

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 № 121081900117-5
Рег. № ИКРБС

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

_____ А.А. Шпедт
«18» января 2023 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, СРЕДСТВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО И
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, СЕРВИСОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ И ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА
(промежуточный)

Направление фундаментальных исследований:
1.2.1. Компьютерные, информационные науки и биоинформатика
(№ FWES-2021-0004)

Руководитель НИР,
заместитель директора
обособленного подразделения по
научной работе,
к.ф.-м.н.

_____ О. Э. Якубайлик

Красноярск 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы зам. директора по научной работе ИВМ СО РАН, к.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	О.Э. Якубайлик (Разделы 1, 2)
зав. отд., к.б.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.В. Андрианова (Раздел 1)
г.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Н.Я. Шапарев (Раздел 1)
в.н.с., д.б.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	В.В. Заворуев (Раздел 1)
в.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	М.Г. Садовский (Раздел 1)
с.н.с., к.т.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.А. Гостева (Раздел 2)
с.н.с., к.т.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	М.Г. Ерунова (Раздел 1)
с.н.с., к.т.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.А. Кадочников (Раздел 2)
с.н.с., к.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Е.С. Кирик (Раздел 3)
с.н.с., к.т.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	В.В. Ничепорчук (Раздел 3)
с.н.с., к.б.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Г.В. Макарская (Раздел 1)
с.н.с., к.т.н.	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.В. Токарев (Раздел 2)

Н.С., К.Т.Н.

(подпись, дата)

Т.Б. Витова

(Раздел 3)

Н.С., К.Ф.-М.Н.

(подпись, дата)

Т.В. Якубайлик

(Раздел 1)

М.Н.С.

(подпись, дата)

А.К. Матузко

(Раздел 1)

Нормоконтроль

(подпись, дата)

Вяткин А.В.

РЕФЕРАТ

Отчёт 88 с., 51 рис., 4 табл., 3 прил.

ЭКОСИСТЕМА, ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ, ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ВЕБ-СИСТЕМЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ, БИОИНДИКАЦИЯ, ЕНИСЕЙ, ГЕОПОРТАЛ, МОНИТОРИНГ ВОЗДУХА, ВЗВЕШЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ, УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ, ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Основной целью и содержанием исследований по настоящему проекту является создание новых методов и технологий комплексного анализа и оценки состояния сложных природных и антропогенных экосистем, разработка необходимых для этого физико-математических и геоинформационных моделей, информационно-аналитических систем и сервисов, алгоритмов и программ для распределенной обработки больших массивов данных и высокопроизводительных вычислений, средств интеллектуальной поддержки принятия решений в области рационального природопользования и управления безопасностью территорий.

Выполнение работ основано на применении современных методов математического анализа и обработки данных, проектирования и разработки информационно-вычислительных технологий и программного обеспечения.

Теоретические и практические результаты проекта обеспечивают развитие региональных систем экологического мониторинга, формирование инфраструктуры пространственных данных и ГИС-технологий, создание и развитие новых подходов, методов и алгоритмов обработки и анализа данных. Практическая значимость результатов исследований направлена на эффективную организацию природопользования, информационно-аналитическое обеспечение решения актуальных управленческих задач.

Результаты исследований опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, разработанное программное обеспечение стало технологической основой для ряда региональных информационных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ, ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ	9
1.1. Геопространственное моделирование природных и антропогенных экосистем.....	9
1.2. Методы многомерного статистического анализа природных объектов	15
1.3. Летний гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС ..	25
1.4. Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей	27
1.5. Анализ загрязнения атмосферы по спутниковой информации и данным реанализа	30
1.6. Оценка экологического статуса водоемов с разной степенью антропогенной нагрузки методами биоиндикации.	34
1.7. Биометрический анализ данных по структурной и пространственно-временной организации гидробиологических сообществ	38
2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ (ГЕОПОРТАЛОВ) МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	42
2.1. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН	42
2.2. Формирование региональной геопространственной базы данных по температуре и осадкам на основе спутниковой информации и климатических моделей	45
2.3. Программное обеспечение для визуализации данных метеорологического температурного профилемера	48
2.4. Разработка приборной базы для регистрации метеорологических параметров и загрязнения атмосферы взвешенными частицами на базе БПЛА	51
2.5. Информационная система для сбора и анализа данных о параметрах атмосферы с приборов, размещенных на БПЛА	55
2.6. Анализ взаимосвязи между загрязнением атмосферы Красноярска и температурными инверсиями по данным реанализа NCEP GFS.....	58
2.7. Анализ концентраций взвешенных частиц над территорией Красноярска и акваторией незамерзающей реки Енисей.....	62
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕРВИСОВ	68
3.1. Проектирование системы поддержки принятия решений по защите территорий при чрезвычайных ситуациях природного характера	68

3.2. Разработка и тестирование «быстрых» алгоритмов пространственного преппроессинга для моделирования мультиагентных потоков	72
3.3. Методы распараллеливания при моделировании пешеходного движения людей	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности	84
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях	85

ВВЕДЕНИЕ

В представленном отчете содержатся результаты научных исследований и разработок, выполненных в проекте в 2022 году.

Настоящий проект посвящен исследованиям различных аспектов создания математического и программно-технологического обеспечения для систем мониторинга и оценки состояния природной среды. Актуальность этого направления обусловлена стремительным ростом объемов геопространственной информации, связанной с развитием сетей передачи данных (расширением зон покрытия и увеличением скорости сети Интернет) и мобильных устройств (смартфонов и планшетов), массовым распространением дешевых датчиков, измеряющих различные характеристики окружающей среды (метеоданные, загрязнение воздуха, и т.п.), все большей доступностью спутниковой информации с хорошим пространственным разрешением, ростом популярности БПЛА (дронов), и проч.

Благодаря внедрению нового поколения систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и суперкомпьютерных вычислений появились новые наборы климатических и экологических данных с высоким уровнем детализации. Возросшие скорости Интернета, массовое распространение доступных мобильных устройств и дешевых датчиков/дата-логгеров различных типов в сочетании с прогрессом в области веб-технологий, быстрой разработки веб-приложений сформировали основу систем ввода геопозиционированных данных различного тематического содержания, оперативного цифрового мониторинга. Экспертные оценки показывают, что за 3-5 лет объем доступной геоинформации увеличивается как минимум на порядок. При этом следует подчеркнуть, что этот рост носит как количественный, так и качественный характер. Сегодня появляются все новые методы и инструменты, позволяющие снимать, регистрировать, хранить и обрабатывать показатели, ранее недоступные для исследования, причем в режиме реального времени. Все это делает задачу построения математических моделей и инструментов многомерного нелинейного анализа обширных данных крайне актуальной и востребованной. Также становится очевидным, что эффективное решение задач анализа природных и антропогенных экосистем сегодня невозможно без соответствующих инструментов хранения, представления и интеллектуальной обработки данных. Акценты все больше смещаются в сторону специализированных сервер-ориентированных/облачных решений. Разработка приложений как правило осуществляется по модульному принципу на основе сервис-ориентированного подхода и веб-технологий, в распределенной архитектуре, на основе мультиагентного подхода. Рассматриваемый проект в полной степени соответствует указанным трендам. В его рамках предполагается разработка информационно-вычисленной среды для обеспечения решаемых задач, набора сервисов разного типа, ориентированных на разные функциональные подзадачи – от сложной

обработки спутниковых снимков на высокопроизводительном кластере до простой картографической веб-визуализации на планшете.

Актуальность рассматриваемого подхода связана с потенциальными приложениями результатов исследований. Характерной чертой и одной из проблем современных систем социально-экономического и экологического мониторинга стало повышенное внимание к ним общественности, рост потребности простого и быстрого доступа к исходным данным. Веб-технологии, связанные с социальными сетями, кооперативно создаваемыми картографическими ресурсами, различными облачными сервисами, помогают выводить информационное обеспечение рассматриваемого класса задач на принципиально новый уровень.

