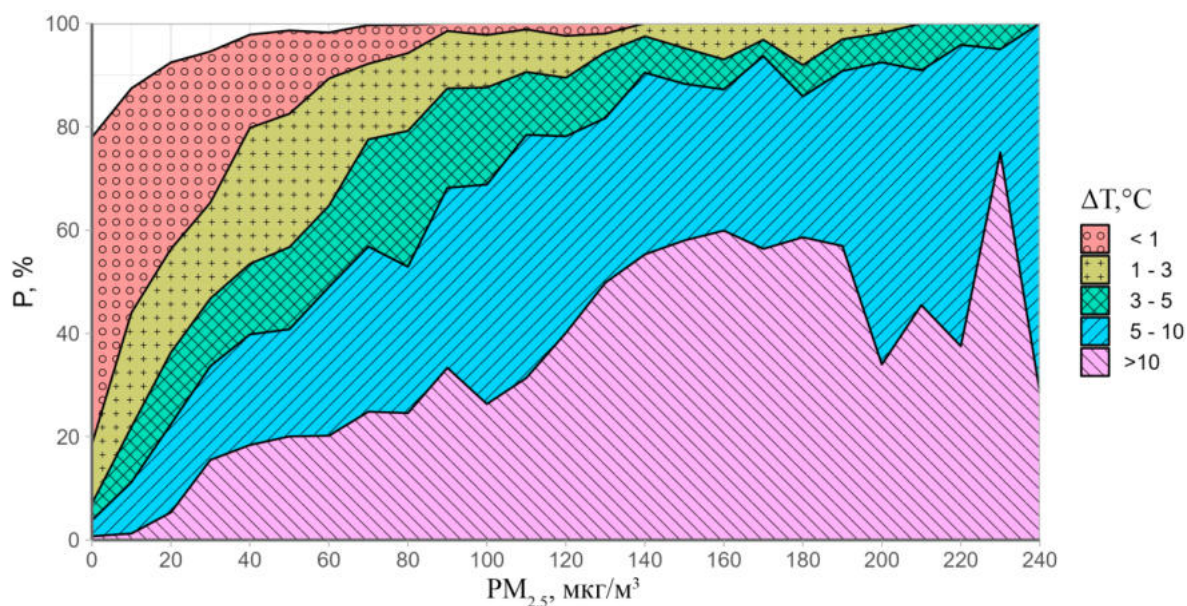


Рисунок 53 – Взаимосвязь величины температурной инверсии и концентрации $PM_{2.5}$

Выводы

В работе исследован процесс формирования температурных инверсий в атмосфере г. Красноярска в зимнее (ноябрь – февраль) время 2022-2024 гг. на основе данных, получаемых с метеостанций, постов наблюдения и профилера МТР-5. Необходимым условием формирования радиационных инверсий является наличие малооблачной погоды, а для адвективных инверсий – натекание теплого воздуха в верхние слои атмосферы, которое реализуется при антициклоне. Достаточными для формирования обоих видов инверсий являются условия, когда скорость ветра $V < 2\text{ м/с}$. Таким образом, НМУ являются слабый ветер, ясная или малооблачная погода и наличие антициклона.

В зимний период зарегистрировано 87 инверсий, из них 76 радиационных и 11 адвективных. Суммарная продолжительность радиационных инверсий в зимний период составляло 91 сутки, адвективных – 27 суток. Для радиационных инверсий в основном реализуется приземный вид, а для адвективных – приподнятый.

Временное поведение интенсивности инверсии $\Delta T(t)$ находится в противофазе к изменению температуры $T_a(0, t)$: максимум интенсивности инверсии соответствует минимальной температуре воздуха, а минимум интенсивности инверсии соответствует максимальной температуре воздуха. Максимальные значения интенсивности инверсии достигают $24\text{ }^\circ\text{C}$, а концентрации $PM_{2.5}$ – 250 мкг/м^3 . Основную роль в формировании повышенных концентраций PM принадлежит приземной и слабо приподнятой инверсии (с нижней границей менее 100 м), что связано с глубиной котловины, в которой находится г. Красноярск. При этом интенсивность инверсии должна быть более $5\text{ }^\circ\text{C}$.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Безуглая Э.Ю. Инверсии нижней тропосферы и их влияние на загрязнение воздуха Москвы // Труды ГГО. 1968. № 207. С. 202–206.
2. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.
3. Ячмёнова Н.В., Гольвей А.Ю. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестник ЧелГУ. 2011. № 5 (220).
4. Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 641–650.
5. Яушева Е.П., Гладких В.А., Камардин А.П., Шмаргунов В.П. Экстремальные аэрозольные загрязнения атмосферы в зимний период в Академгородке г. Томска. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 9(416). С. 711–717.
6. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Учёные записки РГГМУ. 2015. № 40. С. 150–159.
7. Битехтина М.А., Михайлюта С.В., Леженин А.А., Тасейко О.В. Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы в условиях города // Вестник КемГУ. 2012. Т. 2, № 4 (52). С. 12–16.
8. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Ляхов А.А. Справочное пособие «Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое атмосферы по данным профиломеров МТП-5». Москва, 2012. 61 с.
9. Gramsch E., Cáceres D., Oyola P., Reyes F., Vásquez Y., Rubio M.A., Sánchez G. Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM_{2.5} and black carbon concentration // Atmos. Environ. 2014. Т. 98. С. 290–298.
10. Liu B., Ma X., Ma Y., Li H., Jin S., Fan R., Gong W. The relationship between atmospheric boundary layer and temperature inversion layer and their aerosol capture capabilities // Atmos. Res. 2022. Т. 271. С. 106121.
11. Zhu Z., Li H., Fan S., Xu W., Fang R., Liu B., Gong W. The covariability between temperature inversions and aerosol vertical distribution over China // Atmos. Pollut. Res. 2024. Т. 15, № 1. С. 101959.
12. Prasad P., Basha G., Ratnam M.V. Is the atmospheric boundary layer altitude or the strong thermal inversions that control the vertical extent of aerosols? // Sci. Total Environ. 2022. Т. 802. С. 149758.
13. Методические рекомендации по использованию данных профиломеров МТП-5. Москва: Росгидромет, 2010. 45 с.

2.6. Сравнительный анализ вертикальных температурных профилей над урбанизированной территорией Красноярска и акваторией реки Енисей

Температурный режим приземного слоя атмосферы (ПСА) является ключевым фактором, определяющим климатические особенности и экологическое состояние любой территории [1-3]. Его пространственно-временная структура формируется в результате сложного взаимодействия радиационных, турбулентных и адвективных процессов, одним из основных драйверов которых выступает подстилающая поверхность [4]. В условиях современного города ландшафт представляет собой сложную мозаику поверхностей, чьи физические свойства радикально изменены хозяйственной деятельностью. Особый научный и практический интерес представляет изучение взаимодействия между двумя наиболее контрастными типами таких антропогенно-преобразованных сред: массивом плотной городской застройки, порождающей эффект «острова тепла», и акваторией крупной реки, чей естественный гидротермический режим фундаментально изменён техногенными факторами, такими как работа гидроэлектростанций.

Энергетический баланс городских и водных поверхностей принципиально различен [1, 4]. Урбанизированные территории, характеризующиеся низким альбедо, высокой теплоёмкостью материалов и ограниченным испарением, преобразуют поступающую радиацию преимущественно в потоки явного тепла, нагревающего приземный воздух. Водная поверхность, особенно в условиях незамерзающего русла, обладает высокой теплоёмкостью и постоянным влагозапасом, что приводит к преобладанию затрат энергии на скрытое тепло испарения и выраженному сглаживанию температурных колебаний. Таким образом, эти две системы создают конкурирующие термические воздействия на пограничный слой атмосферы.

В последние годы для количественного изучения вертикальной структуры ПСА успешно применяется метод дистанционного зондирования с помощью микроволновых температурных профиломеров МТР-5, которые обеспечивают непрерывный мониторинг температуры до высот 1000 метров [5, 6]. Данные, получаемые такими приборами, широко используются для исследования городского острова тепла, контроля атмосферной стабильности и верификации моделей. Известны работы с применением МТР-5 в Москве, Перми и Томске, посвящённые изучению острова тепла и городского пограничного слоя [7-10]. Однако существующие исследования, как правило, фокусируются либо на интегральной характеристике городской застройки, либо на сравнении «город–пригород». Принципиально важный аспект - прямое сопоставление в режиме реального времени вертикальных температурных профилей, формирующихся непосредственно над двумя конкретными, соседствующими, но физически контрастными типами антропогенных поверхностей в центре города

– до сих пор оставался методически нереализованным. В частности, полностью отсутствуют исследования, направленные на количественную оценку влияния на ПСА крупной водной артерии, гидротермический режим которой был кардинально преобразован техногенными факторами (создание незамерзающей полыньи в нижнем бьефе ГЭС) в условиях сибирской зимы.

Этот пробел в знаниях определяет научную новизну и цель настоящей работы.

Таким образом, основной целью работы является организация и проведение уникального натурного эксперимента по прямому сравнительному измерению вертикальных профилей температуры воздуха в слое 0–1000 м над двумя контрастными антропогенно-преобразованными поверхностями (плотная городская застройка и акватория реки с искусственно поддерживаемым незамерзающим режимом) в условиях крупного сибирского города в течение двух полных сезонных циклов.

Задачи исследования для достижения поставленной цели включают:

1. Разработку и реализацию схемы синхронных измерений с использованием двух идентичных профиломеров МТР-5, размещённых на одинаковой абсолютной высоте в центре города на расстоянии ~1.5 км друг от друга (урбанизированный массив и речной остров).
2. Формирование массива первичных данных непрерывных измерений с высоким временным разрешением (профили каждые 5 минут) на протяжении двух лет.
3. Расчёт и анализ основного исследуемого параметра - вертикального профиля разности температуры воздуха (ΔT) между городской и речной зонами.
4. Сравнительную оценку величин и динамики ΔT в наиболее контрастные сезоны – зимний и летний.

Реализация поставленной цели осуществлялась в границах города Красноярска, который расположен в зоне резко континентального климата. Специфика местности характеризуется комплексом неблагоприятных факторов. Это и особенности орографии: расположение в котловине способствует застою холодных воздушных масс в зимний период и аккумуляции загрязняющих веществ. Это и выраженная сезонность: наблюдается резкий контраст между холодными зимами, сопровождаемыми устойчивыми температурными инверсиями, и жарким летом. А также интенсивная антропогенная нагрузка, обусловленная концентрацией промышленных предприятий и плотным транспортным потоком.

Совокупность этих факторов формирует уникальные условия, делающие исследование температурной стратификации ключевым для понимания и прогнозирования локальных климатических аномалий.

На рисунке 54 представлена фотография Красноярска (съёмка с БПЛА), сделанная в период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Отчетливо видно, как смог

над правобережьем города и над рекой Енисей не поднимается выше 200 м над поверхностью вследствие приподнятой температурной инверсии. Дымовые шлейфы двух труб Красноярской ТЭЦ-2 и одной трубы Красноярского цементного завода (в центре фото) «развернуты» от вертикали в сторону северо-востока.



Рисунок 54 – Фотография Красноярска (съемка с БПЛА в ноябре 2022 г., высота 500 метров, ракурс на телевизионную мачту со стороны Академгородка). Данные температурной инверсии получены с помощью метеорологического температурного профилера МТР-5 номер 1 (см. рисунок 55)

Ранее было установлено, что в периоды НМУ в атмосфере над акваторией реки Енисей концентрация взвешенных частиц ($PM_{2.5}$) ниже, чем над территорией города Красноярска [11]. В этой же работе сделано предположение о влиянии подстилающих поверхностей на распределение $PM_{2.5}$ в воздушной среде. В частности, разная температура поверхности города и реки может влиять на вертикальное распределение температуры атмосферы над сушей и водной акваторией. Это предположение послужило основанием для проведения эксперимента по исследованию вертикальных температурных профилей атмосферы над речной поверхностью Енисея и урбанизированной территорией Красноярска.

Описание эксперимента

Объект исследования – атмосферный воздух над территорией города Красноярска, который является одним из крупнейших урбанизированных образований России.

Орография и климат местности. Город локализован в центральной части России, занимая территорию по обоим берегам реки Енисей, в зоне контакта Западно-Сибирской равнины, Среднесибирского плоскогорья и горной системы Саян. Его географическое положение определяется расположением в межгорной котловине, сформированной северными отрогами Восточного Саяна. Согласно климатической классификации Б.П. Алисова, климат Красноярска относится к резко континентальному типу умеренного пояса, что проявляется в значительных сезонных и суточных амплитудах температур, холодной зиме с незначительным снежным покровом и жарким летнем периоде [12]. Модифицирующее влияние на климатические условия оказывают крупные водные объекты, включая Красноярское водохранилище, а также незамерзающий участок р. Енисей. Среднемесячная температура июля составляет $+18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует наиболее теплому периоду года, тогда как в январе фиксируется минимальная средняя температура $-18,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Режим увлажнения характеризуется умеренными значениями при преобладании осадков в теплый сезон.

Расположение профиломеров. В черте города Красноярска было установлено два прибора МТР-5. Оба расположены в наиболее низких частях рельефа (рисунок 55).

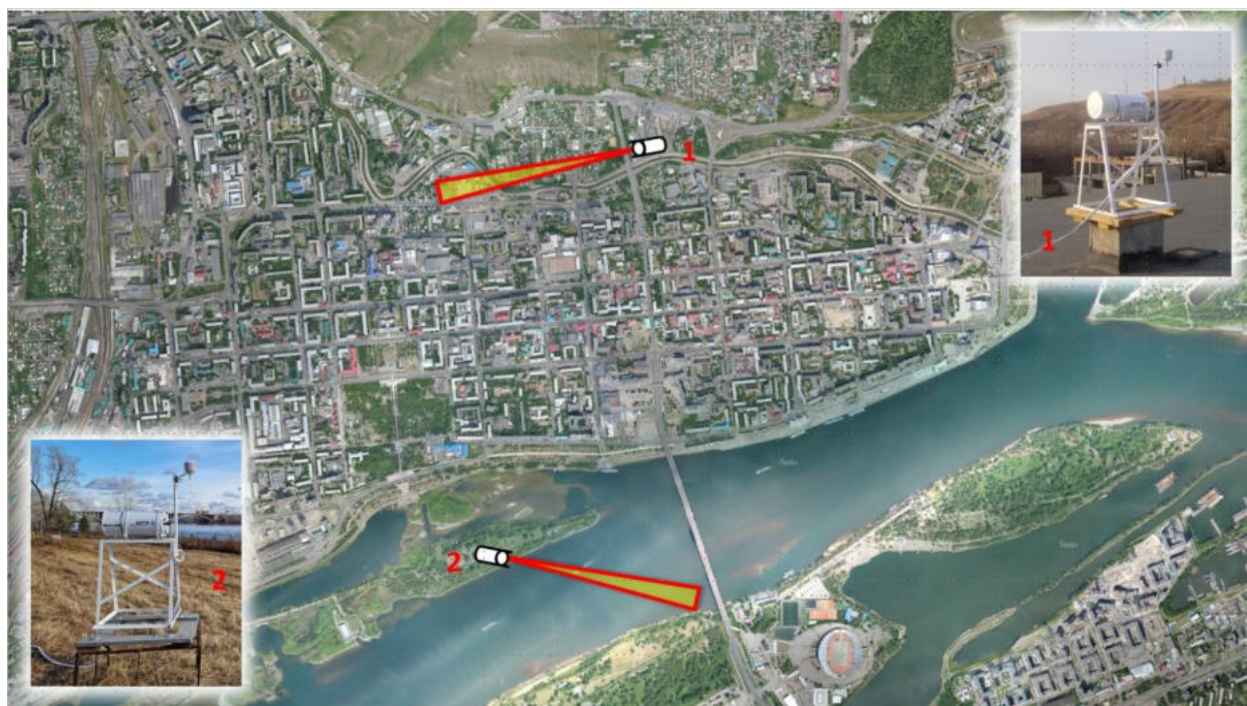


Рисунок 55 – Местоположение приборов МТР-5 в г. Красноярске и их нумерация. Остроугольный треугольник показывает направление зондирующего луча при измерении температуры на нулевом горизонте

Один из профилемеров размещен в пределах городской застройки (абсолютная высота точки установки – 135 м над уровнем моря) на крыше здания высотой 5 м. Сканирующий луч прибора ориентирован в западном направлении (W), охватывая территорию с преобладанием одноэтажной жилой застройки (частный сектор). Второй измерительный комплекс (МТР-5) установлен на металлической опоре высотой 1 м в прибрежной зоне острова Посадный. Высота его установки составляет ~135 м над уровнем моря, что соответствует высоте монтажа первого профилемера; незначительное отличие в абсолютных высотах установки приборов можно считать пренебрежимо малым, не влияющим на точность измерений. Направление сканирования прибора ориентировано по азимуту восток-юго-восток (ESE), обеспечивая прохождение измерительного луча над акваторией реки Енисей.

На рисунке 55 показаны места расположения приборов на карте города Красноярска и направление зондирующих лучей при измерении температуры на нулевом горизонте, а также фотографии приборных комплексов и способ их установки. К каждому из профилемеров присоединен ноутбук для сбора данных, которые передаются по сети Интернет в систему мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН.

Применение МТР-5 для мониторинга. Для проведения исследований был использован микроволновый температурный профилемер МТР-5, разработанный в Лаборатории дистанционного зондирования Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Прибор обеспечивает автоматизированное получение вертикальных профилей температуры в приземном слое атмосферы (0–1000 м) с погрешностью, не превышающей 0,2–0,7°C [13].

Методика измерений основана на регистрации собственного теплового излучения атмосферы в полосе поглощения молекулярного кислорода (частота 60 ГГц) с помощью высокочувствительного сканирующего СВЧ-радиометра. Измерения проводятся в многоугловом режиме, что позволяет решать обратную задачу — восстанавливать вертикальное распределение термодинамической температуры по зависимости радиояркостной температуры от угла места. Данная процедура реализована в автоматическом режиме с использованием специализированного алгоритма и программного обеспечения.