Представленные в этом отчете результаты научно-исследовательских работ – логичное продолжение ранее начатых исследований, связанных с решением актуальных задач оценки состояния природной среды, физико-математическим моделированием протекающих процессов и явлений, разработкой соответствующего программно-технологического, информационно-вычислительного обеспечения на основе геоинформационных веб-систем. Значительное внимание уделяется решению задач повышения эффективности управления безопасностью территорий за счет создания программно-технологической платформы интеллектуальной обработки данных комплексного мониторинга факторов чрезвычайных ситуаций, новых принципов организации информационных ресурсов, поддержки принятия управленческих решений. Рассматривались задачи создания «быстрых» моделей, алгоритмов и прикладных программ для симуляции и анализа мультиагентных потоков для решения крупномасштабных задач, связанных с обеспечением безопасности людей на территориях цифровой экономики. Все перечисленные заделы получили развитие в работах отчетного периода.

Основные результаты исследований сгруппированы по трем направлениям:

- Методы и модели, технологии комплексного анализа и оценки состояния сложных природных и антропогенных экосистем;
- Формирование информационно-вычислительного обеспечения для геоинформационных веб-систем (геопорталов) мониторинга и оценки состояния окружающей среды;
- 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. Геопространственное моделирование природных и антропогенных экосистем

Геопространственное моделирование и анализ – это процесс поиска пространственных закономерностей в распределении географических данных, поиска взаимосвязей между географическими объектами; это инструменты для изучения событий, структур и процессов, которые происходят на земле или вблизи поверхности нашей планеты. В результате анализа географической информации получается качественно новая информация и выявляются прежде неизвестные закономерности.

Применительно к задачам оценки состояния природной среды главной практической целью геосистемного мониторинга является своевременное выявление негативных изменений геосистем и экосистем локального и регионального уровней. Слежение должно проводиться за состоянием трех важнейших групп геосистем и экосистем: природных (с естественным режимом), природно-антропогенных (прежде всего сельскохозяйственных и лесохозяйственных) и антропогенных (например, городских территорий).

Экосистемы – это сложные целостные образования, обладающие общим набором компонентов природы, полиструктурностью, многообразием внешних и внутренних связей, динамичностью состояний, способностью к саморегулированию, иерархичностью. Для их описания принято использовать различные иерархические единицы физико-географического районирования – природные зоны, ландшафты, биогеоценозы, и проч.

В исследованиях экосистем сегодня широко применяются математические методы и современные информационные технологии, геоинформационные системы и веб-сервисы, данные дистанционного зондирования Земли и результаты их обработки. Для значительных по площади территорий Сибири использование космических снимков часто является единственным доступным инструментом для регулярного экологического мониторинга, основой геопространственной базы данных территории.

Всесторонний анализ пространственно-распределенных процессов окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требует определения элементарной сущности, которую необходимо принимать во внимание. Традиционно используемая единица – пиксель спутникового снимка – имеет ряд недостатков: пиксель не является естественным идентифицируемым элементом географического объекта, для анализа процессов в окружающей среде необходимо создание дополнительных моделей и структур данных, организация специализированных средств их обработки.

Альтернативным методом структуризации геоданных, основанным на естественно определенных объектах природной среды, может выступать бассейновый подход – деление

территории на элементарные водоразделы речных бассейнов, вычисляемое по детальной цифровой модели рельефа; этот подход демонстрирует высокую эффективность и осуществимость для ряда географических задач.

Использование бассейнового подхода позволяет реализовать многоуровневую иерархическую структуру данных по природно-ресурсным характеристикам территории в одном географическом пространстве. В качестве исходной информации используются различные по масштабу (пространственному разрешению) данные разного содержания. В частности, цифровой рельеф имеет пространственное разрешение примерно 70 м, данные о температуре поверхности земли, полученные радиометром MODIS – около 1 км, данные о состоянии растительного покрова – 250 м, и т.д. Бассейновый подход позволяет представить территорию в виде нескольких иерархически вложенных уровней, где верхний (первый) уровень – это уровень крупных рек, который включает в себя более детальный следующий уровень основных притоков этих рек, далее эти притоки включают мелкие речки, мелкие речки – включают небольшие ручьи, и т.д. В зависимости от масштаба используемых речных бассейнов на каждом уровне собираются природные характеристики соответствующего масштаба (детализации). Иерархически организованная система вложенных друг в друга речных бассейнов обеспечивает возможность привязки имеющихся данных о природных ресурсах к соответствующим, оптимальным по масштабу уровням детализации.

В результате проведенных исследований сформирована база данных набора природных характеристик – атрибутов иерархической системы водосборного деления, которая состоит из морфологических характеристик, характеристик растительного и почвенного покрова, каждый бассейн содержит значения (с шагом 8 дней) о температуре, выпавших осадков и вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI за несколько лет. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории, используя различные методы математического моделирования, статистического и кластерного анализа.

Чтобы организовать такую многоуровневую базу данных природных характеристик экосистемы в одном географическом пространстве использовались методы и технологии геоинформационного моделирования, которые представлены в стандартном программном обеспечении ГИС. В качестве пространственной топоосновы использовалась цифровая модель рельефа MERIT Hydrologically Adjusted Elevations. Примеры тематических карт, построенных по сформированным данным показаны на рисунке 1.

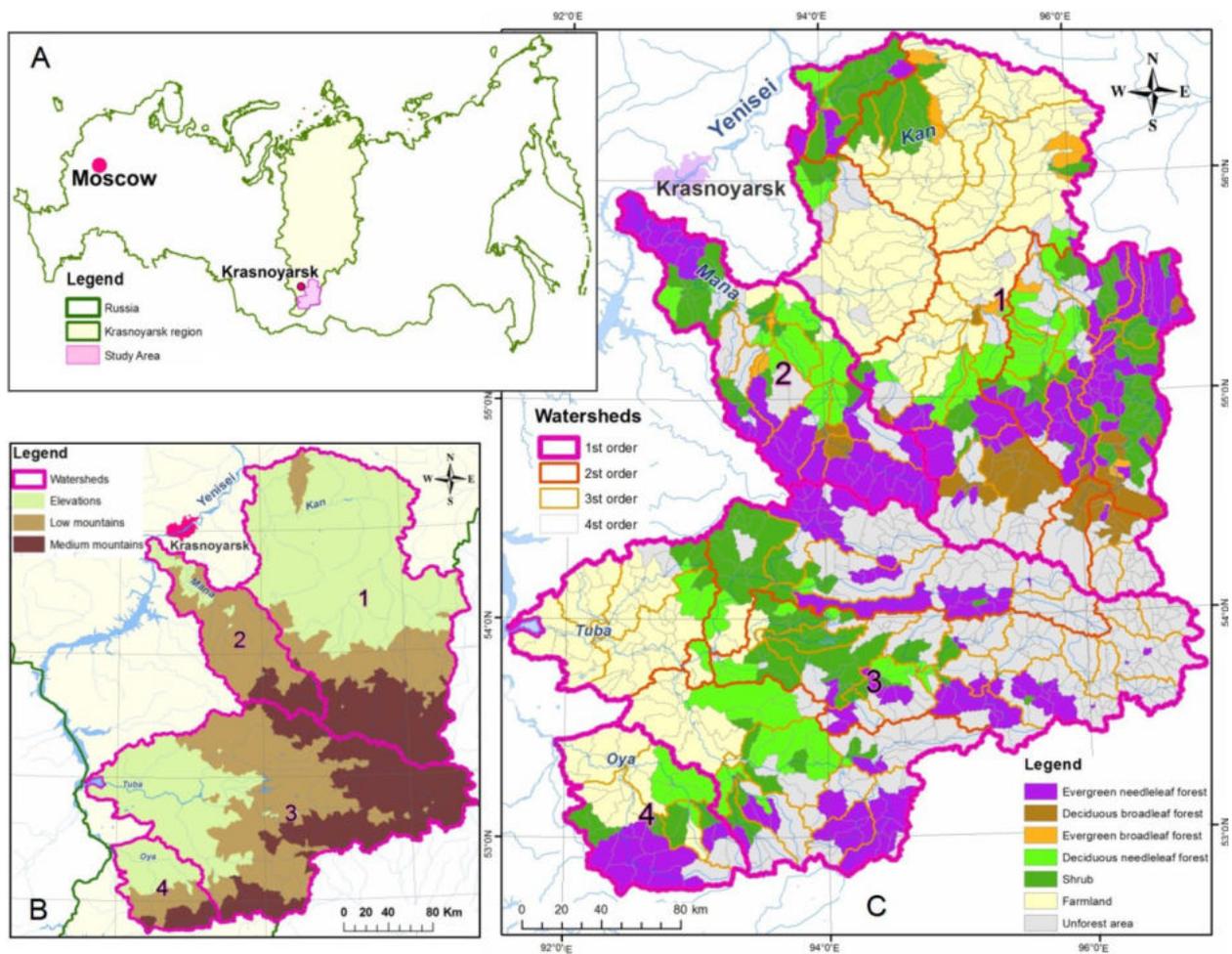


Рисунок 1 – Тематические карты водосборных бассейнов юга Красноярского края: А) область исследований, для которой сформирована иерархическая база данных, В) 4 основных водосборных бассейна исследуемой территории и рельеф местности, С) карта преобладающих видов растительности водосборных территорий.

Другим примером формирования интегрированной базы данных антропогенных экосистем являлась цифровая модель сельскохозяйственной территории, методически отработанная на примере ряда опытно-производственных хозяйств (ОПХ) ФИЦ КНЦ СО РАН – «ОПХ Минино», «ОПХ Михайловское», «ОПХ Курагинское». В данном случае анализировалась специфика формирования данных для объектов хозяйственного природопользования (сельскохозяйственных угодий). В качестве исходной картографической информации использовали результаты исследований опытно-производственных хозяйств, выполненные Восточносибирским государственным научно-исследовательским и проектно-изыскательским институтом по землеустройству, данные агрохимических обследований Государственного центра агрохимической службы «Красноярский», а также табличные данные о выращиваемых культурах, их урожайности и севооборотах за разные года.

Вся исходная табличная, графическая и картографическая информация по ОПХ ФИЦ КНЦ СО РАН была систематизирована, сформированы интегрированные геопространственные базы данных для каждого ОПХ, в составе которых набор цифровых тематических карт: карта полей, почвенная карта, тематические карты агрохимических характеристик почвы, географическая база (рельеф местности и гидрография), административно-пространственная структура, инфраструктура (дороги) (Рис. 2).

Ежегодно геопространственная база данных пополняется картами вегетационных индексов NDVI, VARI, CIGreen для каждого поля всех ОПХ, что позволяет оценивать сезонное изменение развития выращиваемых в хозяйствах сельскохозяйственных культур,

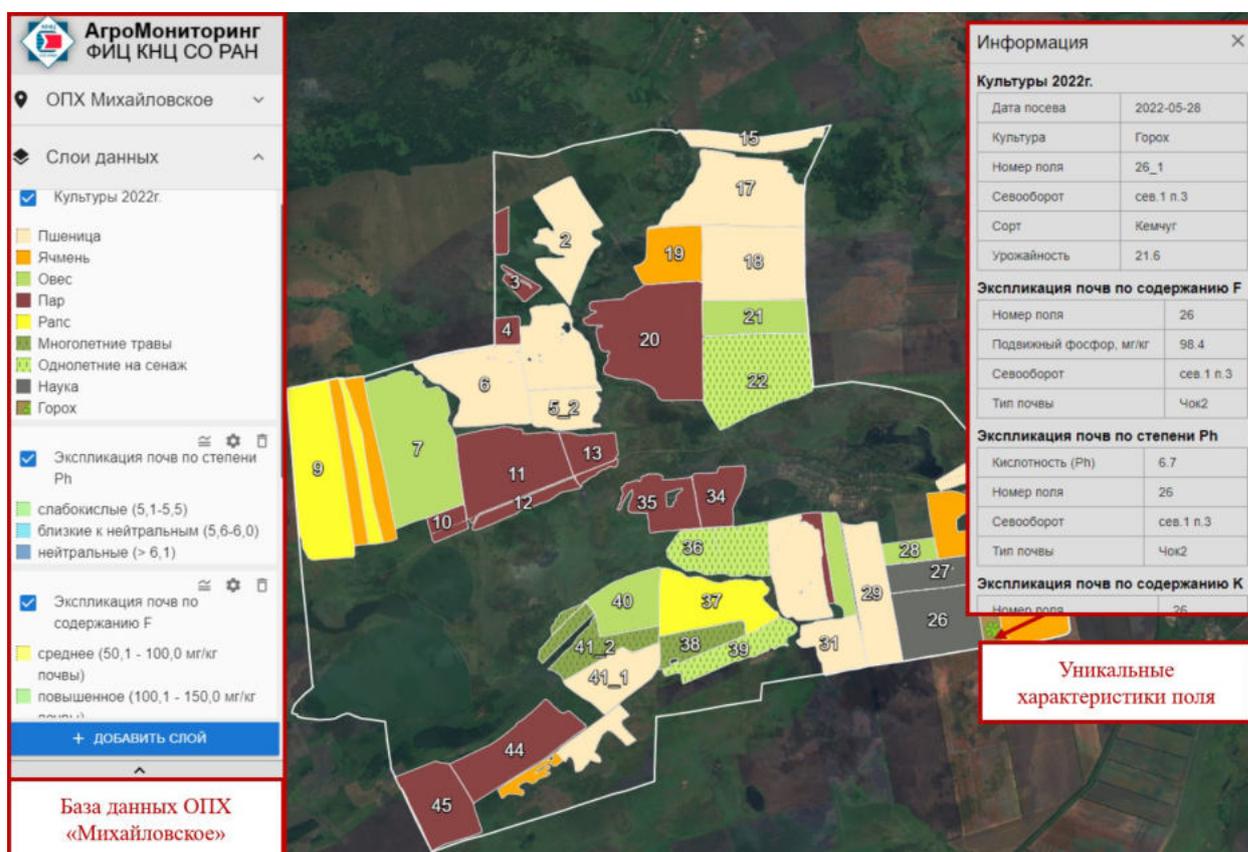


Рисунок 2 – Пример веб-интерфейса интегрированной базы данных антропогенной экосистемы ОПХ «Михайловское» на <http://gis.krasn.ru/agro/>.

Дополнительно в работе применялись данные дистанционного зондирования, компьютерных моделей и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). ДДЗ представлены несколькими спутниковыми группировками: PlanetScope, Sentinel-2 (A/B), Landsat 8/9 и Terra/Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). В качестве данных БПЛА выступает аэрофотосъемка мультиспектральной камеры MicaSense RedEdge-MX. При съемка этой камерой с высоты полета БПЛА в 120 метров формируется мультиспект-

ральное 5-канальное изображение с пространственным разрешением 8 см/рх. Для климатических показателей температуры и количества осадков применяют данные компьютерных моделей реанализа Global Forecast System (GFS) и NASA's Global Precipitation Measurement Mission (GPM) соответственно. На рисунке 3 показаны методы и технологии по созданию интегрированной базы данных опытно-производственных хозяйств ФИЦ КНЦ СО РАН.



Рисунок 3 – Данные и цифровые карты, формирующие интегрированной базы данных.

Основные технологии реализуются в геоинформационной системе QGIS, к ним относятся: векторизация бумажных материалов; актуализация цифровых карт; составление карт вегетационных индексов; статистический анализ; подготовка тематических карт. Обработка аэрофотосъемки проводится в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. Технология включает в себя: выравнивание снимков и их оптимизация по сенсору освещенности; построение и классификация плотного облака точек; подготовка цифровой модели рельефа (ЦМР) и ортофотоплана (Рис. 4). При составлении карт соблюдены требования, предъявляемые к картографическим материалам (выбор правильной картографической проекции, типовой легенды, и т.д.).