Верификация методики и аппаратурной реализации выполнена путем сравнительных натуральных экспериментов с применением эталонных средств измерений: радиозондов, привязных аэростатов и датчиков температуры, установленных на высотных метеорологических мачтах [14]. Результаты продемонстрировали высокую степень согласования данных [15].

Измерительный комплекс МТР-5 обладает практически всепогодной работоспособностью. Прерывания в работе, как правило, связаны с внешними факторами: отключением

электропитания, экстремальными метеоявлениями (гроза, гололед, сильное задымление, прохождение смерча).

Метрологическая состоятельность прибора подтверждена его включением в Государственный реестр средств измерений (№ 17795-98) на основании сертификатов Госстандарта России (№ 5539 RU.C.32.002.A) и Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (№ 30387 RU.C.32.002.A). Разрешение на эксплуатацию в сети Росгидромета (Свидетельство № P/04/0015/100/С) позволяет применять его для мониторинга окружающей среды и решения задач в области гидрометеорологии.

В условиях недостаточности информации о процессах, протекающих в нижних слоях атмосферы, многолетний опыт эксплуатации данных МТР-5 – как в оперативном режиме, так и в рамках научных исследований – демонстрирует высокую эффективность дистанционного мониторинга термического состояния приземного слоя атмосферы. Данный метод позволяет осуществлять контроль наиболее динамичной части атмосферы – пограничного слоя.

Анализ данных МТР-5 предоставляет возможность детализированного ретроспективного исследования атмосферных процессов, а также уточнения характеристик явлений, не идентифицируемых традиционными методами наблюдений, с последующим установлением их природы. Кроме того, освоение методик обработки данных МТР-5 способствует своевременному выявлению признаков изменения метеорологических условий и оценке вероятности возникновения неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) – как при краткосрочном прогнозировании (на срок до 24 часов), так и при диагностике предшествующего состояния атмосферы.

Последний аспект представляет значительную важность, сопоставимую с задачами прогнозирования, поскольку как разработка, так и верификация методов прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха требуют использования максимально достоверных данных о термической устойчивости атмосферы – ключевом факторе, определяющем процессы накопления и рассеивания загрязняющих веществ. Термическая устойчивость (статическая стабильность) атмосферы представляет собой состояние, определяемое вертикальным распределением температуры и характеризующееся сопротивлением среды развитию вертикальных движений воздушных масс.

Температурная инверсия, для которой характерен отрицательный вертикальный градиент температуры (повышение температуры с высотой), является крайней формой проявления термической устойчивости. Инверсионный слой формирует зону максимально устойчивой стратификации, играющую ключевую роль в подавлении турбулентного перемешивания и вертикального переноса. В практическом аспекте инверсионный слой функциони-

рует как эффективный барьер, препятствующий дисперсии аэрозольных и газовых примесей. Наглядно это проявляется в характере распространения продуктов горения: дымовой шлейф, достигнув нижней границы инверсии, не может преодолеть ее и вынужден рассеиваться в горизонтальном направлении. В урбанизированных территориях данное физическое явление служит прямой причиной образования интенсивного и устойчивого смога, обусловленного аккумуляцией первичных и вторичных загрязняющих веществ в приземном слое.

Результаты измерений и анализ данных

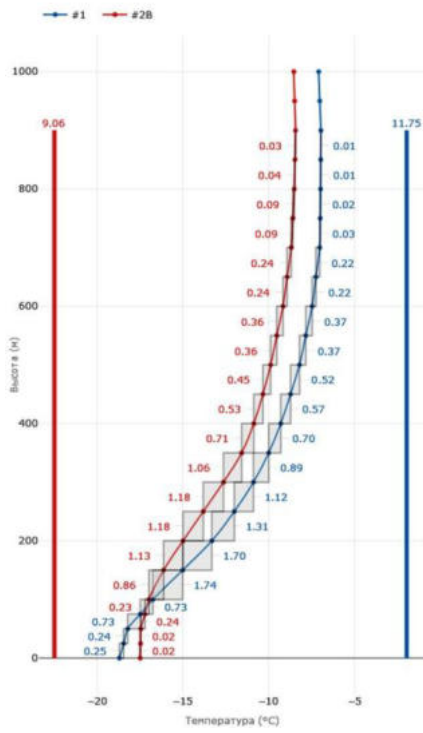
Исследования выполнялись в течение 2022-2024 годов. За это время температура приземной атмосферы изменялась от $-39,5^{\circ}\text{C}$ до $+37,2^{\circ}\text{C}$ в районе расположения профилемера № 1 и $-38,5^{\circ}\text{C}$ до $+35,7^{\circ}\text{C}$ в районе расположения профилемера № 2.

Среднесибирское УГМС (Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) ежегодно объявляло о режиме НМУ в г. Красноярске. Зимой 2022-2023 годов такие режимы были 7 раз (2 в декабре, 2 в январе, 3 в феврале); зимой 2023-2024 годов режимы НМУ были 9 раз (2 в декабре, 4 в январе, 3 в феврале); в летний период 2023 и 2024 годов режимы НМУ были по 2 раза в июне.

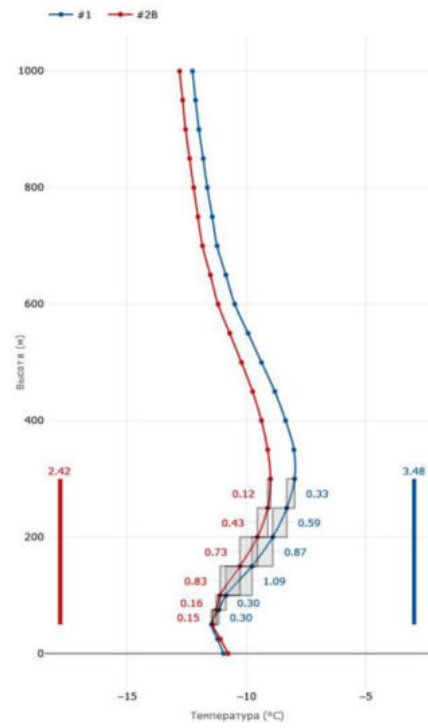
Для понимания температурной динамики в нижней части пограничного слоя ниже представлены результаты зондирования атмосферы, во-первых, зимой (рисунок 56) и летом (рисунок 57), во-вторых, в ночное (рисунки 56А, 56В, 57А, 57В) и дневное время (рисунки 56Б, 56Г, 57Б, 57Г), в третьих, в условиях объявленных НМУ (рисунки 56А, 56Б, 57А, 57Б) и без НМУ (рисунки 56В, 56Г, 57В, 57Г).

Зимнее НМУ первой степени опасности было объявлено на период с 19 часов 02 февраля 2024 г. до 07 часов 04 февраля 2024 г.; а летнее НМУ первой степени опасности было объявлено на период с 19 часов 13 июня 2024 г. до 19 часов 16 июня 2024 г. На рисунках красные линии показывают температуру над городом, а синие над рекой. Цифры над вертикальными красными и синими линиями характеризуют интенсивность инверсии в $^{\circ}\text{C}$, а цифры рядом с температурными профилями – градиент инверсии ($^{\circ}\text{C}/50\text{ м}$).

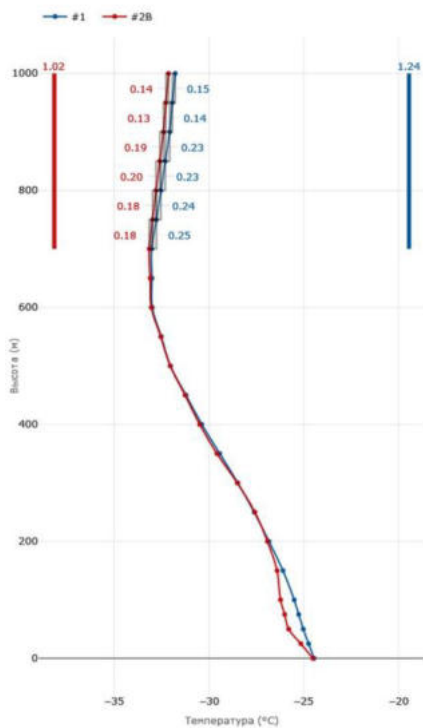
Каждый профилемер зондировал атмосферу с дискретностью в 5 минут. То есть в сутки выполнялось 288 измерений, и по ним рассчитывались почасовые, а затем и среднесуточные значения температур на высотах 0-1000 м.



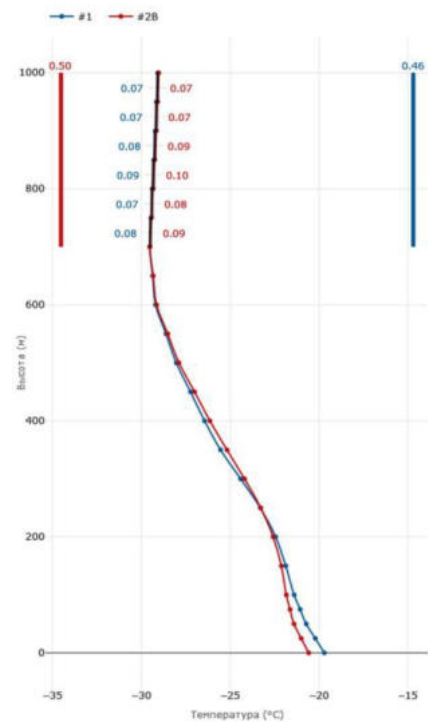
А) 2024-02-03 05:25



Б) 2024-02-03 16:25

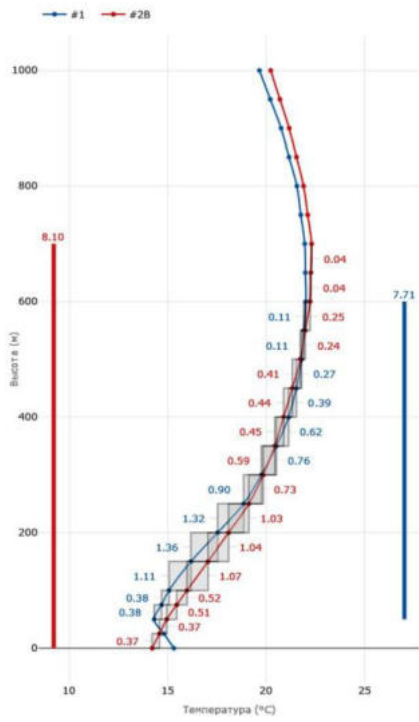


В) 2024-02-17 05:25

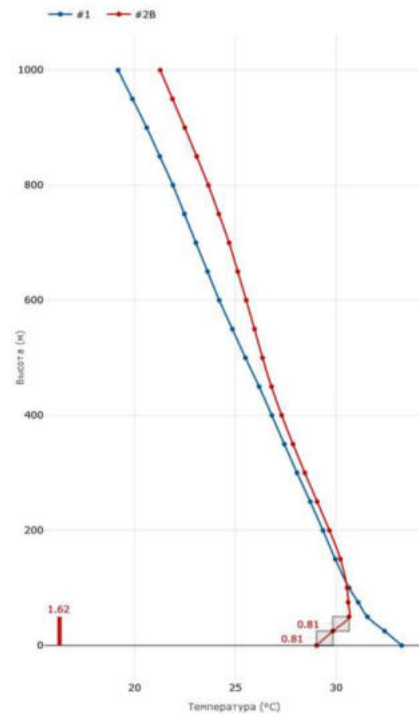


Г) 2024-02-17 16:25

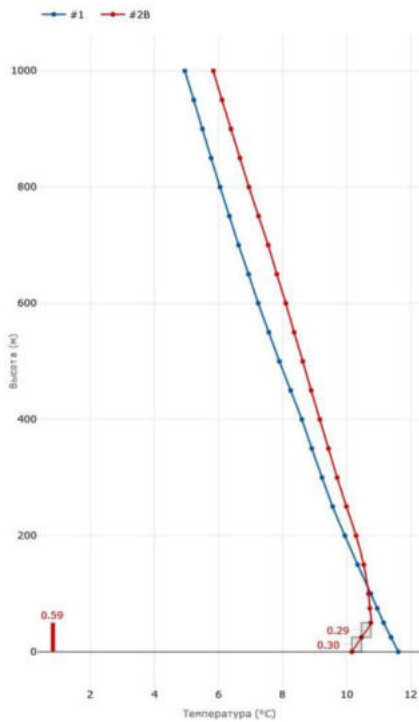
Рисунок 56 – Вертикальные профили температуры над городом (красные линии) и рекой Енисей (синие линии) утром (А, В) и вечером (Б, Г) 3 февраля 2024 г. (А, Б) и 17 февраля 2024 г. (В, Г)



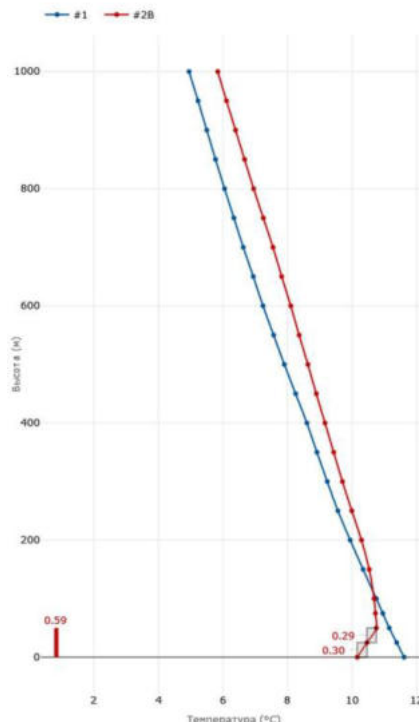
А) 2024-06-14 05:25



Б) 2024-06-14 16:25



В) 2024-06-07 05:25



Г) 2024-06-07 16:25

Рисунок 57 – Вертикальные профили температуры над городом (красные линии) и рекой Енисей (синие линии) утром (А, В) и вечером (Б, Г) 14 июня 2024 г. (А, Б) и 7 июня 2024 г. (В, Г)

Анализ базируется на статистической обработке массива данных, полученных в ходе непрерывного мониторинга за трёхлетний период. Доля пропущенных значений в почасовых измерениях не превышает 8%, что соответствует допустимому уровню для климатологических исследований. В качестве анализируемого параметра рассматривалась разница температур ($\Delta T = T_{\text{над_сушей}} - T_{\text{над_рекой}}$), где: $T_{\text{над_сушей}}$ – значения температуры, полученные с помощью профилемера 1; $T_{\text{над_рекой}}$ – значения температуры, полученные с помощью профилемера 2. Вычислялись разности среднемесячных значений на высотах от 0 до 100 м с шагом 25 м и от 100 до 1000 м с шагом 50 м.

На рисунках 58, 59 представлены диаграммы «boxplot» среднемесячных значений ΔT в зимний и летний периоды. Внутри прямоугольников, показанных на диаграммах, вертикальная черточка показывает значение медианы, а местоположение треугольника соответствует среднеарифметическому значению температуры.

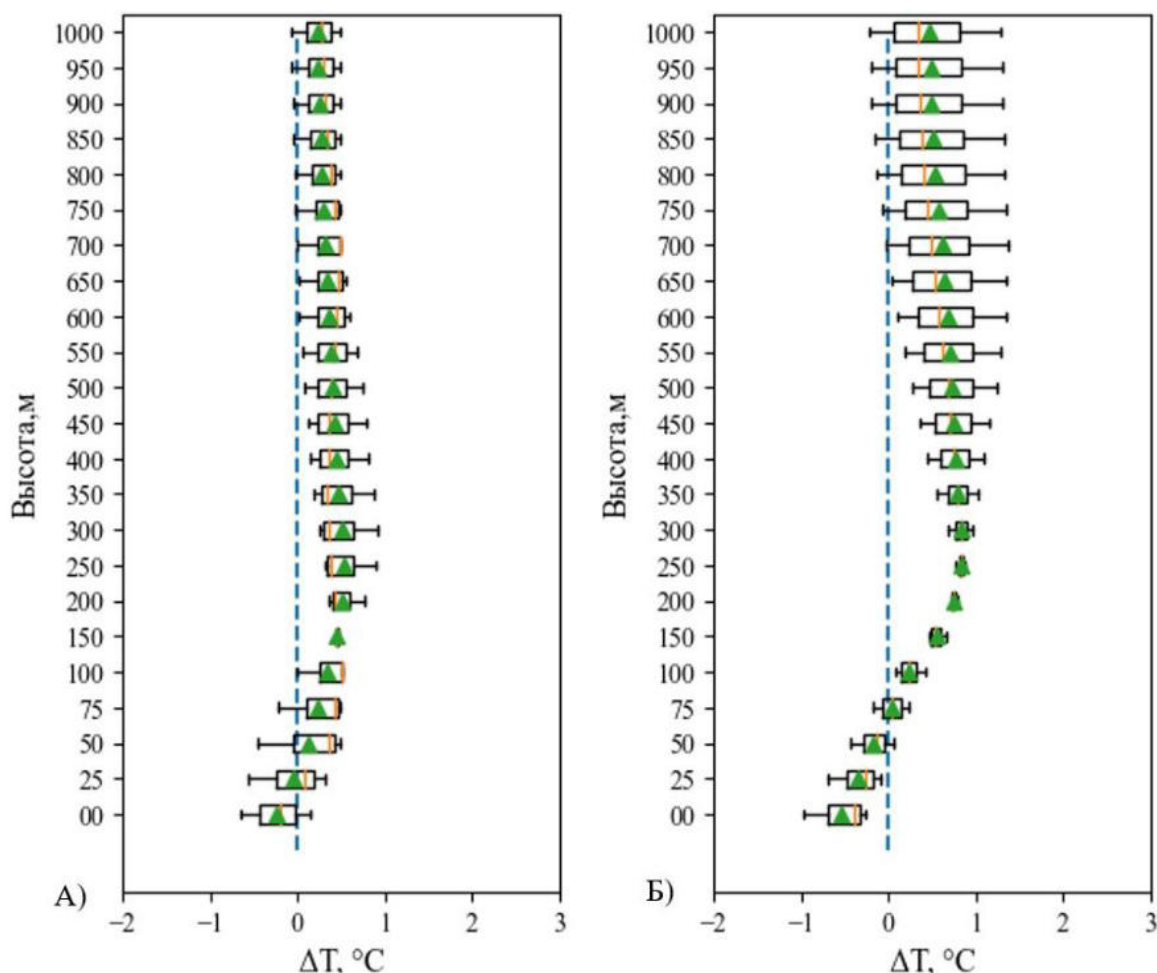


Рисунок 58 – Зимняя разница температур в зависимости от высоты: А) зима 2022-2023 гг., Б) зима 2023-2024 гг