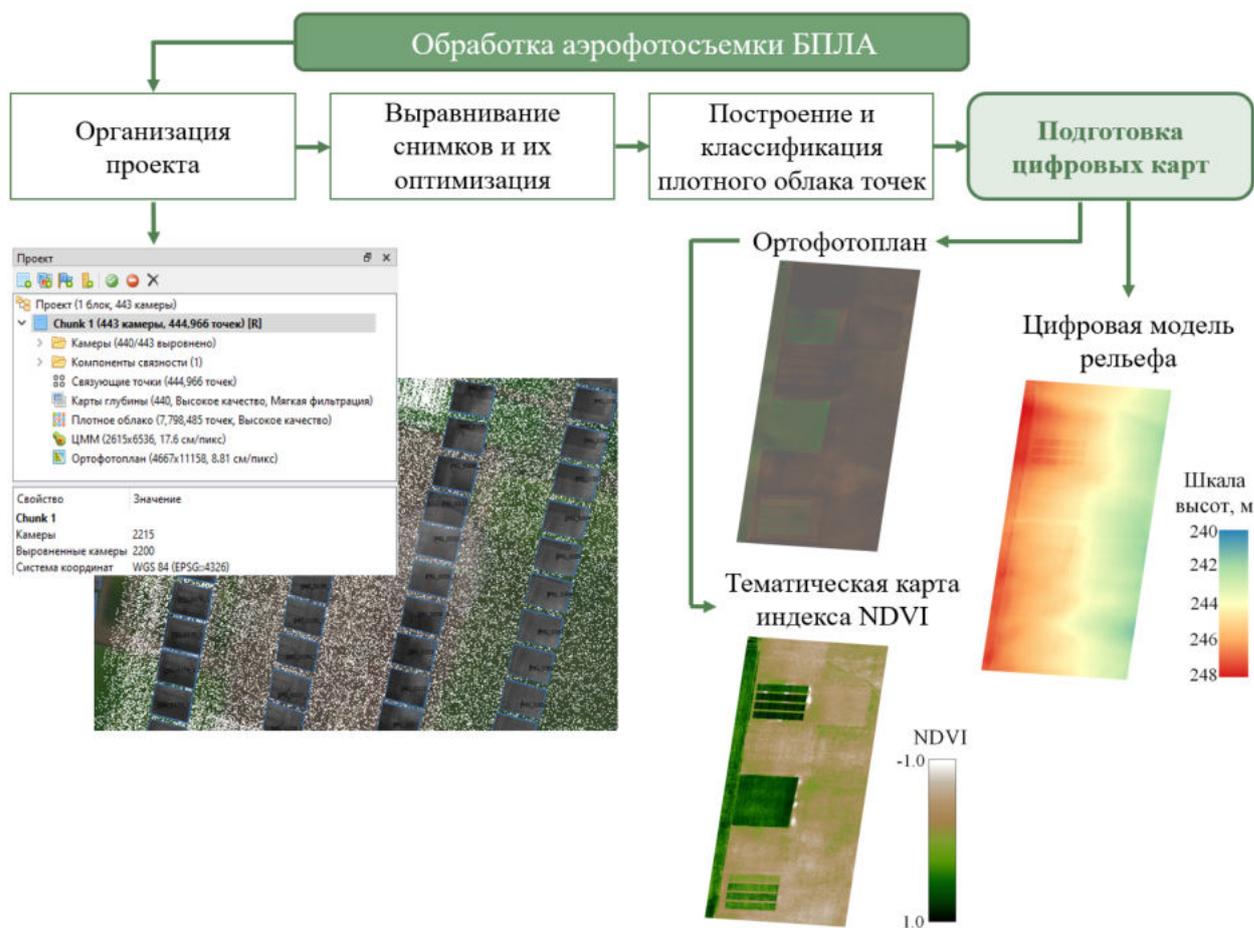


Рисунок 4 – Технология обработки аэрофотоснимков с БПЛА.

На сегодняшний день для ОПХ «Курагинское», «Михайловское» и «Минино» создан банк геопространственных данных, представляющий собой совокупность информационных и технологических цифровых карт. На основе наземных и спутниковых данных, данных компьютерных моделей и БПЛА подготовлены архивы цифровых карт на территории ОПХ «Курагинское», «Михайловское» и «Минино». Создан банк геопространственных данных, содержащий актуальную информацию в цифровом формате о землях сельскохозяйственного назначения.

Основные публикации по разделу:

- 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, 2022. [Q3 Web of Science] DOI: 10.1002/ieam.4652.
- Ерунова М.Г., Симакина А.С., Якубайлик О.Э. Создание базы данных для точного земледелия ОПХ "Курагинское" // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1 (178). С. 13-20. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.

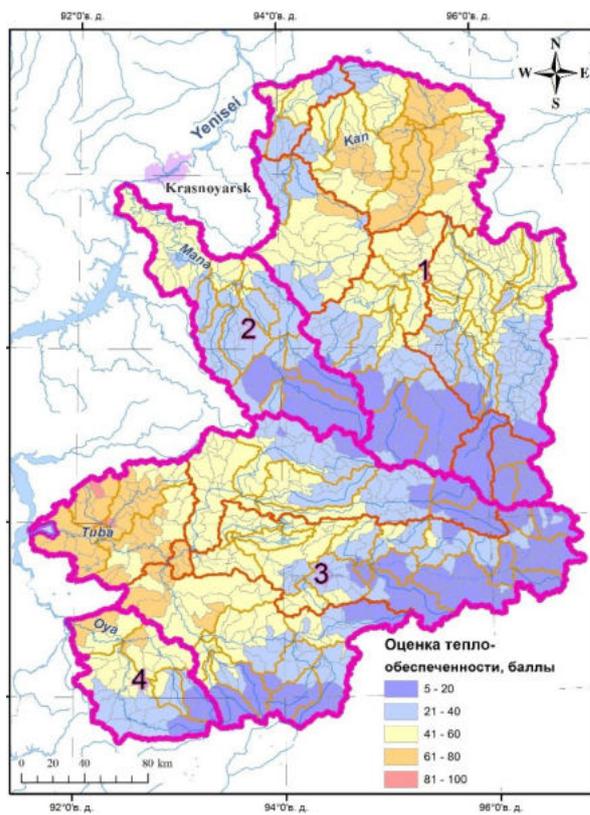
1.2. Методы многомерного статистического анализа природных объектов

Местоположение природных объектов в пространстве, их форма и размеры, взаимное расположение и другие пространственные характеристики являются важными показателями, которые определяют возможности анализа данных. Как правило, природные объекты описываются большим числом характеристик, и представляются в виде различных геопространственных моделей данных, многомерных массивов, и проч. Многомерный статистический анализ является одним из широко применяемых подходов, который позволяет исследовать отношения между многими различными характеристиками природных объектов.

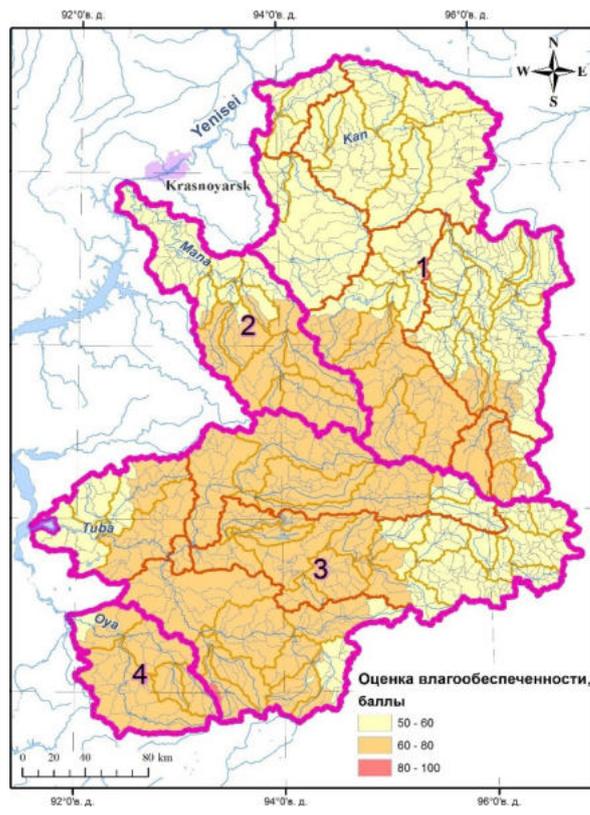
Задачей исследования является формирование совокупности геоданных и аналитических программных инструментов на основе геоинформационных систем (ГИС), которые должны предусматривать возможность проведения исследований многомерных неполных данных на основе сочетания методов нечеткого моделирования и многомерного статистического анализа с целью восстановления пропущенных значений, проведения анализа структуры данных, выявления скрытых взаимосвязей между свойствами, а также исследования пространственных свойств объектов, отображая результаты анализа средствами ГИС в едином комплексе программ.

В этом контексте настоящий проект был посвящен методам оценки природно-ресурсного потенциала (ПРП) территории – комплексному анализу многомерных данных о природных объектах. Качественная оценка ПРП территории служит важным инструментом оптимизации природопользования, включает в себя полный учет особенностей природной среды, ландшафта, условий тепло- и влагообеспеченности, позволяет повышать продуктивность производственной деятельности, способствует охране и воспроизводству полезных качеств земли, является основой для принятия решений по использованию земель.

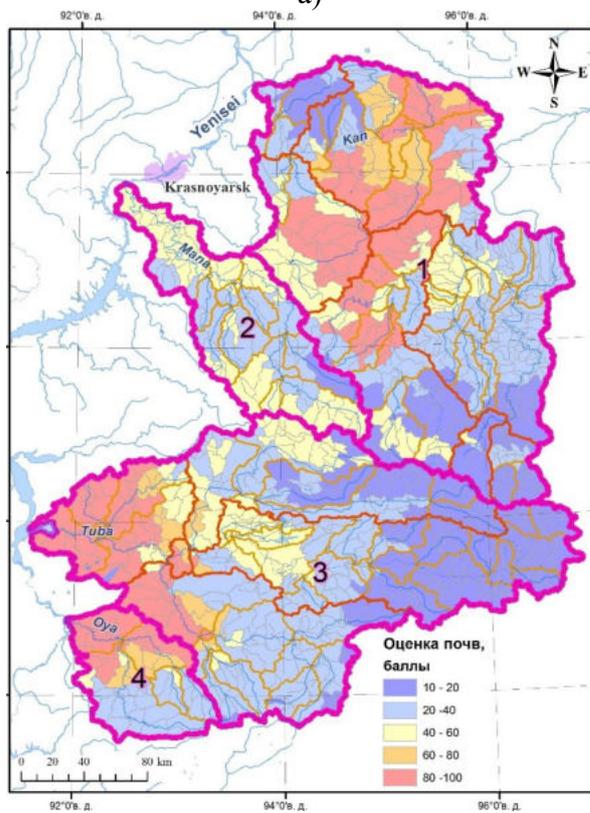
Методика оценки ПРП анализировалась на примере территории водосборных бассейнов нескольких крупных рек юга Красноярского края – Кан, Мана, Туба и Оя общей площадью около 9 млн. га. В качестве элементарной территориальной единицы выступали минимальные водосборные бассейны со средней площадью около 1 га, вычисленные по детальной цифровой модели рельефа. Для каждого такого минимального бассейна средствами геоинформационного моделирования был сформирован набор атрибутов уникальных природных характеристик. Полученная интегрированная база данных включает: данные по температуре – на основе спутниковой информации Terra/MODIS; данные по накопленным осадкам – на основе моделей реанализа NASA GPM и NCEP GFS, почвенный покров – на основе данных Единого государственного реестра почвенных ресурсов (ЕГРПР), это почвенная карта РСФСР (1988) масштаба 1:2 500 000 под редакцией В.М. Фридланда.



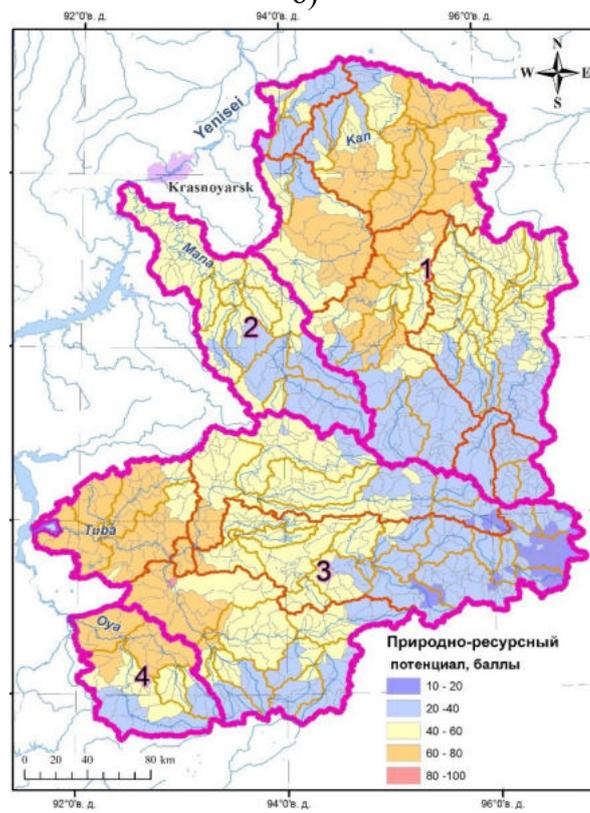
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Результаты многомерного геостатистического анализа территории: а) оценка теплообеспеченности; б) оценка влагообеспеченности; в) оценка почв; г) оценка природно-ресурсного потенциала.

Для каждого бассейна средствами многомерного геостатистического анализа получена оценка почвенного покрова, оценка теплообеспеченности – это сумма активных температур выше 10°C (среднее значение за 20 лет), оценка влагообеспеченности – это годовая сумма осадков (среднее значение за 20 лет). Все почвы и климатические параметры проранжированы в баллах от 5 до 100 (Рис. 5).

Для расчета итогового ПРП агроландшафта использовался информационно-логический анализ и уравнения, где оцениваемые показатели оказывают наибольшее влияние на результат, если стоят в начале формулы. Так, для таежной (холодные почвы) и лесостепной зон большее значение будет иметь теплообеспеченность. Уравнение будет иметь вид: $ПРП = T \vee (O \vee П)$, где: ПРП – природно-ресурсный потенциал, балл; Т – баллы за сумму температур выше 10°C; О – баллы за годовую сумму осадков; П – баллы за почву; \vee – знак нелинейного логического сложения.

Оценку ПРП определяется по следующей градации (балл): 1—20 – низкий; 21—40 – пониженный; 41—60 – средний; 61—80 – повышенный; 81—100 – высокий.

Согласно интегральной оценке всей совокупности климатических, почвенных, гидрологических, геоморфологических и геологических компонентов следует, что на исследуемой территории водосборных бассейнов повышенный природно-ресурсный потенциал характерен для равнинных территорий с сельскохозяйственным землепользованием. Низкий ПРП характерен для горных территорий с высотой более 1500 м. В пределах земледельческой территории Красноярского края высоким и повышенным ПРП обладают землепользования типичной лесостепи. Средний уровень ПРП характерен для землепользований таежно-лесной зоны и пониженный – для открытой лесостепи. Согласно предлагаемой методике, ПРП оцениваемых землепользований, находящихся в лесостепной черноземной зоне, – средний. Низкое значение ПРП характерно для землепользования таежно-лесной зоны.

Выполненная оценка ПРП агроландшафтов является основой для определения путей оптимизации аграрного природопользования, активизации рынка сельскохозяйственной продукции и роста рентабельности сельского хозяйства земледельческой территории Красноярского края.

Уникальные природные характеристики интегрированной база данных водосборного деления можно использовать для оценки состояния природных характеристик территории, применяя статистические и математические методы и программное обеспечение VidaExpert. В открытом программном пакете VidaExpert был проведен кластерный анализ с помощью нелинейного метода анализа и визуализации многомерных данных (метода упругих карт) по выявлению однородных участков по данным годового температурного хода за 2019 год.