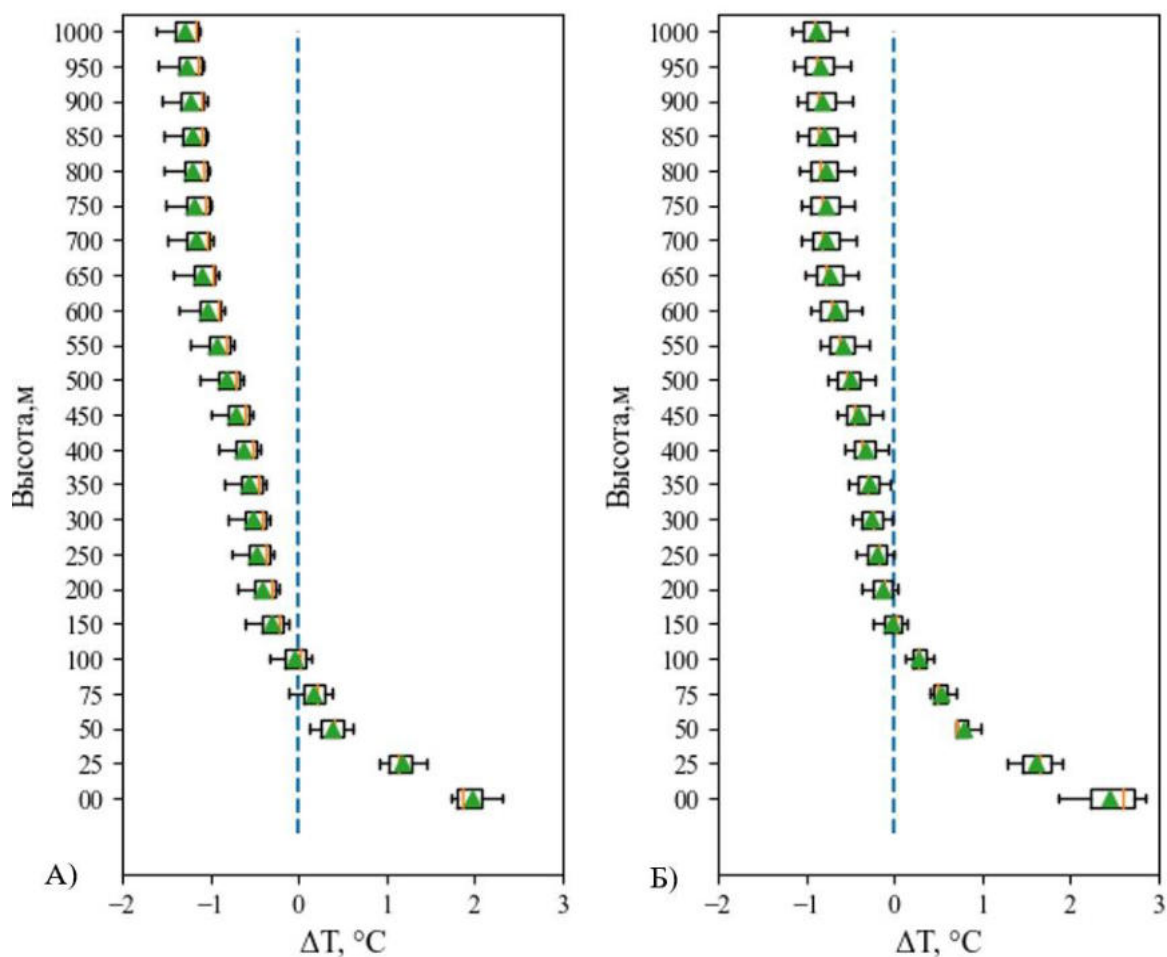


Рисунок 59 – Летняя разница температур в зависимости от высоты: А) 2023 г., Б) 2024 г

Зимой 2022-2023 годов величина ΔT на высоте 0 м статистически достоверно была ниже нуля градусов, а на высотах 50-1000 м – выше нуля градусов (рисунок 58А).

Несколько иная ситуация наблюдалась зимой 2023-2024 годов. Величина ΔT на высотах 0-50 м статистически достоверно была ниже нуля градусов, а на высотах 100-1000 м – выше нуля градусов (рисунок 58Б).

Зимние наблюдения показали, что величина ΔT была не больше $+1^{\circ}\text{C}$ на высотах 100-1000 м, а в приземной атмосфере не больше $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Противоположная зависимость ΔT от высоты наблюдалась летом (рисунок 59). В летний период 2023 года величина ΔT на высотах 0-75 м статистически достоверно была выше нуля градусов, а на высотах 150-1000 м – ниже нуля градусов (рисунок 59А). Летом 2024 года величина ΔT на высотах 0-100 м статистически достоверно была выше нуля градусов, а на высотах 200-1000 м – ниже нуля градусов (рисунок 59Б).

Летние наблюдения показали, что величина ΔT была больше $-1,5^{\circ}\text{C}$ на высотах 200-1000 м, а в приземной атмосфере достигала $+2,5^{\circ}\text{C}$.

Общим свойством зависимостей ΔT от высоты, показанных на рисунках 5 и 6, является то, что параметр ΔT во всех случаях меняет знак (– и +) на высотах до 200 м. Это, вероятно, свидетельствует о том, что два фактора оказывают влияние на вертикальное распределение температуры над речной поверхностью Енисея и урбанизированной территорией Красноярска.

Рассмотрим вероятные факторы, влияющие на температурную стратификацию.

В приземной атмосфере разница температур над речной поверхностью Енисея и урбанизированной территорией Красноярска, возможно, определяется различным радиационным балансом земной и речной поверхности. Разница температур на высотах 200-1000 м может быть обусловлена разной скоростью ветра над открытым пространством, коим является русло одной из крупнейших рек России, и над урбанизированной территорией города с множеством высотных зданий [17]. О наличии ветра на высоте более 200 м (даже в период НМУ) свидетельствует направление шлейфа дыма из труб предприятий (рисунок 54).

Выводы

С помощью температурных профилемеров МТР-5 проведены экспериментальные исследования вертикальных температурных профилей атмосферы над урбанизированной территорией г. Красноярска и островной частью р. Енисей. Полученные данные позволили впервые количественно оценить влияние характера подстилающей поверхности на термическую структуру приземного слоя атмосферы города в интервале высот до 1000 метров.

Проведенный анализ демонстрирует наличие выраженной сезонной динамики в вертикальной стратификации разности температур (ΔT) между городской средой и речной акваторией. Ключевой закономерностью является инверсия знака величины ΔT на рубеже приблизительно 200 метров над поверхностью, наблюдаемая вне зависимости от сезона. В частности, в приземном слое атмосферы фиксируются отрицательные значения ΔT в зимний период и положительные – в летний, тогда как в вышележащем слое (200–1000 м) сезонный режим приобретает обратный характер: летом значения становятся отрицательными, а зимой – положительными. В дальнейшем планируется провести детальный анализ физических механизмов, включая количественную оценку влияния радиационного баланса и скорости ветра, а также роли разности температур вода-суша и конвективного теплообмена в приземном слое.

Ожидается, что результаты работы заложат фундаментальную эмпирическую основу для будущих исследований взаимодействия сложных антропогенных систем, верификации климатических моделей и разработки научно обоснованных мер адаптации городской среды.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Oke, T.R., G. Mills, A. Christen, J.A. Voogt, 2017: Urban Climates. – Cambridge University Press, Cambridge, 525 pp.
2. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. Академии наук. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
3. Ячмёнева Н.В., Гольвей А.Ю. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестник Челябинского государственного университета. 2011. № 5 (220). С. 84-89.
4. Grimmond C.S.B. et al. (2010). The international urban energy balance models comparison project: First results from Phase 1. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49, 1268–1292, DOI: 10.1175/2010JAMC2354.1.
5. Юшков В.П. Что может измерять температурный профилемер // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 76–88.
6. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТР-5 // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 10. С. 877-883.
7. Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е. О высотной протяженности городского "острова тепла" над Москвой // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 213.
8. Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. Остров тепла московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. 2017. № 4. С. 12–19.
9. Шкляев В.А., Шкляева Л.С. Исследование инверсий нижней атмосферы по результатам наблюдений метеорологического температурного профилемера и радиозондирования // Географический вестник. 2014. № 4 (31). С. 62-66.
10. Камардин А. П., Гладких В. А., Невзорова И. В., Одинцов С. Л. Статистика инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском . // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 09. С. 742–753. DOI: 10.15372/AOO20230906.
11. Заворуев В.В., Соколова О.В., Заворуева Е.Н., Якубайлик О.Э. Концентрация PM2.5 в приземной атмосфере над территорией г. Красноярска и акваторией незамерзающего участка реки Енисей // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 6 (413). С. 462-468.
12. Алисов Б. П. Климат СССР. – М.: Издательство МГУ, 1956. – 127 с.

13. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя - метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 697-704.
14. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin S. A. Remote Sensing of Boundary-Layer Temperature Profiles by a Scanning 5-Mm Microwave Radiometer and RASS: A Comparison Experiment // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16, 7, pp. 805-818.
15. Kadygrov E.N., Shur G.N., Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // Radio Science. 2003, 38 (3), 8048.

Основные публикации по разделу:

1. Якубайлик Т.В., Заворуев В.В., Якубайлик О.Э. Особенности распределения температурных профилей в нижнем 1000-метровом слое атмосферы в центральной части города Красноярска // В книге: Енисейская теплофизика. Тезисы докладов Всероссийского форума. В рамках форума: XIV Семинар вузов по теплофизике и энергетике. Школа молодых ученых «Физические основы современных нефтегазовых технологий» . Красноярск, 2025. С. 244-245.
2. Yakubailik O.E., Zavoruev V.V., Iakubailik T.V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. V. 70. No. 12. DOI 10.1134/S1063784225700549

2.7. Прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами PM_{2.5} с использованием моделей машинного обучения

В современном мире загрязнение атмосферного воздуха промышленных городов является одной из наиболее острых экологических и социально-экономических проблем. Особую тревогу вызывает загрязнение воздуха твердыми взвешенными частицами PM_{2.5} ($d \leq 2,5$ мкм), которые способны проникать глубоко в легкие и кровеносную систему, оказывая негативное влияние на здоровье населения.

Существующие системы мониторинга не обеспечивают прогнозирования уровня загрязнения, что делает актуальным разработку точных моделей для заблаговременного предупреждения населения и принятия управленческих решений. Прогнозирование уровня концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} рассматривается на примере крупного промышленного города – Красноярска, административного центра Красноярского края. Спецификой

метеорологических условий в городе являются температурные инверсии, создающие устойчивые загрязненные слои в приземном слое атмосферы в зимний период.

Современные подходы к прогнозированию качества воздуха включают регрессионные модели, методы анализа временных рядов (ARIMA, ARIMAX), ансамблевые алгоритмы и глубокое обучение [1]. Среди них модели на основе долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) демонстрируют наиболее высокую эффективность благодаря способности улавливать сложные временные зависимости.

В работе проведено сравнение эффективности различных моделей машинного обучения для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в г. Красноярске. Для построения моделей использованы данные наземных станций «Системы мониторинга воздуха КНЦ СО РАН» и метеоданные модели NCEP GFS за период 2019–2024 гг. Выбраны станции, фиксирующие наиболее высокие концентрации $PM_{2.5}$: Николаевка, Овинный, Песчанка, Телевизорная, Ветлужанка, Солонцы. Данные агрегированы в почасовые и суточные значения.

В качестве базовой архитектуры была выбрана нейросетевая модель долгой краткосрочной памяти, состоящая из последовательности блоков с механизмами управления состоянием через вентили забывания, входа и выхода [5]. Прогноз строился для почасовых значений с последующей агрегацией в суточные.

Для сравнения точности прогноза использованы следующие модели машинного обучения: модели множественной регрессии, в том числе, регрессии главных компонент, модели временных рядов: ARIMA и ARIMAX (с метеопараметрами в качестве экзогенных переменных), ансамблевые модели: случайный лес, градиентный бустинг на бинарных деревьях и регрессиях [2, 3]. Оценка качества проводилась по метрикам: средняя квадратичная ошибка (MSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2).

Для учета метеорологических особенностей на основе многофакторного дисперсионного анализа реализовано сезонное разделение данных [4]:

- Зимний период (ноябрь–февраль).
- Весенний период (март–апрель).
- Летний период (май–июль).
- Осенний период (август–октябрь).

LSTM-модель с сезонным разделением продемонстрировала улучшение точности на 30-40% по сравнению с обучением на полном наборе данных (таблица 7).

Таблица 7 – Сравнение MSE для разных стратегий обучения LSTM

Сезон	MSE (скользящее окно)	MSE (сезонная модель)
Зима	366,82	247,87
Весна	103,12	64,27
Лето	35,35	35,07
Осень	29,89	29,64

Проведенное сравнение точности прогноза $PM_{2.5}$ между различными моделями машинного обучения показало, что модель глубокого обучения LSTM значительно превосходит по точности регрессионные, ARIMA/ARIMAX, ансамблевые и бустинговые модели, демонстрируя значения $MAE \leq 1,63$ $\mu\text{г}/\text{м}^3$ и $R^2 \leq 0,80$.

Наилучшие результаты достигнуты при добавлении в признаки метеопараметров, что особенно актуально для города с неблагоприятными метеорологическими условиями. Для примера ниже приведены графики почасового (рисунок 60) и среднесуточного (рисунок 61) прогноза величины концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ на трое суток вперед для зимнего периода.

Разработанная нейросетевая модель прогноза реализована в виде программного комплекса [9], который внедряется в систему экологического мониторинга г. Красноярска и может быть применен для прогноза загрязнения атмосферного воздуха в других промышленных городах.

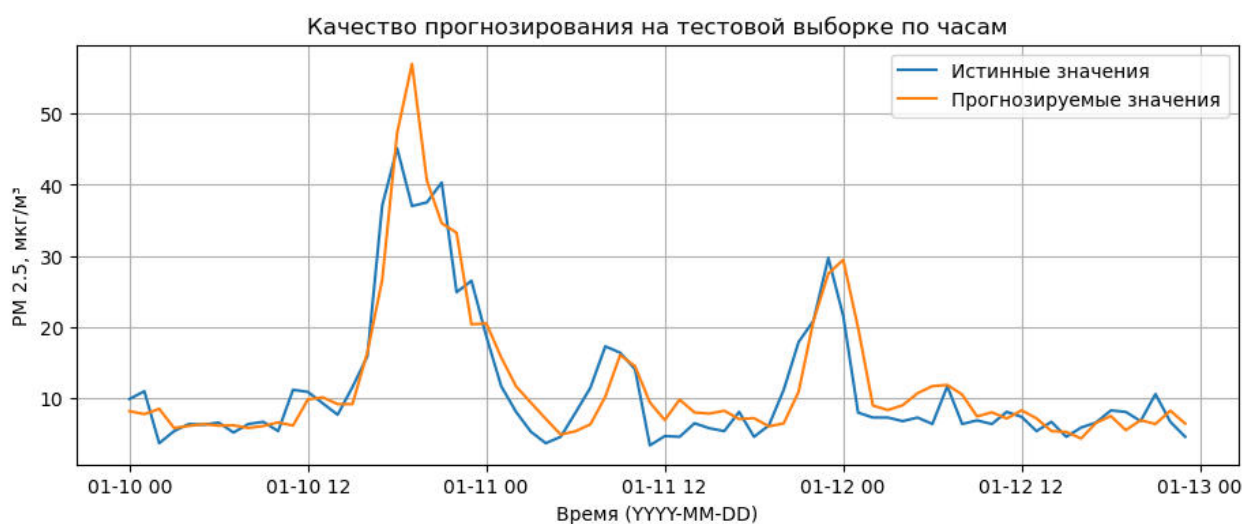


Рисунок 60 – Почасовой прогноз величины концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ с 11 по 13 января 2024 г. Оценка точности прогноза: $MAE = 2,92$; $R^2 = 0,79$

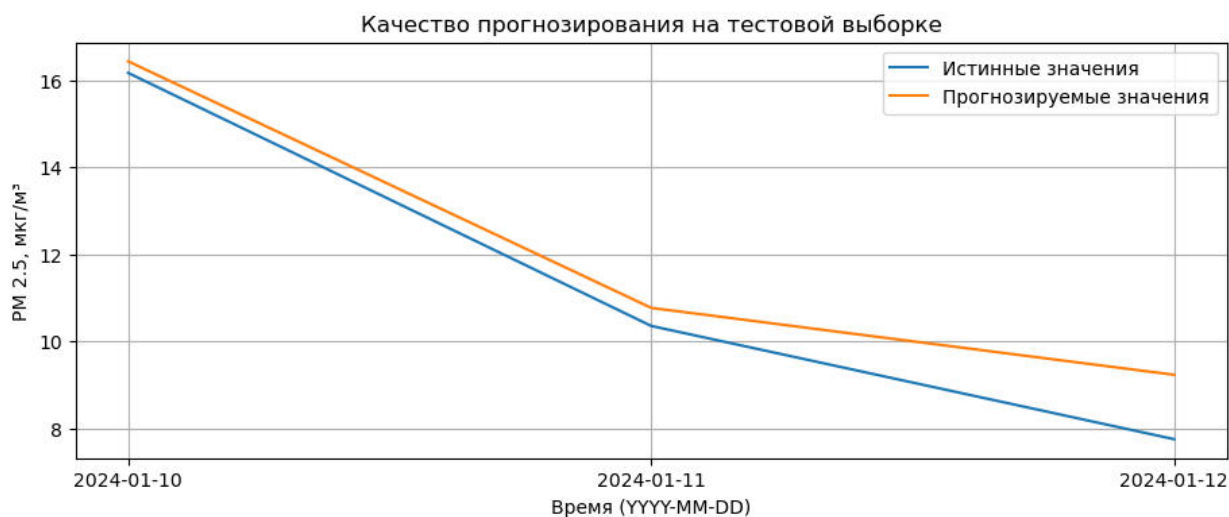


Рисунок 61 – Среднесуточный прогноз величины концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ с 11 по 13 января 2024 г. Оценка точности прогноза: $MAE = 0,72$; $R^2 = 0,93$

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Liu H. Intelligent modeling strategies for forecasting air quality time series: A review // Applied Soft Computing Journal. 2021. Vol. 102. P. 106957.
2. Володько О. С., Буряк Н. А., Полянчикова Д. В., Дергунов А. В. Модели регрессии для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха города Красноярска // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов. 2023. P. 226-230.
3. Володько О.С., Лев Н.А., Полянчикова Д.В. Прогнозирование величины концентрации загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска с помощью моделей машинного обучения // Материалы XI Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», Красноярск: СФУ, 2024. С. 352–356.
4. Volodko O., Yakubailik O., Lapo T., Dergunov A. Influences of meteorological conditions in $PM_{2.5}$ levels in Krasnoyarsk city atmosphere // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 392. P. 02022.