Для кластеризации данных (бассейнов в 45-мерном пространстве) были использованы К-средние, варьирующимся от 2 до 15. Метод упругих карт — это метод приближения многомерных данных многообразиями малой размерности; в данном исследовании было использовано многообразие размерности 2. На первом этапе были определены первые две главные компоненты, на которых как на осях строилась плоскость. На эту плоскость проектируются все данные, после чего определяется минимальный квадрат, содержащий все проекции. Затем этот квадрат делится на набор квадратов меньшего размера; число малых квадратов в разбиении определяет жёсткость будущей упругой карты. Были использованы карты размером 16×16 (мягкие). После построения такого покрытия малыми квадратами каждая проекция точки данных заменяется на ближайший к ней узел решётки. Затем каждую точку (многомерных) данных соединяют с тем узлом, в который попала её проекция, математической пружиной — она обладает бесконечной растяжимостью и не теряет линейных свойств при любых величинах растяжения. Как только такая конструкция построена, исходно жёсткий квадрат размером 16×16 малых квадратов заменяют эластичной однородной мембраной. Затем вся система отпускается, и мембрана деформируется так, чтобы был достигнут минимум суммарной энергии деформации и пружин.

При деформациях мембраны должна сохраняться топология: нельзя склеивать края мембраны либо разрывать её. Деформация производится по рёбрам и узлам: это означает, что деформированное многообразие является кусочно-плоским многообразием. Как только финальная конфигурация достигнута, положение каждой точки многомерных данных переопределяется на деформированном многообразии: для каждой точки находится её ортогональная проекция. Наконец, на последнем этапе пружины удаляются и многообразие тем самым возвращается в своё исходное состояние — происходит переход в так называемые внутренние координаты.

Выделение кластеров точек, располагающихся на двумерном многообразии, получено методом локальной плотности. Заключается он в следующем: каждая точка снабжается колоколообразной функцией (обычно Гауссовской); полуширина этой функции является подгоночным параметром:

$$f_j(r) = \exp\left\{-\frac{(r-r_j)^2}{\sigma^2}\right\},$$

где r_j — расположение (во внутренних координатах) j -ой точки, σ — полуширина функции. Фактически, определяет контрастность контуров на эластичной карте. Затем находится суммарная функция по всем точкам и линии её уровня и определяют кластеры на многообразии.

Во-первых, мы рассмотрели классификацию водоразделов с К-средними для диапазона $2 \leq K \leq 8$. Нет стабильных (или даже частично устойчивая) классификация с помощью

К-средних найдена даже для $K = 2$. Этот факт кажется относительно естественным: конфигурация данных позволяет проводить различные классификации с помощью К-средних так, чтобы они дополняли друг друга в течение серии запусков метода. Рост числа классов в К-средних еще больше ухудшает классификацию.

Метод эластичных карт выявляет очень отчетливую и четкую кластерную структуру (Рис. 6). На этом рисунке показано «сырое» распределение водоразделов по мягкой упругой карте 16×16 (Рис. 6а), а также идентификация кластеров (Рис. 6б), обеспечиваемая локальной двумерной плотностью (1, 2) по той же карте.

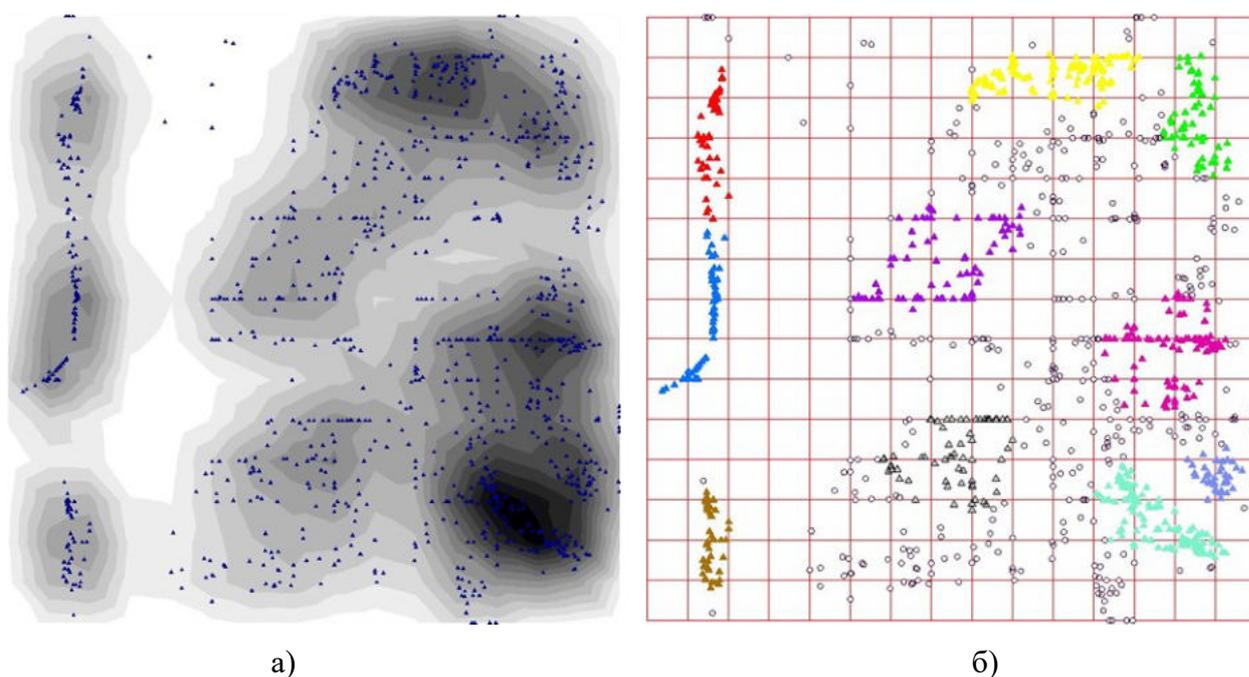


Рисунок 6 – Эластичные мягкие карты 16×16 для кластеризации водоразделов четвертого уровня. а) Общее распределение по локальной плотности (2). б) 10 кластеров, идентифицированных на этой эластичной карте через локальную плотность.

Кластер № 1 показан лазурными треугольниками, кластер № 2 показан красными треугольниками, кластер № 3 показан желтыми треугольниками, кластер № 4 показан треугольниками арлекина, кластер № 5 показан пурпурно-розовыми треугольниками, кластер № 6 показан в аметистовых треугольниках кластер № 7 показан серыми треугольниками с черной рамкой, кластер № 8 показан аквамариновыми треугольниками, кластер № 9 показан светло-фиолетовыми треугольниками, а кластер № 10 показан коричневыми треугольниками. Точки, вышедшие из любого кластера, показаны меньшими белыми кружками с черной рамкой.

Кластеры, выделенные с помощью реализации эластичной карты, демонстрируют достаточно высокий уровень согласованности с распределением различных индексов, а также средней высоты водосбора. Идентификация кластеров является неформальной процедурой и зависит от выбора уровня контраста μ . Положим $\mu=0,15$; на этом контрастном рисунке, по-видимому, видны тенкластеры (см. Рис. 6б и 7а). Следует подчеркнуть, что эти два рисунка (Рис. 6б и 7а) имеют одинаковую схему окраски при идентификации кластеров.