Основные публикации по разделу:

1. Володько О. С., Лев Н. А. Программный комплекс для прогнозирования величины концентрации $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе г. Красноярска на основе нейросетевой модели временных рядов LSTM (свидетельство № 2025682974) / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2025.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕРВИСОВ

3.1. Разработка технологий мониторинга сложных систем и управления безопасностью территорий

С целью обоснования ключевых направлений информационной поддержки управления при организации взаимодействия сформулированы ограничения использования систем интеллектуальной поддержки принятия решений (СППР), идентифицированы типовые ошибки управления. Это позволило уточнить направления практической реализации исследований.

Успешная автоматизация безопасности функционирования технических систем связана с практически полной алгоритмизацией процессов, минимумом стохастических и непредвиденных факторов. Напротив, все этапы управления безопасностью территорий связаны с неопределённостью, определяющей ролью человеческого фактора, трудно поддающегося формализации. На основании требований нормативных документов, мнений экспертов разного уровня определены границы области применения СППР:

- *сложность методов обработки данных.* Используемый математический аппарат должен быть понятен лицам, принимающим решения (ЛПР);
- *достаточность исходных показателей.* Добавление новых (не учтённых ранее в расчётах) не должно приводить к существенному изменению результатов;
- *значимость показателей.* Однозначно сопоставить мероприятия M_j можно не пустому подмножеству показателей P_i . Для отдельных задач управления $P_i > M_j$;
- *результаты оценки ситуации.* Свёртка исходных данных в значение должна быть не менее информативна для ЛПР [1];
- *уровень информационной поддержки.* Использование интеллектуальной системы должно быть направлено на минимизацию ошибок управления, а не дублирование объёма знаний, необходимого для выполнения должностных обязанностей;
- *сложность/масштаб ситуации/проблемы.* Нижняя граница применения СППР – тривиальные решения с минимумом неопределённостей; верхняя – уникальные ситуации с минимумом типовых признаков [2].

Под интеллектуальной поддержкой принятия решений понимается процесс предоставления пользователю данных ограниченного объёма для минимизации неопределённостей и дополнение знаний, необходимых для эффективного управления конкретной ситуацией.

Поскольку программы проведения превентивных мероприятий уникальны для каждой территории и периода, возникают сложности применения типовых схем алгоритмов. Анализа решений по управлению в кризисных ситуациях выявил характерные ошибки управления:

- неверная оценка значимости факторов, определяющих результат управления;
- неверная оценка состава исполнителей решений (сил реагирования);
- неверная оценка требуемых материальных ресурсов;
- ошибочное планирование сроков выполнения решений;
- ошибочное планирование объёма выполнения работ, приводящее к перерасходу ресурсов, увеличение объёма выполнения смежных процессов;
- неверная последовательность выполнения процессов;
- необоснованная замена процесса на менее эффективный.

Перечисленные проблемы предлагается решать путём использования сценарного моделирования, разработанных и согласованных планов действий [1]. Их основой являются качественные данные с обоснованной степенью детализации, достоверность которых не вызывает сомнения у ЛПР [3]. Варианты решения должны представляться в удобном для ЛПР виде (инфографика, динамические карты, короткие тексты) [4]. Например, имеющейся перечень процессов необходимо ранжировать по критериям: место проведения; объём; оптимальная последовательность, а затем описать ожидаемый результат. При этом корректно сопоставить детерминированные показатели (финансовые средства) и вероятностные (число событий, ущерб, потери).

Модель организации взаимодействия для управления безопасностью территорий представлена в виде матрицы акторов, в которой строки описывают уровни иерархии управления (от объектового до федерального), а столбцы – взаимодействующие ведомства. Количество и состав элементов матрицы определяется видом и масштабом ситуации, требующей решения. Построены матрицы взаимодействия для каждого из базовых рисков, характерных для территорий Сибири.

Информационные ресурсы в модели организации взаимодействия представлены в двух видах – централизованном и облачном. В первом случае назначается элемент, ответственный за поддержание консистентности данных. Технология апробирована в Территориальном центре мониторинга и прогнозирования ЧС Красноярского края. Сейчас подход применяется в Координационном центре Правительства Красноярского края. Подготовлены предложения по разворачиванию централизованного хранилища данных федерального уровня на платформе ГосТех.

Облачная модель предусматривает использования методов федерализации данных – гарантированных доступ и частичная обработка без копирования [5]. На основе данных о бытовых и техногенных пожарах в Российской Федерации построены аналитические модели для решения нескольких задач управления пожарной безопасностью.

Поддержка управления включает применение знаний в форме семантических сетей и продукций. В отличие от нейронной сети компактность словаря понятий и массива правил минимизирует число неверных решений. Показано, что применимость машинных решений зависит от двух факторов: полноты базы знаний, определяющей паттерны управления в разных ситуациях и зрелости данных, формирующих решения для конкретной задачи. Для формирования и верификации знаний, фиксирования мнений разных экспертов также необходимы качественные данные.

На основе [2] разработаны новые методы управления данными, включая разработку, выполнение и контроль политик, программ и практик предоставления, проверки, защиты и повышения ценности данных и информационных активов на протяжении всего их жизненного цикла. Это позволило выявить и обеспечить информационные потребности пользователей в рамках модели организации взаимодействия. На основе анализа бизнес-процессов формирования решений определены информационные потребности акторов управления для каждого вида базовых рисков Сибири.

Разработаны паттерны структуры информационных ресурсов и процессов их жизненного цикла. Процессы поступления и преобразования данных разделены группы: получение данных, работа с массивами данных и трансформация содержимого данных. Предложены принципы межсистемного взаимодействия и проект нормативного документа, регулирующего межведомственный информационный обмен. Описаны процессы распространения данных, требования к информационным шлюзам и содержанию метаданных. Спроектированы и реализованы инструменты формирования данных в озере с использованием технологий консолидации. Апробирована федерализация данных – доступ к удалённым ресурсам для проведения вычислений без копирования исходной информации [5]. Усовершенствован сервис распределённого сбора данных в облачное хранилище с автоматическим обновлением аналитических моделей.

Обоснованы способы хранения данных в зависимости от видов задач и условий принятия управленческих решений. Показана необходимость использования системообразующих данные единых на федеральном уровне. Если для обработки мониторинговой информации наиболее удобны хранилища данных, то автономность управления в Арктической зоне требует использования локальных баз данных и сервисов перемещения данных – оперативной синхронизации.

Множество источников данных комплексного мониторинга, разнообразие получаемых данных обуславливают актуальность совершенствования методов предобработки. Для верификации разработаны критерии фильтрации ложных сигналов. Улучшение предполагает заполнение пробелов временных рядов, изменение форматов полей (даты, географические координаты, единицы изменения и др.).

Показан синергетический эффект связывания данных. Это обязательный подпроцесс пространственного анализа и оценки рисков. Определены сферы применения сертификации данных. Закрепление статуса государственных информационных ресурсов для результатов, полученных с помощью аналитического и ситуационного моделирования по утверждённым методикам будет способствовать повышению качества согласования решений. Предложено включать в земельный кадастр и генеральные планы территорий результаты ранжирования территории по рискам (затопление, сейсмическая опасность и др.).

Разработаны критерии оценки зрелости данных. Уровень зрелости коррелирует с эффективностью решений. Реализация описанных процессов позволяет системно подойти к формированию информационного пространства в виде упорядоченных наборов данных, пригодный для машинной поддержки управления.

Выполнен анализ применимости паттернов для каждого вида ситуаций и задачи управления. Например, характеристики безопасности территорий формируются в основном путём распределённого сбора данных. Данные о населении и застройке целесообразно формировать посредством консолидации. Межсистемный обмен с Росстатом и Росреестром позволяет использовать сертифицированные данные. Обработка результаты оперативного комплексного мониторинга, с достаточным уровнем зрелости, должна включать процесс федерализации данных.

Ещё один паттерн определяется моделью знаний и применяется для формализации этапов решения конкретной задачи управления. Вербальные формулировки управляющих действий содержатся в решениях комиссий по чрезвычайным ситуациям и пожарной безопасности, приказах и распоряжениях разных ведомств и уровней территориального управления. «Классическая» обработка массива текстов большими языковыми моделями с целью поиска решений на конкретный набор параметров ситуации не целесообразна по ряду причин. Это отсутствие русскоязычного корпуса текстов по управлению безопасностью территорий достаточного объёма, дополнительные затраты на верификацию качественных решений в обучающей выборке, жёсткие требования к достоверности получаемых машинных решений.

Паттерн представляет собой онтологию, описывающую в виде правил отношения между концептами – переменными словаря экспертной системы. Ситуации представляются

в графическом виде, отражающим последовательность, условия выполнения и характеристики процессов. Это упрощает самый проблемный этап – извлечение и формализацию экспертных знаний. Степень зрелости определяется возможностью тиражирования для многократного использования (Рисунок 62).

Для базовых рисков Сибири построены онтологии, систематизирующие возможные варианты действий по реагированию на ЧС и опасные прецеденты, а также увязывающие комплекс предупредительных мер в единую логическую схему. Исследованы возможности выделения концептов, ключевых для принятия решений из нормативных и методических документов через построение когнитивных карт.

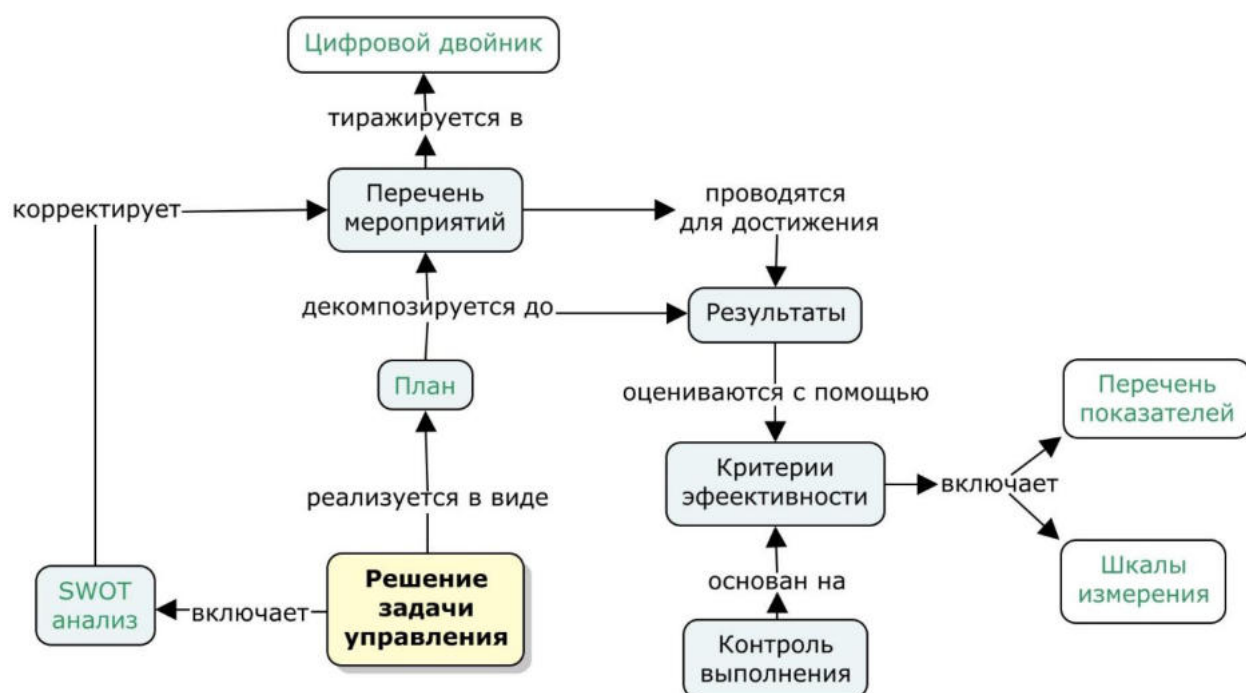


Рисунок 62 – Онтология задачи управления

На Рисунке 63 показан процесс совместного использования паттернов. Он состоит из двенадцати этапов и повторяется для каждого вида ситуаций и задачи управления (1). По различиям в составе и объёме данных задачи обеспечения природно-техногенной безопасности разделены на четыре типа:

- сбор информации, выявление и реагирование ситуаций, требующих управленческих действий (повседневное управление);
- реагирование на ЧС и опасные ситуации (оперативное управление);
- планирование и реализация долгосрочных мероприятий по снижению рисков (стратегическое управление);
- управление в циклических (сезонных) ЧС.

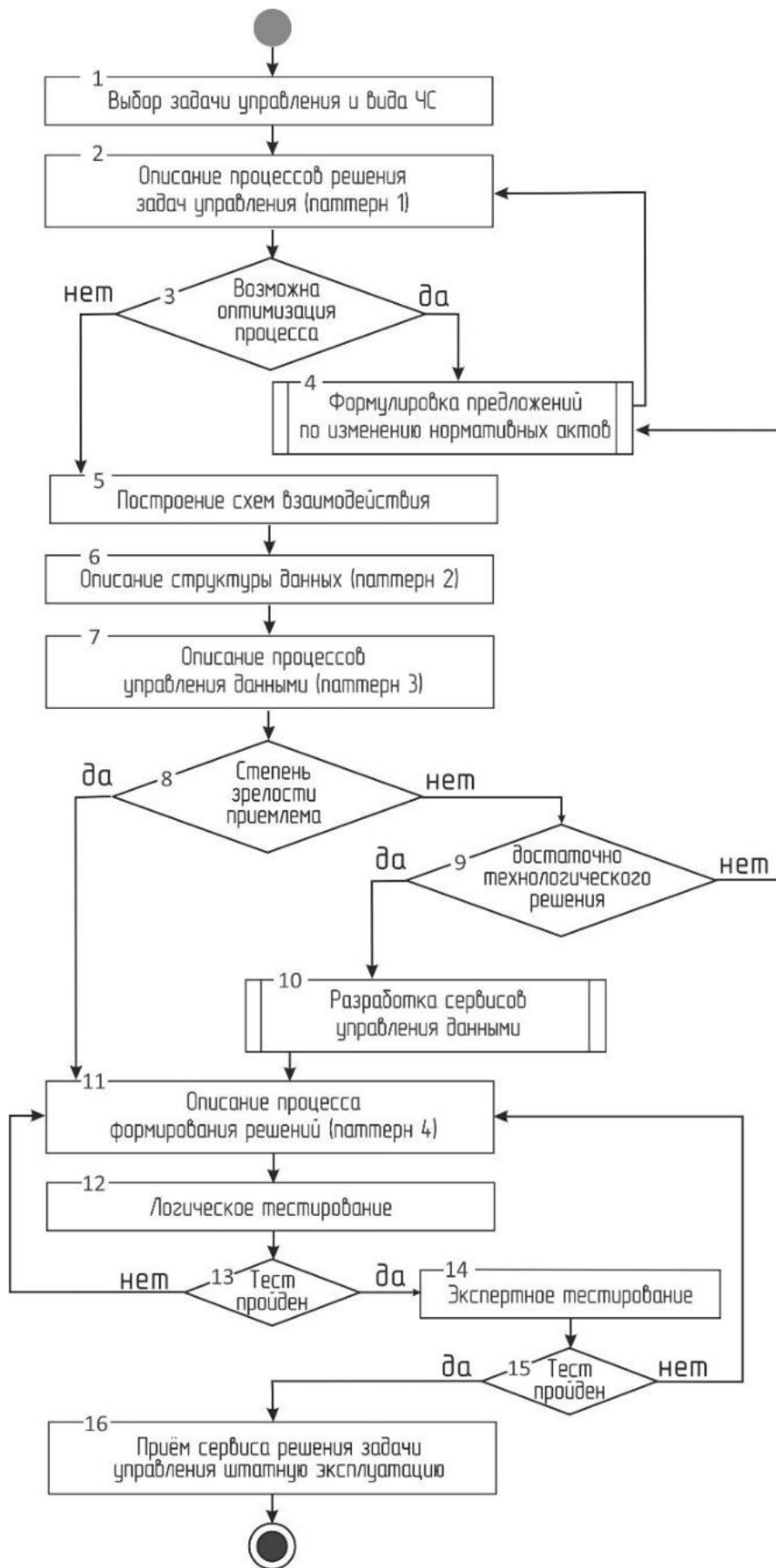


Рисунок 63 – Алгоритм применения паттернов повышения зрелости данных и использования их в управлении безопасностью территорий

Далее (2) описываются множества возможных управленческих решений, формируемых акторами в рамках организационной модели, информационные процессы и исходные данные. При возможности сокращения звеньев обработки данных (3) вносятся предложения по оптимизации процессов управления (4). Это является необходимым этапом цифровизации управления. Опыт авторов показал, что использование схемы взаимодействия акторов (5) «как есть» не позволяет строить интеллектуальные системы с длительным жизненным циклом. На шаге (6) разрабатывается экземпляр структуры данных для конкретной задачи. При этом анализируются все возможные процессы их обработки (7-10). Начиная с (11) происходит формирование и отладка сценариев ситуаций, которые в дальнейшем составляют основу планов действий в ЧС и программ повышения безопасности территорий для органов управления разных уровней.