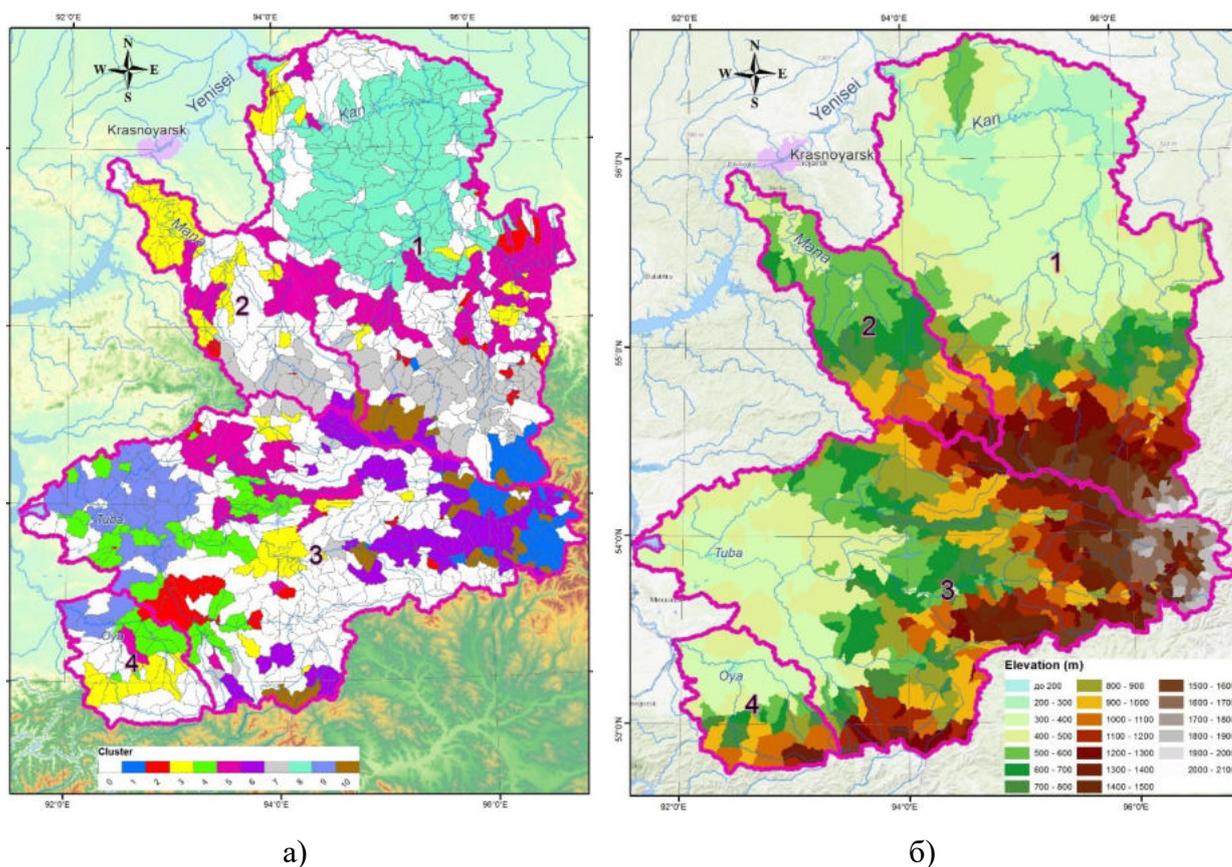


Рисунок 7 – а) Тематическая карта распределения кластеров, идентифицированных по локальной плотности (1, 2). б) Тематическая карта рельефа.

Полученная классификация по данным годового температурного хода согласуется с рельефом и сельскохозяйственным землепользованием. Например, в кластер № 1 входят водоразделы, расположенные в средних горах с высотой более 1500 м. На упругой карте он отчетливо обособлен от всех остальных водосборов (Рис. 6а). Восьмой и девятый кластер, напротив, включает водоразделы, расположенные на равнинной территории сельскохозяйственного землепользования (Рис. 7а). Для каждого кластера был проведен многомерный анализ всех средних значений уникальных природных характеристик. Полученные результаты не показывают четкой и достоверной корреляции между климатическими (температура, осадки) и географическими (высота, уклон и т. д.) показателями водосборных

бассейнов и вегетационными индексами NDVI или LAI, определяемыми в строгом статистическом смысле. Не существует и непосредственной (линейной) связи между паттернами кластеров (Рис. 7), выявленными посредством реализации эластичной карты, построенной по годовому ходу температуры. Эта относительная независимость индексов от климатических или географических свойств делает эти первые характеристики весьма информативными.

Однако распределение водосборов, входящих в разные кластеры, и наблюдаемые в них уникальные природные характеристики демонстрируют явную структурированность. Последнее проявляется в достаточно сложной, но существенной нелинейной зависимости между указанными выше характеристиками. Удивительно, но четкой корреляции между показателями при определении внутри кластера не наблюдается. Этот факт может отражать некую устойчивость и толерантность земельных участков к потрясениям и отклонениям окружающей среды.

Полученные кластеры по значениям годового хода NDVI хорошо согласуются с кластерами, полученными на основе годового хода температуры. Наблюдаемое соответствие позволяет оценить некоторые более низкие стабильные показатели с температурными данными. Такая оценка имеет смысл в нескольких случаях, например, когда необходимо устранить пробелы в данных, в базе данных. Тем не менее: сельскохозяйственные угодья покрываются растительностью значительно меньше времени, чем естественные леса и т. д. Этот очень простой факт исходит из самой природы сельского хозяйства, делает средний показатель NDVI менее информативным по сравнению с максимальным значением NDVI.

В рамках выполнения настоящего проекта были проведены дополнительные исследования по анализу многомерных данных, представляющих интерес в иных и смежных областях. Используемые в анализе геопространственной информации аналитические методики и подходы, в частности – метод упругих карт – можно применять в исследованиях динамики распределённых экологических систем и для анализа данных иной природы. Например – для анализа медицинских данных и данных биоинформатики. Полученные в этой предметной области результаты будут способствовать развитию указанного метода. Остановимся на этих результатах подробнее.

Основной задачей данного проекта в части анализа больших данных было изучение внутренней структурированности данных и выявление в них скрытых взаимосвязей. Как правило, методы такого анализа существенно «привязаны» к данным: во многом определяются самими данными. Однако такая связь не является абсолютной. Применяемые в задачах анализа данных по динамике окружающей среды методы могут быть эффективными и в задачах анализа данных другой природы.

Фактически те же методы были использованы для анализа ряда данных в области биоинформатики и медицины и показали свою эффективность. Упомянутые методы были применены для решения конкретных задач биоинформатики в рамках общей проблемы связи структуры нуклеотидных последовательностей, кодируемой ими функции и таксономии их носителей. Кроме того, в связи с обращением коллег из ряда медицинских учреждений была проведена аналогичная работа по выявлению связи некоторых медицинских показателей с манифестацией той или иной патологии.

Пример применения метода упругих карт в анализе медицинских данных

Актуальность. Дефект межпредсердной перегородки (ДМПП) – это врожденный порок сердца, который характеризуется наличием сообщения в перегородке между правым и левым предсердием. Частота встречаемости ДМПП составляет 7,1-8,7 % от всех врожденных пороков развития. Распространенность дефекта среди детского и взрослого населения составляет 3,89 и 0,88 на 1000 человек соответственно. Данная патология в большинстве популяций встречается чаще у женщин, чем у мужчин.

Гемодинамические изменения, характерные для ДМПП, представлены аномальным сбросом артериальной крови из левого предсердия в правое, что приводит, во-первых, к смешиванию крови, а во-вторых, к появлению постоянно циркулирующего объема крови в малом круге кровообращения, который ведет к перегрузке правых отделов сердца и развитию легочной гипертензии.

Основным инструментом в постановке диагноза ДМПП является двумерная трансторакальная эхокардиография (ЭХОКГ) с цветным доплеровским исследованием. Использование данного метода ультразвукового исследования позволяет определить локализацию и размер дефекта, объём и направление шунтирования крови, увеличение размеров камер сердца, парадоксальное движение или прогиб межжелудочковой перегородки, наличие регургитации трикуспидального клапана и клапана легочной артерии, при этом вопрос об определении времени плановой коррекции дефекта всё ещё остается открытым.

Цель исследования: анализ эффективности эхокардиографических показателей и выделение информационно значимых показателей для задач диагностики ДМПП с помощью линейных и нелинейных методов статистики.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выявить различия в группах больных ДМПП и здоровых пациентов по основным ЭХОКГ показателям, используя классические методы статистики;

2. Проанализировать структуру распределения групп больных ДМПП и здоровых пациентов, используя метрические методы классификации и нелинейный метод упругих карт;
3. Оценить качество классификации и кластеризации пациентов с учетом выявленных диагностических показателей.