Анализ функционирования системы обеспечения безопасности территорий показал потребность в высококачественных данных для успешного ведения как текущей деятельности, так и планирования в долгосрочной перспективе. В процессе построения интеллектуальной системы предстоит большая работа по формализации информационных ресурсов в соответствии с приведёнными паттернами. Учёт факторов, представленных в типовой структуре данных, позволит достичь большей информативности, чем использование «классических» оценок территориальных рисков.

Разработаны подходы к созданию озёр данных для формирования управленческих решений, включая методы повышения зрелости данных и создания единого информационного пространства. Показана целесообразность заменить анализ системы показателей процессом ситуационного моделирования с вычисляемой метрикой масштаба. Он применим как для реконструкции произошедших ситуаций, так и для формирования плана действий с учётом рисков. Ситуационные модели интегрируют паспорта территорий, реестры формирований и сведения о ресурсах. Превентивные мероприятия также сопровождаются изменением сценариев ситуаций в части действий по ликвидации опасных факторов и реализации мер защиты.

С использованием технологии озёр данных спроектировано единое информационное пространство для решения задач управления безопасностью территорий. Обеспечена масштабируемость, поддержка разных форматов и гибкость интеграции за счёт единых правил. Данные сохраняются в исходном виде, а также в виде, полностью подготовленном для анализа и моделирования ситуаций. Интеграция данных осуществляется путём потоковой и пакетной загрузки. API-интеграция обеспечивает получение данных от внешних систем в стандартизированной форме. Для обеспечения качества и управляемости данных разработана система управления метаданными.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Рамеев О.А. Основы теории принятия решений в организационных системах. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2024. – 288 с.
2. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
3. DAMA-DMBOK: Свод знаний по управлению данными. – М.: Олимп–Бизнес, 2020. – 828 с.
4. Андерсон К. Аналитическая культура. От сбора данных до бизнес-результатов. – М.: МИФ, 2017. – 423 с.
5. Коробко А.В. Технология информационно-аналитической поддержки принятия решений на основе федерализации разнородной информации в концепции многомерного представления данных: специальность 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»: автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук / Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2024. – 39 с.

Основные публикации по разделу:

1. Ничепорчук В.В., Кобыжакова С.В. Цифровизация управления безопасностью арктических территорий / Безопасная Арктика-2025. Материалы деловой программы межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС в Арктической зоне Российской Федерации. Москва, 2025. – С. 30-40.
2. Арсланов А.М., Сибирко В.И., Мартынов В.А., Ничепорчук В.В. Техногенные и природные чрезвычайные ситуации в Российской Федерации за 2024 год // Пожарная безопасность, 2025. № 1. С. 131-133.
3. Ничепорчук В.В., Кобыжакова С.В. Технология цифровизации управления безопасностью территорий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. № 1 (37). С. 104-113.
4. Бычков И.В., Гаденин М.М., Костогрызов А.И., Москвичёв В.В., Махутов Н.А., Ничепорчук В.В., Постникова У.С., Потапов В.П., Шокин Ю.И. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Национальная безопасность». Системная инженерия в проблемах национальной безопасности. – М.: МГОФ «Знание», 2025. – 898 с.

3.2. Разработка и апробация методики управления эвакуацией на основе математического моделирования для общественных зданий массового пребывания

Исследование посвящено применению математического моделирования эвакуации при пожаре к вопросам организации эвакуации в общественных зданиях с непостоянным контингентом. Особое место среди таких объектов занимают торгово-развлекательные центры (ТРЦ) и популярные музеи, отличающиеся большой площадью. Такие здания относятся к объектам повышенной опасности, поскольку являются объектами массового пребывания. В случае пожара для всех без исключения людей должны быть обеспечены безопасные условия эвакуации из здания. Критерием обеспечения безопасной эвакуации является выполнение условий своевременности ($t_{i,эв} < t_{i,необ} = t_{i,бл} \cdot 0,8$) и беспрепятственности ($t_{i,ск} < 360$ с) на протяжении всех путей эвакуации, где $t_{i,эв}$, с – время эвакуации последнего человека с i -го участка, $t_{i,необ}$, с – необходимое время эвакуации, определяемое через $t_{i,бл}$ – время блокирования участка, которое определяется по минимальному времени достижения рассматриваемыми опасными факторами пожара (ОФП) критических значений., $t_{i,ск}$, с – время скопления людей с критической плотностью $\approx 3,5$ чел./м². Второе условие ограничивает продолжительность нахождения людей в состоянии плотного скопления, потенциально влекущего возможность эффекта асфиксии.

Как правило, часть посетителей имеют ограниченные возможности передвижения, им требуется помощь персонала в случае экстренной эвакуации. Характерна постоянная ротация и обновление посетителей. Чаще всего посетители не знакомы с планировкой здания, расположением эвакуационных выходов, и, именно, сотрудники должны управлять эвакуацией, направляя посетителей безопасным маршрутом. Поэтому проведение тренировочных эвакуаций очень важно: тренируется персонал, отрабатывается механизм согласованной работы всех задействованных служб и внешних служб безопасности.

Основным ограничением при возникновении пожара может быть исключение части путей из маршрута эвакуации в силу их небезопасности. В этом случае требуется управление эвакуацией: согласованные действия персонала по распределению потоков людей по безопасным маршрутам и недопущение продолжительных скоплений.

В музеях сохранность музейных ценностей также является важным критерием при проведении экстренных эвакуаций из здания, который достигается проведением досмотровых процедур посетителей по завершении эвакуации.

Для успешного решения задачи обеспечения безопасных условий эвакуации в таких зданиях нужно иметь представление о характерной динамике развития пожара при различ-

ных местах расположения очага, продолжительности эвакуации. На основе этой информации решаются задачи:

- определение допустимой продолжительности эвакуации, при которой обеспечиваются безопасные условия на маршрутах эвакуации;
- установление предельной численности людей, единовременное пребывание которых будет безопасным в случае пожара или другой чрезвычайной ситуации, требующей эвакуации;
- установление максимальной численности посетителей категории МГН, разрешённой к доступу на площадку единовременно, разработка стратегии их сопровождения из различных частей объекта, учитывая ограниченную скорость передвижения и возможность самостоятельного покидания здания;
- определение наиболее безопасных частей здания на этажах для использования их в качестве зон безопасности для посетителей категории МГН;
- разработка различных маршрутов эвакуации на случай действительного или предположительного блокирования эвакуационных путей и/или выходов за счёт распространения ОФП с учётом применяемых критериев безопасности;
- выявление наиболее проблемных для эвакуации участков здания, в которых образуются скопления людей с критической плотностью, проверка условия беспрепятственности эвакуации: $t_{i,ck} < 360$ с;
- разработка инструкции для персонала, подбор наиболее подходящего персонала на ключевые участки здания для управления эвакуацией, планы проведения тренировочных эвакуаций.

При разработке схем эвакуации нужно учитывать их реализуемость – имеет ли объект фактическую возможность обеспечить маршрутизацию (управление потоками людей) согласно разработанным схемам в зависимости от места размещения очага пожара. Эти факты, с учётом планировочных особенностей объекта, в музеях - расположения экспозиций по популярности, в ТРЦ – популярных торговых точек, налагают дополнительные ограничения на разработку схем эвакуации. Таким образом, задача разработки маршрута эвакуации при пожаре является многокритериальной задачей.

На примере Зимнего дворца Государственного Эрмитажа, одного из крупнейших музейных комплексов в мире, рассмотрено применение компьютерного моделирования эвакуации при пожаре в соответствии с разработанным ранее алгоритмом для решения задачи оценки эффективности имеющихся средств противопожарной защиты и организации управления эвакуацией из здания в случае пожара. Проведены тренировочные учения для

апробирования предложенных решений, определена логика формирования алгоритмов работы системы управления эвакуацией.

Рассмотрены пять мест вероятного расположения очагов пожара, влекущих затруднённые условия эвакуации. Очаги выбраны так, что в каждом сценарии гарантированно исключается (или использование сводится к минимуму) один из выходов наружу и, как минимум, одна лестница. Также выбор очагов обусловлен возможностью возникновения пожара в этих помещениях в силу наличия источника возгорания (эксплуатируемых электроприборов) и горючей нагрузки.

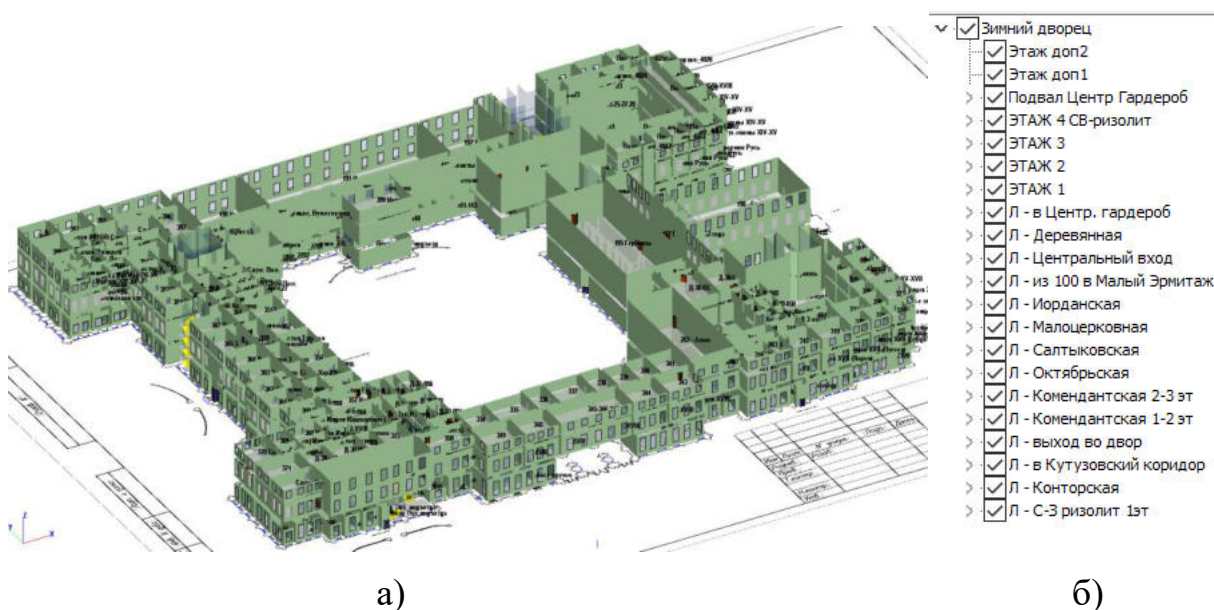


Рисунок 64 – а) 3D-модель Зимнего Дворца; б) структура Здания в BIM-модели

Для моделирования развития пожара и эвакуации построена компьютерная 3D-модель здания Зимнего Дворца (рисунок 64). Здание имеет сложную форму, помещения имеют декоративные элементы составных колонн, многие помещения имеют сводчатую структуру потолка, глубокие оконные ниши. В модели исторического здания, создаваемой для целей проведения расчётов, принят ряд геометрических упрощений, которые не уменьшают длину пути эвакуации, и, за счёт уменьшения объёмов, включаемых в расчётную область для моделирования развития пожара, способствуют получению нижних оценок времени блокирования путей эвакуации.

В результате выполненных расчетов было определено, что при одновременном нахождении в здании 4 000 человек, с учётом представителей маломобильных групп населения и персонала, использующего общие эвакуационные пути и выходы, может быть обеспечена безопасная эвакуация из здания во всех рассмотренных сценариях. Определены

временные параметры процессов эвакуации из отдельных частей здания и моментов, когда эти пути становятся небезопасными, определены соответствующие невязки, дающие информацию о запасе времени и возможных временных задержках на организационные моменты.

Совокупность выполненных расчётов представляет базу (основу) для оценки эффективности различных способов обеспечения безопасных условий эвакуации. На основе анализа полученных результатов дана комплексная оценка существующим способам защиты людей от опасных факторов пожара, определены допустимые условия функционирования объекта.

Анализ популярности залов, постоянных выставочных экспозиций показал устойчиво большой интерес к залам 2-го этажа Зимнего дворца, исходя из этого было принято распределение людей по этажам здания.

Выполненные расчёты предполагают наличие системы пожарной сигнализации (СПС), обеспечивающей обнаружение пожара и включение системы оповещения (СОУЭ), что выражено во времени начала эвакуации – 60 секунд от начала пожара. Однако интерпретировать реализацию конкретных схем эвакуации в каждом из рассмотренных сценариев как работу СОУЭ по управлению эвакуацией не приходится. Это следует рассматривать, как работу персонала.

В результате серий проведённых расчётов для каждого сценария разработаны схемы эвакуации, которые обеспечивают достижение двух критериев – безопасная эвакуация при минимальном количестве человек эвакуирующихся за пределы периметра (на Дворцовую площадь).

В то же время, очевидно, что достичь реализации разработанных маршрутов возможно только с помощью управления эвакуацией. Причиной этого являются следующие факты:

- принцип ближайшего доступного выхода не гарантирует обеспечение реализации ключевых критериев;
- посетители плохо ориентируются в здании.

Важным аспектом является факт реализуемости разработанного маршрута: объект может обеспечить маршрутизацию (управление потоками людей) согласно разработанной схеме. Необходимо учитывать и тот факт, что очаг пожара (или другой блокирующий фактор) может произойти в любой части здания, соответственно, на вооружении сотрудников должно быть несколько схем эвакуации. Эти особенности, с учётом планировочных особенностей объекта так же налагают определённые ограничения на разработку схем эвакуации (помимо критериев безопасности людей и сохранности музейных ценностей). Таким

образом, задача разработки маршрута эвакуации при пожаре является многокритериальной задачей, решение которой возможно только с применением компьютерного моделирования движения людей.

С учётом сказанного, при разработке схем эвакуации применялись принципы:

- схемы эвакуации для разных сценариев отличаются только в объёме, необходимом и обоснованном местом размещения очага;
- из одного зала все люди направляются одним маршрутом;
- основной механизм маршрутизации (управления направлением движения) закрытие дверей для однозначного формирования маршрута;
- посетители анфилад (систем залов, разделённых открытыми проемами) направляются в одну сторону;
- исключение встречных потоков;
- на основе анализа динамики развития пожара и выявленных временных характеристик выбирались маршруты безопасные, но более длинные для ускорения эвакуации в наиболее уязвимых узлах здания;
- критерий обеспечения безопасности людей стоял выше задачи обеспечения музейных ценностей.

Представленные результаты можно использовать:

- при составлении инструкций для персонала по действиям по время пожара и управления эвакуацией применительно к каждому рабочему месту;
- для распределения зон ответственности между персоналом с учётом расположения узловых точек маршрутизации потока посетителей при эвакуации в разных сценариях;
- решения логистических задач штатного расписания Службы Безопасности музея.

Апробирование разработанных подходов проводилось в рамках реальной тренировочной эвакуации в Зимнем дворце Государственного Эрмитажа. Проведение мероприятия сопровождалось тщательной подготовкой.

В результате предварительных расчётов определено:

- допустимое количество человек в Зимнем дворце одновременно (4000);
- допустимость использовать только выходы во внутренний двор;
- допустимость исключить одну или две лестницы при условии использования Малого Эрмитажа в качестве ЗБ;
- если нет опасности на первом этаже, то первый этаж - это зона безопасности;
- принцип ближайшего выхода нельзя использовать, поскольку может вести в задымленную зону;
- требуется управление посетителями (силами зрителей и службы безопасности (СБ));

– для локализации ОФП и управления эвакуацией используется закрытие дверей.

Основные выводы, которые были сделаны по результатам анализа выполненных расчётов:

1. эвакуация пройдет по безопасным путям, если специальным образом направлять людей от очага пожара и перераспределять потоки для снижения вероятности продолжительных скоплений, по возможности исключать Октябрьский и Комендантский подъезды из схемы эвакуации, вариант движения к ближайшему эвакуационному выходу может не быть безопасным в конкретной ситуации;
2. техническое оснащение здания таково, что обеспечить управление эвакуацией в зависимости от конкретного места расположения очага пожара техническими средствами нет возможности;
3. требуется участие персонала в управлении эвакуацией, для этого персонал должен понимать свои действия в конкретной ситуации.

Открытым был вопрос по поводу реакции посетителей на оповещение, на действия персонала. Так же был поставлен вопрос о необходимости покидания здания (выход на улицу) посетителями при проведении тренировочной эвакуации. В осенне-зимний период выход на улицу без верхней одежды чреват последствиями для здоровья, а также может вызывать нежелательные негативные эмоции и сопротивление со стороны посетителей при отсутствии явных (видимых, ощущаемых обонянием) признаков угрозы.

Кроме того, в рамках подготовки проявила себя особенность функционирования музея, выраженная в изменении проходимости отдельных частей здания в связи с закрытием некоторых залов на подготовку к выставкам.

Поэтому были сформулированы цели проведения тренировочной эвакуации:

1. проверить возможность управления эвакуацией силами персонала объекта (смотрителей, служба безопасности);
2. проверить гипотезу об использовании дверей как инструмента направления людей нужным маршрутом
3. проверить реакцию людей на указания/требования персонала;
4. проверить реакцию людей на СОУЭ;
5. определить время эвакуации из отдельных залов и здания в целом;
6. дать оценку скорость людского потока и отдельных посетителей в процессе эвакуации;
7. определить возможность сбора посетителей в безопасных частях здания (зонах безопасности).

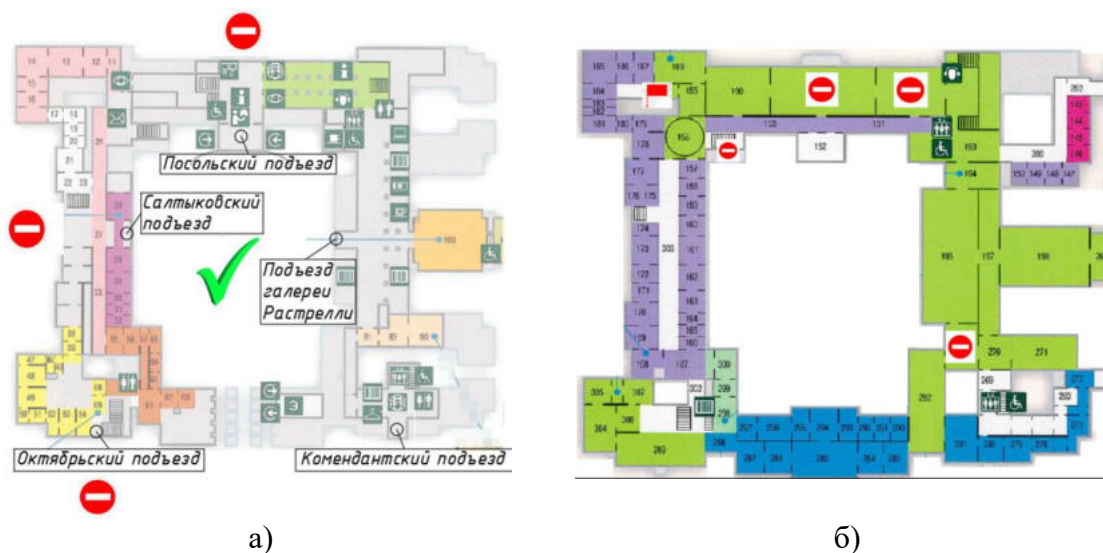


Рисунок 66 – а) Подъезды, исключённые из схемы эвакуации и включённые в нее; б) расположение очага пожара и закрытые на подготовку выставочных экспозиций залы

С учётом предполагаемого очага пожара (рисунок 66б), его динамики (рисунок 65), были разработаны схемы эвакуации с этажей; исключена Большая церковная лестница (как ближайшая к очагу пожара), Октябрьский подъезд.

С учётом текущей особенности эксплуатации Зимнего дворца – закрытие на подготовку выставок залов Николаевского, Аванзала, Пикетного (рисунок 66б), схемы эвакуации были скорректированы (рисунок 67).

В результате подготовки к тренировочной эвакуации были сформулированы дополнительные принципы формирования схем эвакуации применительно к данному зданию: деление на крупные блоки (ризалиты/анфилады), наличие 2-х планов действий: план «А», план «Б» с учётом наличия залов, которые могут быть закрыты.



Рисунок 67 – Схема эвакуации с этажей в сценарии, подготовленном для тренировочной эвакуации, на 1-м этаже обозначены места сбора посетителей в фойе Салтыковского, Посольского, Растрелли, Комendantского подъездов, цвет стрелок на этажах соответствует месту сбора

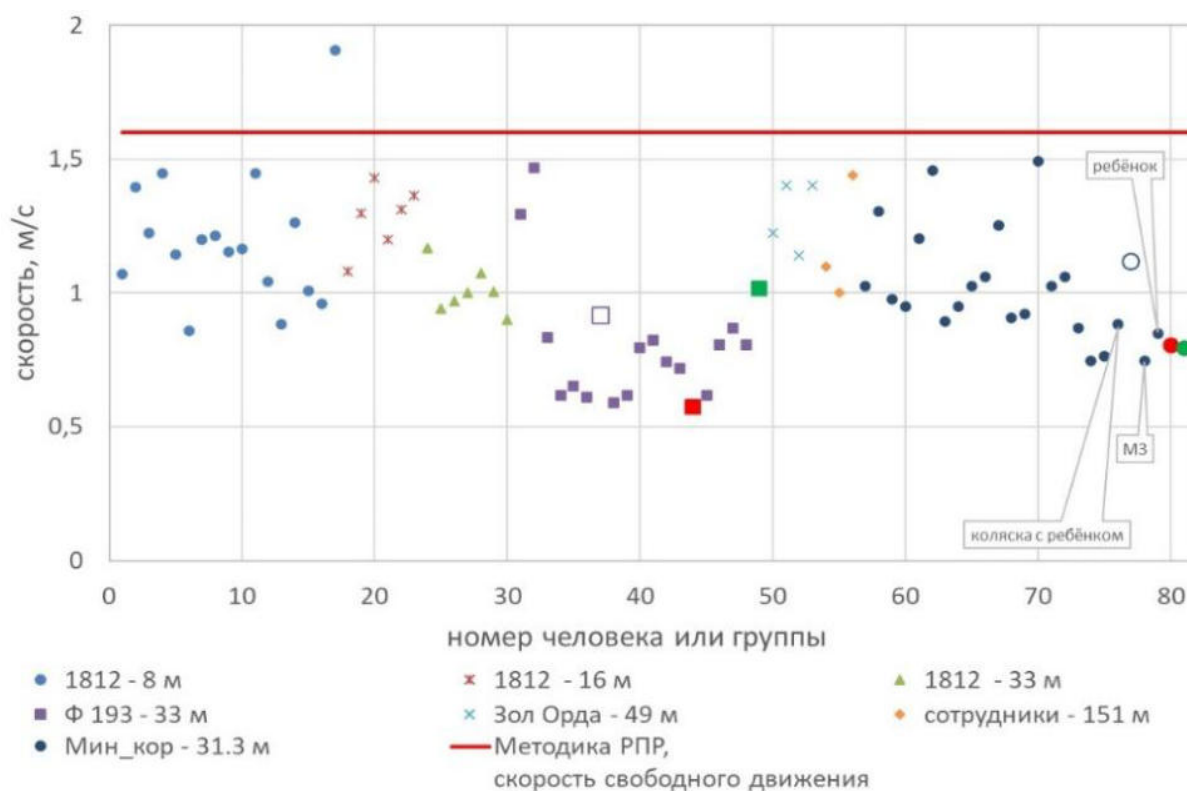


Рисунок 68 – Средняя скорость движения отдельных людей

По записям с камер видео наблюдения удалось отследить перемещение некоторых человек по зданию, в общей сложности было сделано около 80 наблюдений за отдельными людьми.

Данные представлены на рисунке 68 с разбивкой по залам, где происходило наблюдение, так же на рисунке указана длина участка, на котором замерялась скорость. С учётом наблюдаемой плотности, которая была очень низкой, и люди могли поддерживать желаемую скорость движения, представленные данные следует интерпретировать как скорость свободного движения. Сплошная линия – скорость свободного движения из [Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России № 1140 от 14 ноября 2022 года.]. Именно, эта скорость была принята в качестве скорости свободного движения основной группы людей – люди без ограничений мобильности в проведённых расчётах.

Для проведения параллелей (сравнений) с результатами расчётов следует учитывать, что время проведения тренировочной эвакуации было выбрано в начале рабочего дня музея (11:30), к этому моменту через турникеты прошло 820 человек, поэтому плотных потоков эвакуирующиеся не формировали. Время окончания эвакуации в проведённых расчётах определяли лица с ограниченной мобильностью, они составляли до 30 %, их скорость

свободного движения была принята 0,5-1,16 м/с. В силу медленной скорости завершающую часть эвакуации эта категория посетителей при моделировании выполняла в свободном движении. Поэтому полученные данные скоростей тренировочной эвакуации можно расценивать, как реализацию завершающей стадии эвакуации, что была получена в расчётах. Но тут же следует отметить, что представленная интерпретация годится, именно, для этой конкретной ситуации. В целом необходимо больше данных, чтобы сформировать достоверное представление о скорости свободного движения посетителей музея во время эвакуации при пожаре.

Разработка маршрутов эвакуации при создании базы сценариев управления эвакуацией $BD_{\text{управление эв.}}$ должна сопровождаться соблюдением сформулированных правил, учитывающих особенности музеев:

- единообразие маршрутов эвакуации;
- из одного зала все люди направляются одним маршрутом;
- посетители анфилад (систем залов, разделённых открытыми проемами) направляются в одну сторону;
- выбираются маршруты более длинные для ускорения эвакуации в наиболее уязвимых узлах здания;
- обеспечение безопасности людей первичной задачи обеспечения безопасности музейных ценностей.

Проведённая тренировочная эвакуация подтвердила тезис, что только технического способа управления эвакуацией (с помощью устройств) в музее недостаточно. Ключевую роль в управлении эвакуацией играют сотрудники музея. Наблюдалась адекватная реакция посетителей в экспозиционных залах на указания смотрителей. При этом такой способ, как закрывание дверей, проявил себя как действенный способ управления эвакуацией. Технические способы управления эвакуацией в музее можно рассматривать как вспомогательный механизм для сотрудников.

На практике было апробировано введённое понятие динамической зоны безопасности, возможность организации которой была определена проведённым моделированием эвакуации при пожаре.

Основные публикации по разделу:

1. Vitova, T., Kirik, E. (2025). Personal Space of People in Movement Under Different Conditions. In: Wyrzykowski, R., Dongarra, J., Deelman, E., Karczewski, K. (eds) Parallel Processing and Applied Mathematics. PPAAM 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15581. Springer, Cham. pp 345–355 https://doi.org/10.1007/978-3-031-85703-4_24

2. Витова Т.Б., Кирик Е.С. Исследование динамического пространства пешеходов с помощью диаграммы Вороного // Вычислительные технологии. 2025. Т. 30. № 3. С. 23-36 doi: 10.25743/ICT.2025.30.3.003
3. Кирик Е. С., Богданов А. В., Сушкова О. В., Витова Т. Б. Эвакуация при пожаре в музее: подготовка и проведение тренировочных эвакуаций с использованием численного моделирования // научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России" № 4-2024, С. 70-88. <https://doi.org/10.61260/2218-13X-2024-4-70-88>

3.3. Непараметрическая методика системного анализа данных ДЗЗ с использованием структурной декомпозиции по корреляционным признакам

Предлагается методика системного анализа данных дистанционного зондирования природных объектов, охватывающая решение взаимосвязанных задач автоматической классификации в пространстве спектральных признаков, агрегирование классов с привлечением дополнительной информации о свойствах элементов земной поверхности и синтез алгоритмов оценивания состояний исследуемых объектов. Основу методики составляют непараметрические методы и алгоритмы принятия решений, при синтезе которых используются ядерные оценки плотности вероятности. Для повышения вычислительной эффективности непараметрических алгоритмов структурного анализа спектральных данных предлагается при их синтезе использовать регрессионную оценку плотности вероятности, основанную на сжатии исходной статистической информации, и ядерные оценки смеси плотностей вероятностей для использования технологии параллельных вычислений.

Разработан новый метод структурного анализа данных дистанционного зондирования, который основывается на учёте знаков составляющих компонент оценки коэффициента корреляции между спектральными признаками. Каждая компонента оценки коэффициента корреляции определяется произведением нормированных значений спектральных признаков. Количество компонент оценки коэффициентов корреляции соответствует объёму исходных данных. На этой основе формируется решающее правило обнаружения классов, отличающихся знаками составляющих компонент оценки коэффициента корреляции: положительные, знакопеременные и отрицательные. Этот метод открывает новое направление автоматической классификации статистических данных. Предложенный метод декомпозиции данных дистанционного зондирования обобщён на условия многомерных спектральных признаков. На этой основе разработана двухуровневая система структурного анализа статистических данных. На первом уровне структуры системы декомпозиция исходных данных осуществляется с учётом знаков составляющих обобщённого показателя зависимости

между спектральными признаками, который представляется суммой оценок коэффициентов корреляции между их неповторяющимися парами. Сформированные массивы спектральных данных на втором уровне структуры подвергаются дополнительной классификации с использованием традиционных алгоритмов. Приводятся результаты применения предлагаемых методов структурного анализа при дешифрировании лесного массива, повреждённого сибирским шелкопрядом.

Введение. Системный анализ данных дистанционного зондирования является многоэтапным процессом, который обеспечивает эффективное оценивание состояний элементов земной поверхности. Основные этапы системного анализа составляют задачи декомпозиции массивов спектральных данных, их агрегирование с привлечением дополнительной информации о показателях свойств элементов земной поверхности, формирование на этой основе обучающей выборки для синтеза алгоритмов оценивания состояний природных объектов. Для решения этих задач используются, например, программные продукты ERDAS Imagine, ScanEx Image Processor, ArcGIS.

Известны эффективные непараметрические алгоритмы автоматической классификации, методы проверки гипотез о распределениях случайных величин и распознавания образов, ориентированные на условия априорной неопределённости об объектах исследования. На этой основе появляется возможность в современных условиях использовать их при формировании методики системного анализа данных дистанционного зондирования.

При большом объёме статистических данных необходимо значительное повышение вычислительной эффективности непараметрических алгоритмов обработки информации дистанционного зондирования. Перспективными направлениями решения этой проблемы являются сжатие исходных статистических данных либо использование технологии параллельных вычислений. В рамках этих направлений разработаны непараметрические алгоритмы принятия решений с высокой вычислительной эффективностью, основу которых составляют ядерные оценки плотности вероятности регрессионного типа и смеси плотностей вероятностей.

Альтернативным подходом повышения вычислительной эффективности алгоритмов структурного анализа данных дистанционного зондирования является обоснование и разработка упрощённых методов декомпозиции, учитывающих не только количественные значения спектральных признаков, но и зависимости между ними.

В отчёте обосновывается методика системного анализа данных дистанционного зондирования большого объёма на основе непараметрических алгоритмов принятия решений. Рассматриваются алгоритмы декомпозиции данных ДЗЗ в пространстве спектральных признаков, характеризующихся высокой вычислительной эффективностью. Приводится

применение разработанных информационных средств при дешифрировании тестового участка лесного массива, повреждённого сибирским шелкопрядом.

Структура системного анализа данных дистанционного зондирования

Пусть $V = (x_v^i, v = \overline{1, k}, i \in I = (i = \overline{1, n}))$ – спектральные данные, характеризующие элементы $S_i, i = \overline{1, n}$ земной поверхности. Имеется дополнительная информация $V' = (u^i, i \in I_1), I_1 \subset I$ о свойствах части элементов $S_i, i \in I_1$. Например, показатели u могут отражать влажность, особенности растительности элементов земной поверхности и степень повреждённости лесных массивов.

Необходимо построить решающее правило $m(x)$ для оценивания свойств элементов земной поверхности на основании спектральных данных x , получаемых с аппаратов дистанционного зондирования.

Предлагаемая методика предполагает решение следующих задач:

1. Формирование выборки спектральных данных дистанционного зондирования.
2. Проверка гипотезы об однородности спектральных данных V .
3. При обнаруженной неоднородности спектральных данных $V_j, j = \overline{1, M}, V = \bigcup_{j=1}^M V_j$ осуществить их агрегирование с использованием дополнительной информации V' о показателях свойств элементов земной поверхности. Результатом решения этой задачи являются области значений x достоверно отличающиеся значениями показателей u .
4. По результатам решения задач 2, 3 построить решающее правило $\bar{m}(x)$, позволяющее оценивать показатели свойств u элементов земной поверхности по спектральным данным x .

Для реализации второго этапа анализа данных дистанционного зондирования используется непараметрический алгоритм автоматической классификации ядерного типа. Если гипотеза об однородности спектральных данных выполняется, то процесс системного анализа переходит на первый этап для формирования нового массива исходных данных V в скорректированном пространстве спектральных признаков элементов земной поверхности $S_i, i = \overline{1, n}$.

На третьем этапе системного анализа данных дистанционного зондирования осуществляется агрегирование обнаруженных классов в пространстве спектральных признаков в их группы, которые достоверно отличаются показателями свойств u элементов земной поверхности. Для его реализации используется дополнительная информация V' и непараметрический метод проверки гипотез о тождественности законов распределения случайных величин x_v^i , основанный на алгоритме распознавания образов. Результатом этого этапа

являются группы классов в пространстве спектральных признаков, достоверно отличающиеся показателями свойств u элементов земной поверхности.

По полученной информации (обучающая выборка) на четвертом этапе осуществляется синтез непараметрического алгоритма распознавания образов $\tilde{m}(x)$ для оценивания показателей свойств элементов земной поверхности по их спектральным признакам x . Если ошибка оценивания показателей свойств элементов земной поверхности превышает пороговое значение, то осуществляется переход на третий этап системного анализа для уменьшения количества групп классов в пространстве спектральных признаков, отличающихся показателями свойств элементов земной поверхности. Если это решение не приводит к уменьшению ошибки распознавания обнаруженных групп классов алгоритмом $\tilde{m}(x)$, то предлагается перейти к первому этапу корректировки набора спектральных признаков при формировании исходного массива данных V . При согласовании показателя эффективности алгоритма $\tilde{m}(x)$ оценивания состояний элементов земной поверхности с пороговым значением осуществляется картирование исследуемой территории по показателям свойств элементов земной поверхности в пространстве их спектральных признаков.

При реализации этапов системного анализа данных дистанционного зондирования используются непараметрические модели и алгоритмы принятия решений, приведённые в монографиях: Шаруева А.В., Лапко А.В., Лапко В.А. Непараметрические методы проверки гипотез о распределениях случайных величин при анализе данных дистанционного зондирования (Новосибирск: СО РАН, 2024); Лапко А.В., Лапко В.А. Ядерные оценки плотности вероятности и их применение (Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021).

Методы структурного анализа спектральных данных дистанционного зондирования

Декомпозиция статистических данных дистанционного зондирования природных объектов является одним из основных этапов разработки алгоритмов оценивания состояний природных объектов. При решении этой задачи используются алгоритмы автоматической классификации для обнаружения компактных групп элементов исходных данных в пространстве спектральных признаков. Альтернативным направлением структурного анализа данных дистанционного зондирования являются методы с применением, например, вегетационных индексов NDVI (normalized difference vegetation index) и GNDVI (green normalized difference vegetation index). Однако при использовании вегетационных индексов требуются дополнительные экспертные сведения для определения пороговых значений индексов. Для обхода этой проблемы предложены методы декомпозиции данных дистанционного зондирования, основанные на анализе составляющих компонент оценок коэффициентов корреляции пар спектральных признаков.

Декомпозиция данных ДЗЗ на основе анализа оценок коэффициентов корреляции спектральных признаков.

Пусть имеются данные ДЗЗ в виде информации $V = (x_1^i, x_2^i, z_1^i, z_2^i, i = \overline{1, n})$, которая составлена из наблюдений спектральных признаков x_1, x_2 и соответствующих им координат z_1, z_2 элементов земной поверхности. Относительную зависимость между x_1 и x_2 в конкретных условиях x_1^i, x_2^i будем анализировать по составляющим компонент оценки коэффициента корреляции.

Оценка коэффициента корреляции между случайными величинами x_1, x_2 представима в виде

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_1^i - \bar{x}_1}{\bar{\sigma}_1} \right) \left(\frac{x_2^i - \bar{x}_2}{\bar{\sigma}_2} \right) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n r_1^i r_2^i,$$

где $\bar{\sigma}_v = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_v^i - \bar{x}_v)^2 \right)^{1/2}$ – оценка среднего квадратического отклонения x_v , а $\bar{x}_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_v^i$ – среднее значение спектрального признака $x_v, v=1, 2$; $r^i = r_1^i r_2^i, i = \overline{1, n}$ – компоненты коэффициента корреляции.

Необходимо различать типы качественной зависимости между переменными x_1, x_2 , которые характеризуются положительными и отрицательными значениями соответствующих им составляющих r_1, r_2 компонент r оценки коэффициента корреляции R . Обозначим через $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$ области значений x_1^i, x_2^i , которые определяются по исходным данным V в соответствии с правилом:

$$m(x_1^i, x_2^i) : \begin{cases} (x_1^i, x_2^i) \in \Omega_1, & \text{если } r_1^i > 0 \text{ и } r_2^i > 0; \\ (x_1^i, x_2^i) \in \Omega_2, & \text{если } r_1^i < 0 \text{ и } r_2^i < 0; \\ (x_1^i, x_2^i) \in \Omega_3, & \text{если } r_1^i > 0 \text{ и } r_2^i < 0; \\ (x_1^i, x_2^i) \in \Omega_4, & \text{если } r_1^i < 0 \text{ и } r_2^i > 0, \quad i = \overline{1, n}. \end{cases}$$

Правило $m(x_1, x_2)$ служит также для оценивания принадлежности контрольной ситуации $x=(x_1, x_2)$ к одной из областей $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, которые будем определять как классы в пространстве переменных x_1, x_2 .

Для оценивания принадлежности контрольной ситуации $x_v, v=1, 2$ к классам $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$ используется метод, который предполагает выполнение следующих действий:

- определим нормированные значения спектральных признаков x_1, x_2 , характеризующих составляющие r_1, r_2 компоненты r оценки коэффициента корреляции R ,

$$r_1 = \left(\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\bar{\sigma}_1} \right), \quad r_2 = \left(\frac{x_2 - \bar{x}_2}{\bar{\sigma}_2} \right),$$

где оценки математических ожиданий \bar{x}_1, \bar{x}_2 и среднеквадратических отклонений $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$ вычислим по исходным статистическим данным V ;

- в соответствии с правилом $m(x_1, x_2)$ принимается решение о принадлежности контрольной ситуации $x=(x_1, x_2)$ к одной из областей декомпозиции спектральных признаков $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$. Например, $x \in \Omega_1$, если значения $r_1 > 0$ и $r_2 > 0$.

Для характеристики областей (классов) $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$ используются непараметрические оценки плотностей вероятностей типа Розенблатта – Парзена компонент $r=r_1r_2$ в рассматриваемых классах, которые являются актуальной информацией для эксперта при оценивании результатов декомпозиции спектральных данных дистанционного зондирования.

Декомпозиция данных ДЗЗ на основе анализа оценок коэффициента корреляции многомерных спектральных признаков.

Пусть имеется выборка $V = (x_v^i, v = \overline{1, k}, i = \overline{1, n})$ статистически независимых наблюдений многомерной случайной величины $x_v, v = \overline{1, k}$ размерности k . Представим коэффициент корреляции между компонентами x_v и x_j в виде

$$R_{vj} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_v^i - \bar{x}_v}{\bar{\sigma}_v} \right) \left(\frac{x_j^i - \bar{x}_j}{\bar{\sigma}_j} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_v^i r_j^i.$$

Здесь, например, $\bar{\sigma}_v, \bar{x}_v$ – оценки среднего квадратического отклонения и математического ожидания признака x_v . Количество коэффициентов корреляции для неповторяющихся пар спектральных признаков из набора $x_v, v = \overline{1, k}$ равно $k(k-1)/2$.

В качестве обобщённого показателя зависимости между компонентами случайной величины $x = (x_v, v = \overline{1, k})$ примем критерий

$$\bar{R} = \sum_{v=1}^k \sum_{j>v}^k R_{vj} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^k \sum_{j>v}^k r_v^i r_j^i.$$

Компоненты критерия \bar{R}

$$r^i = \sum_{v=1}^k \sum_{j>v}^k r_v^i r_j^i$$

определяют обобщённую зависимость между признаками $x_v, v = \overline{1, k}$ в условиях $x_v^i, v = \overline{1, k}$. Значения r^i принимают положительные и отрицательные значения. На этой основе исходная выборка V разбивается на две части

$$V_t = (x_v^i, v = \overline{1, k}, i \in I_t), t = 1, 2, I_1 \cup I_2 = I = (i = \overline{1, n})$$

в соответствии со знаками составляющих критерия \bar{R} :

$$x^i \in V_1, \text{ если } r^i \geq 0;$$

$$x^i \in V_2, \text{ если } r^i < 0.$$

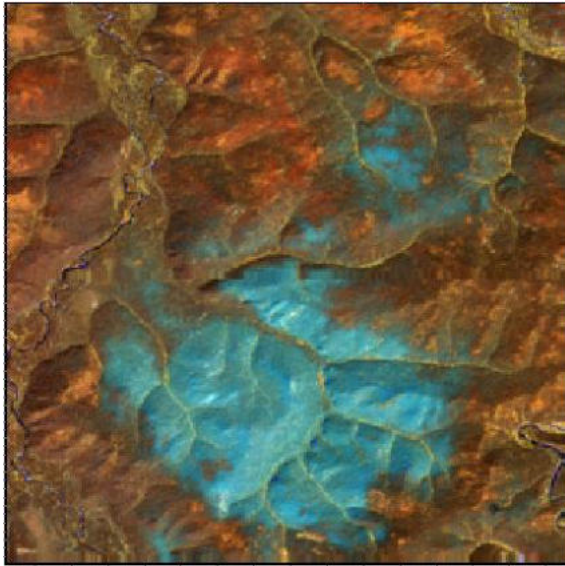
Выборки V_1 и V_2 соответствуют положительным и отрицательным значениям r^i , а I_1 и I_2 - соответствующие им множества номеров из выборки V .

На втором этапе декомпозиции исходных данных осуществляется структурный анализ выборок V_1 и V_2 с использованием непараметрического алгоритма автоматической классификации. Его применение позволяет разбить выборки V_1 и V_2 на классы, соответствующие одномодальным фрагментам ядерных оценок плотностей вероятностей случайных величин x . Для реализации второго этапа структурного анализа разработана модификация традиционного алгоритма классификации «Форель», параметры которого выбираются по данным вычислительного эксперимента.

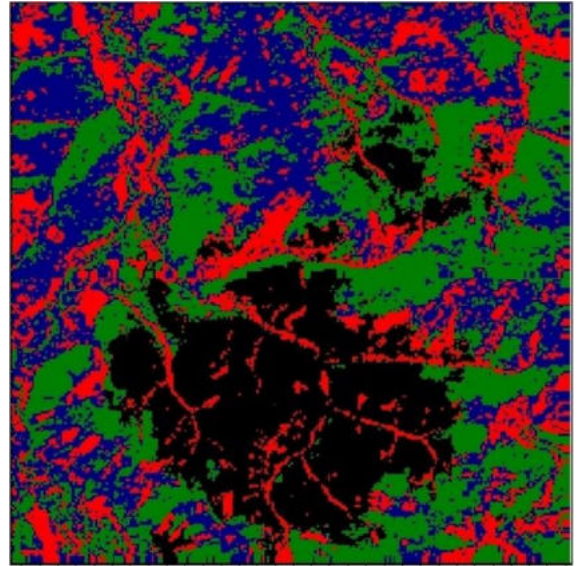
Применение методики структурного анализа данных дистанционного зондирования

Полученные результаты реализованы в виде программы для ЭВМ в среде Delphi-7, которая использована при дешифрировании тестового участка лесного массива, повреждённого сибирским шелкопрядом. Объектом исследования являлся лесной массив в Ирбейском районе Красноярского края с преобладанием пихтовых и кедровых древостоев. Исходная информация сформирована 8 августа 2019 г. по данным дистанционного зондирования с помощью космического аппарата Landsat-8/OLI. Снимок получен с геопортала Earth Explorer, из которого вырезан тестовой участок площадью 6,2 тысяч гектар (рисунок 69а). Тестовой участок определяется 69342 пикселями с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Каждый пиксель характеризуется семью спектральными признаками $x = (x_1, \dots, x_7)$. Снимок атмосферно скорректирован и представлен в единицах отражательной способности. При обработке снимка применён алгоритм C-коррекции для топографической нормализации данных. На этой основе сформирована статистическая выборка наблюдений $V = (x_v^i, v = \overline{1, 7}, z_1^i, z_2^i, i = \overline{1, 69342})$, элементы которой соответствуют значениям спектральных признаков $x_v^i, v = \overline{1, 7}$ и их пространственным координатам (z_1^i, z_2^i) .

Результаты дешифрирования тестового участка лесного массива представлены на рисунке 69б.



а)



б)

Рисунок 69 – Фрагменты спутниковой съемки с аппарата Landsat-8/OLI в композите RGB спектральных каналов (NIR, SWIR 1, RED): а) Результаты дешифрирования тестового участка в пространстве признаков (ближний инфракрасный NIR, коротковолновый инфракрасный SWIR, б) Чёрным цветом выделен участок лесного массива, повреждённый сибирским шелкопрядом

Заключение

Системный анализ данных дистанционного зондирования представляется последовательностью следующих его основных этапов: формирование и декомпозиция исходной спектральной информации элементов исследуемой территории, агрегирование спектральных классов и синтез алгоритмов оценивания состояний природного объекта. Для реализации этих этапов используются непараметрические алгоритмы автоматической классификации, проверки гипотезы о распределениях случайных величин и распознавания образов, синтез которых основан на ядерных оценках плотностей вероятностей. В зависимости от результатов решения этих задач предусматривается возможность изменения процесса системного анализа данных дистанционного зондирования. Метод структурного анализа данных дистанционного зондирования, основанный на учёте знаков, составляющих оценки коэффициента корреляции, обладает более высокой вычислительной эффективностью по сравнению с традиционными алгоритмами классификации. Его применение позволяет обойти проблему экспертного назначения порогов на показатели спектральных признаков, что свойственно методам, использующих нормализованные разностные вегетационные индексы, например, NDVI, GNDVI, BNDVI, NDII.

Полученные результаты используются при разработке двухуровневой системы декомпозиции данных дистанционного зондирования, которая учитывает зависимости между многомерными спектральными признаками и их количественными значениями. При

синтезе структуры на первом её уровне декомпозиция исходных данных осуществляется на основе суммы составляющих оценок коэффициентов корреляции между неповторяющимися парами спектральных признаков. Полученные выборки наблюдений случайных величин на втором уровне структуры разбиваются на классы с использованием алгоритма автоматической классификации.

Эффективность предлагаемых методов структурного анализа данных дистанционного зондирования подтверждается результатами дешифрирования космического снимка участка лесного массива, повреждённого сибирским шелкопрядом.

Основные публикации по разделу:

1. Лапко А.В., Лапко В.А., Шаруева А.В. Непараметрический алгоритм распознавания образов в задачах анализа данных дистанционного зондирования антропогенных территорий // Автометрия. 2025. Т. 61, № 1. С. 87 – 97. DOI: 10.15372/AUT20250111. EDN: LAETBS.
2. Лапко А.В., Лапко В.А., Им С.Т. Декомпозиция спектральных признаков дистанционного зондирования на основе составляющих коэффициента корреляции // Автометрия. 2025. Т. 61. № 3. С. 28-36. DOI: 10.15372/AUT20250303. EDN: FZVCXO.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание традиционных числовых характеристик многомодальных законов распределения одномерной случайной величины в условиях статистических данных большого объёма // Измерительная техника. 2025. Т. 74, №2. С. 47–54. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-2-47-54
4. Лапко А. В., Лапко В. А., Им С. Т., Юронен Ю. П. Модифицированный метод структурного анализа данных дистанционного зондирования // Измерительная техника. 2025. Т. 74, №6. С. 4–12. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-4-12
5. Лапко А.В., Лапко В.А. Методика оценивания информативности аргументов непараметрической модели стохастической зависимости при их конкретных значениях // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2025. № 8. С. 23-26.
6. Лапко А.В., Лапко В.А. Методика синтеза двухуровневой системы декомпозиции области значений многомерной случайной величины // Информатика и системы управления. 2024. Т. 82, №4. С. 93 | 98. DOI: 10.22250/18142400_2024_82_4_93
7. Лапко А.В., Лапко В.А. Непараметрическая модель стохастической зависимости в условиях больших погрешностей измерений значений функции // Информатика и системы управления. 2025. Т. 83, №1. С. 135 | 145. DOI: 10.22250/18142400_2025_83_1_135

8. Лапко А.В., Лапко В.А. Непараметрический коллектив линейных аппроксимаций стохастической зависимости // Информатика и системы управления. 2025. Т. 84, №2. С. 63-72.
DOI: 10.22250/18142400_2025_84_2_63

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За отчетный период выполнен полный цикл исследований, запланированных по данному проекту. В ходе его выполнения получены результаты, приоритет которых подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Предложена комбинированная методика для мониторинга температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, интегрирующая данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников Landsat 8/9 (для получения температур поверхности воды на обширной акватории) и аналитическое моделирование на основе уравнения теплопроводности (для расчета температурного поля вдоль реки с учетом морфометрических характеристик, расхода воды и теплообмена с окружающей средой). Предложенный подход, где данные ДЗЗ могут использоваться в качестве исходных граничных условий для модели, а модель, в свою очередь, позволяет интерполировать и восполнять данные между редкими пунктами измерений, обладает значительным потенциалом для существенного повышения детальности и полноты пространственно-временного мониторинга гидротермического режима зарегулированной реки.

Создан специализированный информационно-измерительный комплекс для непрерывного круглогодичного мониторинга температуры воды в реке Енисей, включающий сеть дата-логгеров, установленных у плотины Красноярской ГЭС и на удалении от нее на 40 км – в центре Красноярска, что позволило получить уникальные многолетние данные с часовой дискретностью. На его основе определен специфический годовой ход температуры, характеризующийся относительно стабильным зимним периодом (постепенное охлаждение с 2,5°C до 2,0°C с января по март) и прохладным летним прогревом до 6-7°C. Впервые зафиксированы и проанализированы нерегулярные внутрисезонные колебания температуры воды значительной амплитуды (от 4,5°C до более 8°C) в период с конца июля по начало ноября, которые, вероятно, связаны с динамическими процессами в водохранилище (дестабилизация стратификации, внутренние волны, синоптические воздействия). Исследован суточный ход температуры воды.

На примере соленого стратифицированного озера Шира (Хакасия, Россия) с использованием адаптированной и валидированной трехмерной численной модели ROMS (Regional Ocean Modeling System) детально исследована динамика внутренних волн бассейнового масштаба, индуцированных ветровым воздействием. Установлено, что после ветрового воздействия в озере возбуждаются бассейновые внутренние сейши (стоячие волны) двух типов, чья пространственная структура и период определяются направлением ветра. Численное моделирование выявило хорошее согласование с натурными данными по

периодам и амплитудам колебаний, а также противофазность внутренних волн и колебаний свободной поверхности.

В результате применения дисперсионного анализа к данным зообентоса реки Енисей установлена статистически значимая взаимосвязь между типом донного субстрата и биоиндикационными показателями качества воды: тип грунта объясняет от 6% до 40% вариации значений индексов. Наилучшее качество вод, характеризующееся максимальными значениями индексов видового разнообразия (n , H) и биотических индексов (FBI, BMWP, ASPT, IBGN), зафиксировано на чистых твёрдых грунтах (песчано-галечная смесь), а наихудшее – на мягких песчаных субстратах. Результаты подтверждают, что при оценке экологического состояния водотоков на основе зообентоса необходимо учитывать тип грунта как ключевой абиотический фактор.

В результате исследования зообентоса водотоков национального парка «Красноярские Столбы» было выявлено 104 вида донных беспозвоночных, преимущественно насекомых, и установлено, что ключевыми факторами, определяющими их распределение и численность, являются температура воды, а также гидроморфологические параметры водотоков – скорость течения, длина и уклон русла; при этом тип донного субстрата и принадлежность к конкретному речному бассейну оказывают менее выраженное влияние, а анализ подтвердил, что температурный фактор является главным лимитирующим элементом, что подчеркивает его важность для мониторинга климатических изменений в уязвимых горных экосистемах.

Разработан и успешно апробирован методический подход для пространственного анализа и кластеризации территории на основе иерархии элементарных водосборных бассейнов, которые можно устойчиво группировать по набору ключевых признаков: стабильные географические характеристики (морфометрия, растительность, почвы) и многолетние динамические климатические данные. Предложенная методика показала свою эффективность для выделения однородных территориальных единиц, что может быть использовано для задач оптимизации природопользования.

Разработанная и постоянно модернизируемая «Система мониторинга воздуха КНЦ СО РАН», основанная на сети датчиков, метеостанций и специализированного оборудования, а также на аналитическом геопортале, позволила получить новые научные данные о закономерностях загрязнения атмосферы Красноярска. Ключевым практическим результатом на основе анализа собранных данных стало выявление и официальное подтверждение определяющего вклада автономных источников теплоснабжения (в частности, печного отопления на буром угле) в загрязнение воздуха, что привело к принятию властями края

конкретных решений по замене устаревших котлов и законодательному ограничению использования низкокачественного твердого топлива для предприятий.

Разработан унифицированный программный интерфейс (API) для гибкого и безопасного доступа к архиву данных мониторинга атмосферы Красноярска, который позволяет безопасно получать данные через веб-сервисы. Интерфейс, основанный на REST и JSON, предоставляет возможность создания индивидуальных наборов данных, объединяющих информацию с различных площадок наблюдения, позволяет настраивать единицы измерения, глубину архива и уровень агрегации, а также контролировать доступ пользователей к информации. Он обеспечивает удобное и контролируемое использование данных в сторонних аналитических приложениях.

Разработан алгоритм, который на основе регрессионного анализа данных выявляет минимально необходимый набор датчиков в сети мониторинга воздуха (на примере PM_{2.5} в Красноярске), позволяющий определить минимально достаточную конфигурацию датчиков, которая сохраняет полноту информации, сравнимую с исходной сетью. В результате выявлены ключевые датчики, чьи показания независимы и необходимы для описания общей картины загрязнения. Итоговый минимальный достаточный набор находится как решение задачи о минимальном вершинном покрытии графа зависимостей.

Сравнение данных глобальной модели NCEP GFS с инструментальными измерениями в Красноярске в зимний период показало, что модель GFS в целом удовлетворительно воспроизводит метеоусловия, важные для анализа загрязнения воздуха, но с систематическими отклонениями. Модель хорошо передает вертикальные профили температуры, особенно на высотах от 300 м, однако в приземном слое (50 м) завышает температуру на несколько градусов. Она адекватно фиксирует количество дней с температурными инверсиями, но занижает долю приподнятых инверсий и завышает долю приземных. В целом, данные GFS репрезентативны для анализа крупномасштабных процессов и могут использоваться как дополнение к натурным измерениям.

В результате исследования зимних температурных инверсий в Красноярске за 2022-2024 гг. установлено, что при слабом ветре (<2 м/с) формируются два основных типа инверсий: радиационные (преимущественно приземные) и адвективные (преимущественно приподнятые). Радиационные инверсии возникают при ясной погоде, а адвективные – при натекании тёплого воздуха в антициклонах. Наибольшее влияние на загрязнение воздуха частицами PM_{2.5} оказывают приземные и слабо приподнятые инверсии (с нижней границей ниже 100 м) интенсивностью более 5°C, которые «запирают» выбросы в котловине города, приводя к концентрациям PM_{2.5}, многократно превышающим предельно допустимые нормы.

В результате двухлетнего синхронного мониторинга вертикальных температурных профилей над городской застройкой Красноярска и акваторией Енисея установлено наличие сезонно-зависимого контраста: в приземном слое (0–200 м) зимой воздух над городом холоднее, чем над рекой (отрицательная разница ΔT), а летом – теплее (положительная ΔT); выше 200 м эта закономерность инвертируется – зимой воздух над городом становится теплее, а летом холоднее, чем над рекой. Это доказывает, что влияние «острова тепла» и охлаждающего эффекта реки имеет сложную вертикальную структуру и меняется в зависимости от сезона, что необходимо учитывать при моделировании локального климата и распространения загрязнений.

Для прогнозирования уровня загрязнения воздуха частицами PM_{2.5} в Красноярске была разработана и испытана нейросетевая модель на основе долгой краткосрочной памяти (LSTM). Модель показала наивысшую точность по сравнению с другими методами (регрессия, ARIMA, ансамблевые модели), особенно после разделения данных по сезонам, что улучшило прогноз на 30-40% зимой. Точность модели была дополнительно повышена за счет учета метеорологических параметров, критически важных для города с частыми зимними температурными инверсиями. Программный комплекс на основе этой модели внедряется в систему мониторинга Красноярска и может быть адаптирован для других промышленных городов.

Разработаны и обоснованы технологические решения для мониторинга и управления безопасностью территорий, ключевым результатом которых является создание адаптивной модели организации взаимодействия и соответствующих паттернов (шаблонов) работы с данными. Для преодоления типичных управленческих ошибок предложено использовать сценарное моделирование и заранее согласованные планы действий на основе качественных данных. Ключевым результатом является проектирование единого масштабируемого информационного пространства на основе технологии "озер данных" с системами управления метаданными.

Разработана и апробирована методика управления эвакуацией для общественных зданий массового пребывания (на примере Эрмитажа) на основе математического моделирования, которая позволяет создавать безопасные планы эвакуации при различных сценариях пожара. Методика включает расчет времени эвакуации и анализа опасных факторов пожара для определения допустимой численности людей), выявления проблемных зон с критическими скоплениями и разработки конкретных маршрутов. Ключевым результатом является доказательство необходимости активного управления эвакуацией персоналом, а не только техническими средствами, что было успешно проверено в ходе тренировочной эвакуации, подтвердившей адекватную реакцию людей и реализуемость предложенных схем.

Разработан новый непараметрический метод автоматической классификации данных дистанционного зондирования, основанный на структурной декомпозиции по корреляционным признакам. Основной результат заключается в создании методики, которая на первом уровне разделяет данные на группы по знакам компонент обобщённого показателя корреляции между спектральными каналами, что эффективно выделяет статистически различные классы без экспертного задания порогов, а на втором уровне подвергает эти группы дополнительной классификации традиционными алгоритмами для уточнения. Разработанный метод показал высокую вычислительную эффективность и успешно применен для дешифрирования участка леса, поврежденного сибирским шелкопрядом, по данным Landsat-8.

Практическая значимость настоящего проекта заключается в формировании научной основы для эффективного управления природными ресурсами региона. В рамках исследования разрабатываются методы и инструменты (включая программное обеспечение) для информационной поддержки принятия решений. Ключевые направления – это количественная оценка состояния экосистем и организация системы экологического мониторинга. Важнейшим прикладным результатом является открытая платформа для оперативного информирования жителей Красноярска и края о динамике качества атмосферного воздуха.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования

1. Витова Т.Б., Кирик Е.С. Исследование динамического пространства пешеходов с помощью диаграммы Вороного // Вычислительные технологии. 2025. Т. 30. № 3. С. 23-36. DOI: 10.25743/ICT.2025.30.3.003
2. Кирик Е.С., Витова Т.Б., Богданов А.В., Сушкова О.В. Эвакуация при пожаре в музее: подготовка и проведение тренировочных эвакуаций с использованием численного моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2024. № 4. С. 70-88. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-2024-4-70-88
3. Матузко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 346-356. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356
4. Лапко А.В., Лапко В.А., Им С.Т. Декомпозиция спектральных признаков дистанционного зондирования на основе составляющих коэффициента корреляции // Автометрия. 2025. Т. 61. № 3. С. 28-36. DOI: 10.15372/AUT20250303
5. Лапко А.В., Лапко В.А. Методика оценивания информативности аргументов непараметрической модели стохастической зависимости при их конкретных значениях // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2025. № 8. С. 23-26. DOI: 10.36535/0548-0027-2025-08-2
6. Лапко А.В., Лапко В.А. Оценивание традиционных числовых характеристик многомодальных законов распределения одномерной случайной величины в условиях статистических данных большого объема // Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 2. С. 47-54. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-2-47-54
7. Ничепорчук В.В., Кобыжакова С.В. Технология цифровизации управления безопасностью территорий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 1 (37). С. 104-113. DOI: 10.25729/ESI.2025.37.1.010
8. Nicheporchuk V.V., Korobko A.V. Method of increasing data maturity for territorial safety management // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 3.1 С. 637-647. DOI: 10.53921/18195822 2025 25 3.1 637
9. Малимонов М.И., Заворуев В.В., Якубайлик Т.В., Якубайлик О.Э. Программно-технологическое обеспечение для мониторинга температурных инверсий и загрязнения атмосферы Красноярска // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. № 6(64). С. 179-184.

10. Лапко А.В., Лапко В.А. Непараметрический коллектив линейных аппроксимаций стохастической зависимости // Информатика и системы управления. 2025. № 2 (84). С. 63-72. DOI: 10.22250/18142400_2025_84_2_63
11. Арсланов А.М., Сибирко В.И., Мартынов В.А., Ничепорчук В.В. Техногенные и природные чрезвычайные ситуации в Российской Федерации за 2024 год // Пожарная безопасность. 2025. № 1(118). С. 131-133. EDN: GYUJJR.
12. Лапко А.В., Лапко В.А., Им С.Т., Юронен Ю.П. Модифицированный метод структурного анализа данных дистанционного зондирования // Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 6. С. 4-12. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-4-12
13. Лапко А.В., Лапко В.А., Шаруева А.В. Непараметрический алгоритм распознавания образов в задачах анализа данных дистанционного зондирования антропогенных территорий // Автометрия. 2025. Т. 61. № 1. С. 87-97. DOI: 10.15372/AUT20250111

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности

1. Токарев А.В. Программа для визуализации и анализа метеорологических характеристик атмосферы и данных по ее загрязнению частицами PM_{2.5} // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683032 от 29 августа 2025 г.
2. Кадочников А.А. Программа расчета данных GFS, GPM и спутниковой съемки для площадных объектов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682984 от 29 августа 2025 г.
3. Матушко А.К., Зайцев Н.Е., Гостева А.А. USGS LST Loader // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682985 от 29 августа 2025 г.
4. Матушко А.К., Якубайлик О.Э., Гостева А.А. Набор значений дневной температуры поверхности Земли по данным MOD11A2V6 на территорию города Красноярска за период 2000–2022 гг. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623558 от 29 августа 2025 г.
5. Володько О.С., Лев Н.А. Программный комплекс для прогнозирования величины концентрации PM_{2.5} в атмосферном воздухе г. Красноярска на основе нейросетевой модели временных рядов LSTM. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682974 от 29 августа 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях

1. Volodko O.S., Lemeshkova E.N. Vertical Structure of Internal Seiches in a Stratified Lake // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2025. V. 18. № 5. P. 687-693. EDN: QUUJVU
2. Volodko O., Lemeshkova E. The dynamic of internal waves in Lake Shira // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2025. V. 13, Issue 3, P. 61-77. EDN: QVTBOO, DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2025056654
3. Vitova T., Kirik E. Personal space of people in movement under different conditions // Lecture Notes in Computer Science. 2025. V. 15581. P. 345-355. DOI: 10.1007/978-3-031-85703-4_24
4. Лапко А.В., Лапко В.А. Непараметрическая модель стохастической зависимости в условиях больших погрешностей измерений значений функции // Информатика и системы управления. 2025. № 1 (83). С. 135-145. DOI: 10.22250/18142400_2025_83_1_135.
5. Petrakova V., Karepova E. Algorithm for segmentation of multimodally distributed time series in accordance with their modes // Journal of Computational Science, 2026. Vol. 94. 102765. DOI: 10.1016/j.jocs.2025.102765
6. Karepova E., Shan'ko Yu., Tokarev A., Petrakova V. Temporal patterns of instrumentation failures in atmospheric boundary layer observational systems // E3S Web of Conferences. 2025. V. 646, article 00011. DOI: 10.1051/e3sconf/202564600011
7. Полетаев А.Н., Гончаренко В.С., Журавлев Ю.Ю., Кирик Е.С., Нестеров М.Ю. Статистические данные по частотам возникновения пожаров на различных производственных и складских объектах в РФ // Пожаровзрывобезопасность. 2025. Т. 34. № 4. С. 42-61. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.42-61
8. Zavoruev V.V., Dergunov A.V., Krasnoshchekov K.V., Yakubailik O.E. A Measurement Complex for Studying the Thermophysical Characteristics of the Yenisei River Downstream of the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station Dam // Technical Physics. 2025. V. 70. No. 12. DOI: 10.1134/S1063784225700550.
9. Yakubailik O.E., Zavoruev V.V., Iakubailik T.V. Measurement and Analysis of Vertical Temperature Profiles of the Atmosphere over the Yenisei River and the Urbanized Area of Krasnoyarsk // Technical Physics. 2025. V. 70. No. 12. DOI: 10.1134/S1063784225700549.
10. Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Информационно-аналитическое обеспечение региональных систем мониторинга природной среды // В сборнике: Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2025). Сборник трудов X Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика Ю.И. Шокина. Новосибирск, 2025. с. 32-35

11. Володько О.С., Лев Н.А., Полянчикова Д.В. Нейросетевая модель временных рядов для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска // В сборнике: Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2025). Сборник трудов X Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика Ю.И. Шокина. Новосибирск, 2025. с. 51-53
12. Ничепорчук В.В., Чернякова Н.А. Метод информационной поддержки решения сложных задач управления безопасностью территорий // В сборнике: Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2025). Сборник трудов X Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика Ю.И. Шокина. Новосибирск, 2025. с. 129-133.
13. Володько О.С., Лев Н.А., Полянчикова Д.В. Нейросетевая LSTM-модель с сезонным разделением данных для прогнозирования концентрации PM_{2.5} в атмосфере г. Красноярска // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы XII Международ. науч. конф. Красноярск, 9–12 сентября 2025 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 50-53.
14. Заворуев В.В., Якубайлик О.З., Соколова О.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Температурный режим реки Енисей в черте города Красноярска в 2023-2024 годах // Енисейская теплофизика: тез. докл. Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 187-188.
15. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Якубайлик Т.В., Соколова О.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Температура воздуха в 90 сантиметровом слое над поверхностью воды реки Енисей // Енисейская теплофизика: тез. докл. Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 189-191.
16. Якубайлик О.Э., Заворуев В.В., Дергунов А.В. Сравнение интенсивности температурных инверсий по данным модели NCEP GFS и инструментальных измерений // Енисейская теплофизика: тез. докл. Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 238-239.
17. Якубайлик Т.В., Заворуев В.В., Якубайлик О.Э. Особенности распределения температурных профилей в нижнем 1000-метровом слое атмосферы в центральной части города Красноярска // Енисейская теплофизика: тез. докл. Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 244-245.
18. Якубайлик О.Э., Заворуев В.В., Якубайлик Т.В. Влияние зимних туманов над рекой Енисей на вертикальное распределение температуры // Енисейская теплофизика: тез. докл.

- Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. – С. 255-256.
19. Малимонов М.И., Якубайлик О.Э. Разработка веб-приложений для обработки и анализа данных температурного профилера // Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем: Материалы XXVIII Всероссийского семинара / Под ред. О.Э. Якубайлика; отв. за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2025. – С. 84-90.
 20. Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Сенашова М.Ю. Кластеризация водосборов четырех рек красноярского края на основе ДЗЗ // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXXIII Всероссийского семинара, 26 сентября 2025 года / Под ред. О.Э. Якубайлика, отв. за вып. М.Ю. Сенашова. – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2025. С. 42-55.
 21. Петракова В.С., Кареева Е.Д. Алгоритм сегментации мультимодального временного ряда в соответствии с модами его распределения // Решетневские чтения: материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева (10–14 ноября 2025, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2025. – Ч. 2. – С. 122-124.
 22. Кареева Е.Д., Петракова В.С. Алгоритм извлечения унимодально распределенных выборок из мультимодально распределенного ряда // Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем: Материалы XXVIII Всероссийского семинара / Под ред. О.Э. Якубайлика; отв. за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2025. – С. 54-61.
 23. Шехова А.А., Кареева Е.Д., Садовский М.Г. Подходы к анализу результатов alignment-free метода сравнения символьных последовательностей // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVIII): тезисы докладов (Красноярск, 17 апреля 2025 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2025. – с. 120.
 24. Шехова А.А., Кареева Е.Д., Шанько Ю.В. Решение задачи локализации гомологичных участков при сравнении символьных последовательностей // Тезисы XXVI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: Сборник тезисов, Новосибирск, 10–14 ноября 2025 года. – Новосибирск: Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 2025. – С. 79.
 25. Дергунов А.В. Сравнение метеоданных инструментальных измерений и рассчитанных по модели NCEP GFS в Красноярске // Междисциплинарная конференция молодых

- ученых ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVIII): тезисы докладов (Красноярск, 17 апреля 2025 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2025. С. 19.
26. Гравит М.В., Козулица И.С., Кирик Е.С. Оценка сохранности картин при воздействии опасных факторов пожара в музеях и выставочных залах // Полимерные материалы пониженной горючести: сборник тезисов XII Международной конференции (9-12 сентября 2025 г.) / Под. общ. ред. Э.М. Идрисова. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. – С. 463-464.
27. Кирик Е.С. Расчетное обоснование эффективности мер, направленных на обеспечение безопасных условий эвакуации // Научно-практическая конференция «Федеральный государственный пожарный надзор» посвящённая 35-летию МЧС России. – Москва, Академия ГПС МЧС России, 9 октября 2025 г.
28. Кирик Е.С. Примеры применения математического моделирования для обоснования эффективности решений в области пожарной безопасности // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Пожарная безопасность объектов капитального строительства. Нормативы, проектирование, устройство и эксплуатация». – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 20 ноября 2025 г.
29. Бабий И.А., Водневская В.С., Ждановский М.Н., Мамышев Р.Ш., Лапко В.А. Применение метода структурного анализа данных дистанционного зондирования при исследовании тестового участка Бурлинского ленточного бора // Актуальные вопросы научных исследований в условиях формирования многополярного мира: сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с международным участием (27 августа 2025 г, г. Оренбург). – Уфа: Omega Science, 2025. – С. 26-30.
30. Лапко А.В., Лапко В.А. Методика структурного анализа данных дистанционного зондирования, основанная на исследовании составляющих компоненты коэффициента корреляции // Решетневские чтения: материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева (10–14 ноября 2025, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2025. – Ч. 1. – С. 753-756.
31. Лапко А.В., Лапко В.А. Двухуровневая методика структурного анализа спектральных данных дистанционного зондирования // Решетневские чтения: материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева (10–14 ноября 2025, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2025. – Ч. 1. – С. 757-760.

32. Ничепорчук В.В. Алгоритмизация управления территориальными рисками // Международная научно-практическая конференция «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций» (22-24 октября 2025 г.) – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС.
33. Коробко А.В., Ничепорчук В.В. Интеллектуальный метод для управления данными о безопасности территорий // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2025): материалы XI международной конференции и молодежной школы (г. Самарканд, Узбекистан, 7-9 октября 2025 г.) – Самара: Издательство Самарского университета, 2025. 041282.
34. Ничепорчук В.В. Интеллектуальные сервисы территориального управления безопасностью // Материалы XXXIII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (9 декабря 2025 г.) – Москва, ИПУ РАН. – С. 398-403.
35. Ничепорчук В.В. Подходы к решению сложных задач управления безопасностью территорий // Решетневские чтения: материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева (10–14 ноября 2025, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2025. – Ч. 2. – С. 197-199.