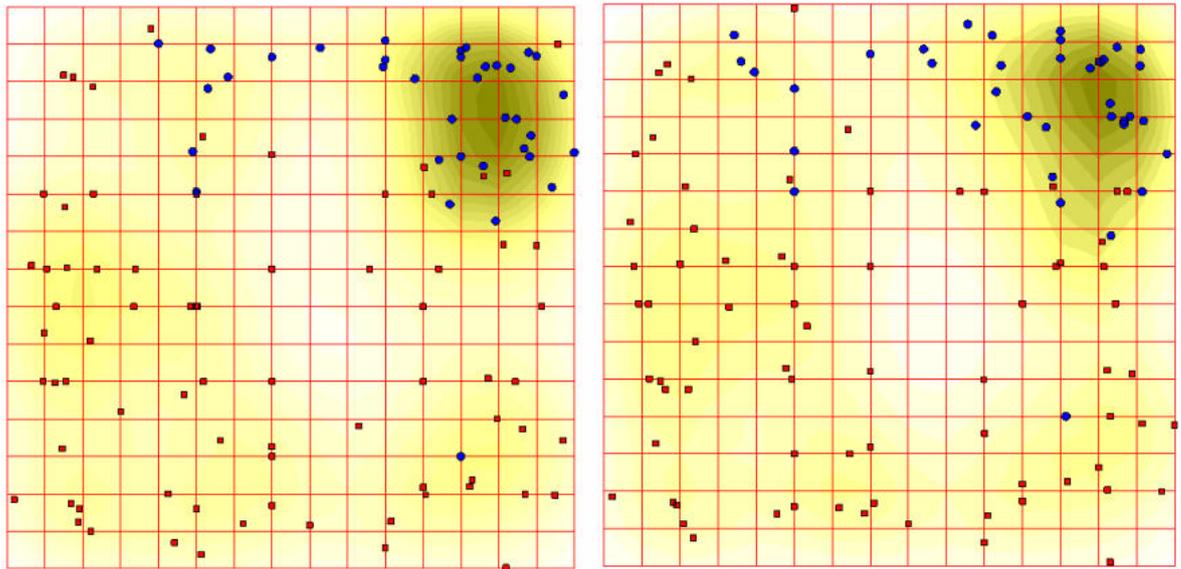
Объектом исследования являются сложные взаимосвязи механизмов и процессов, протекающих в сердце условно здоровых пациентов и пациентов с ДМПП, для задач диагностики данного ВПС.

Основными инструментальными методами диагностики ДМПП являются трансторакальная и чрезпищеводная эхокардиография, позволяющие определить анатомические характеристики дефекта, в том числе наличие и размеры краёв дефекта.

Классические методы статистики и ROC-анализ продемонстрировали диагностически значимые ЭКГ и ЭХОКГ показатели, и задача построения диагностического инструмента требует определения класса заболевания только по данным этих измерений, учитывая, что априорное знание о наличии или отсутствии заболевания в реальной клинической практике отсутствует. В данном случае речь идет не о классификации, а о кластеризации пациентов (обучение без учителя). Для выделения кластеров в полученной базе данных был использован нелинейный метод упругих карт.

На рисунке 8 представлены упругие карты распределения обследуемых с учетом всех показателей (на рисунке 8б, исключая антропометрические). На данных картах, как и на последующих, здоровые пациенты обозначены синим кружком, пациенты с установленным диагнозом «изолированный ДМПП» – красным квадратом. По представленным данным видно, что здоровые пациенты сформировали кластер с высокой плотностью, который объединил в себе около 3/4 условно здоровых пациентов. При этом часть здоровых пациентов формируют кластер с небольшой плотностью. Внутренняя структура кластеров больных пациентов также неоднородна – по данным рисунков определяются три кластера с низкой плотностью. Несмотря на то, что здоровые и больные пациенты достаточно хорошо, отделились друг от друга, часть пациентов с ДМПП попали в центр кластер здоровых пациентов. После удаления антропометрических данных больные пациенты отделились от центра кластера здоровых, что понижает степень ложноотрицательного срабатывания.

Последующий анализ медицинских данных, учет диагностически значимых показателей, позволил уточнить кластеризацию. На упругой карте, построенной с учетом коррелирующих переменных (Рис. 9), можно выделить 3 кластера с высокой плотностью (кластер здоровых пациентов и 2 кластера пациентов с ДМПП).



а

б

Рисунок 8 – Упругие карты, построенные по всем переменным (а) и с исключением антропометрических данных (б).

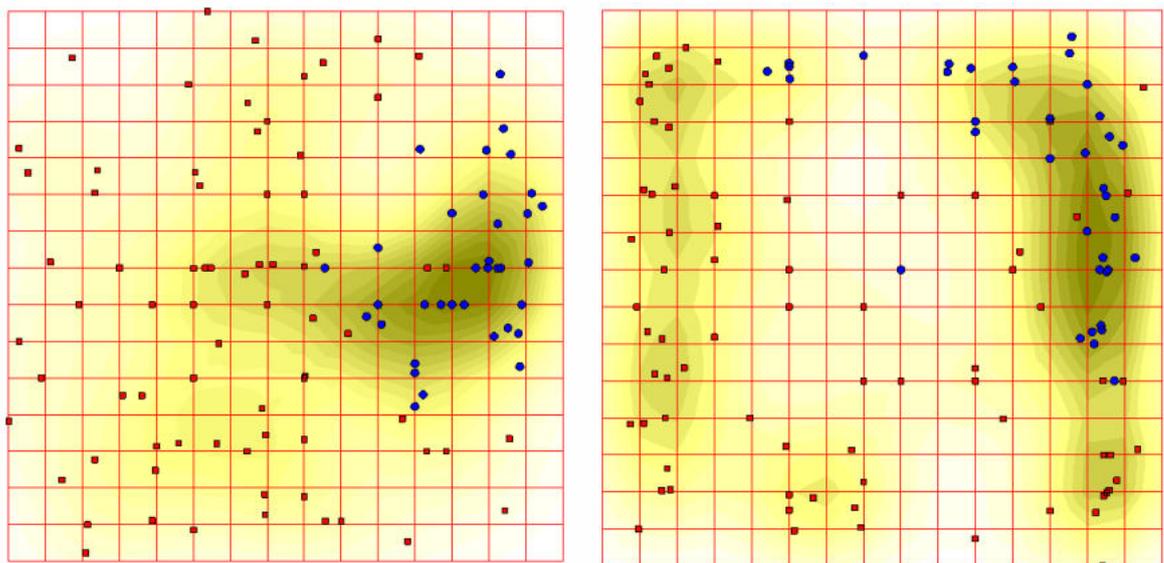


Рисунок 9 – Упругие карты, построенные с учетом коррелирующих переменных.

Основные публикации по разделу:

- 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, 2022. [Q3 Web of Science] DOI: 10.1002/ieam.4652.
- Kirichenko, A.D., Poroshina, A.A., Sherbakov, D.Yu., Sadovsky, M.G., Krutovsky, K.V. Comparative analysis of alignment-free genome clustering and whole genome alignment-based phylogenomic relationship of coronaviruses // PLoS ONE, 2022, v. 17, e0264640. [Q1 Web of Science] DOI: 10.1371/journal.pone.0264640.

1.3. Летний гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Предметом исследований в настоящем проекте стала задача оценки температуры поверхности воды в реке Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на основе методов физико-математического моделирования и по данным ДЗЗ. Сравнение полученных результатов проводилось с данными мониторинга на гидропостах.

В качестве объекта исследования был выбран участок реки от плотины Красноярской ГЭС на расстояние 124 км. Анализ данных ДЗЗ проводился на основе спутникового снимка Landsat 8 за 3 июля 2016 г.

На рисунке 10 обозначены точки, для которых проводились измерения температуры воды. Точка 1 – гидропост в г. Дивногорске, точка 2 – гидропост в г. Красноярске, точка 4 – гидропост в с. Атаманово. В точке 3 представлены только результаты расчетов и спутниковые данные.

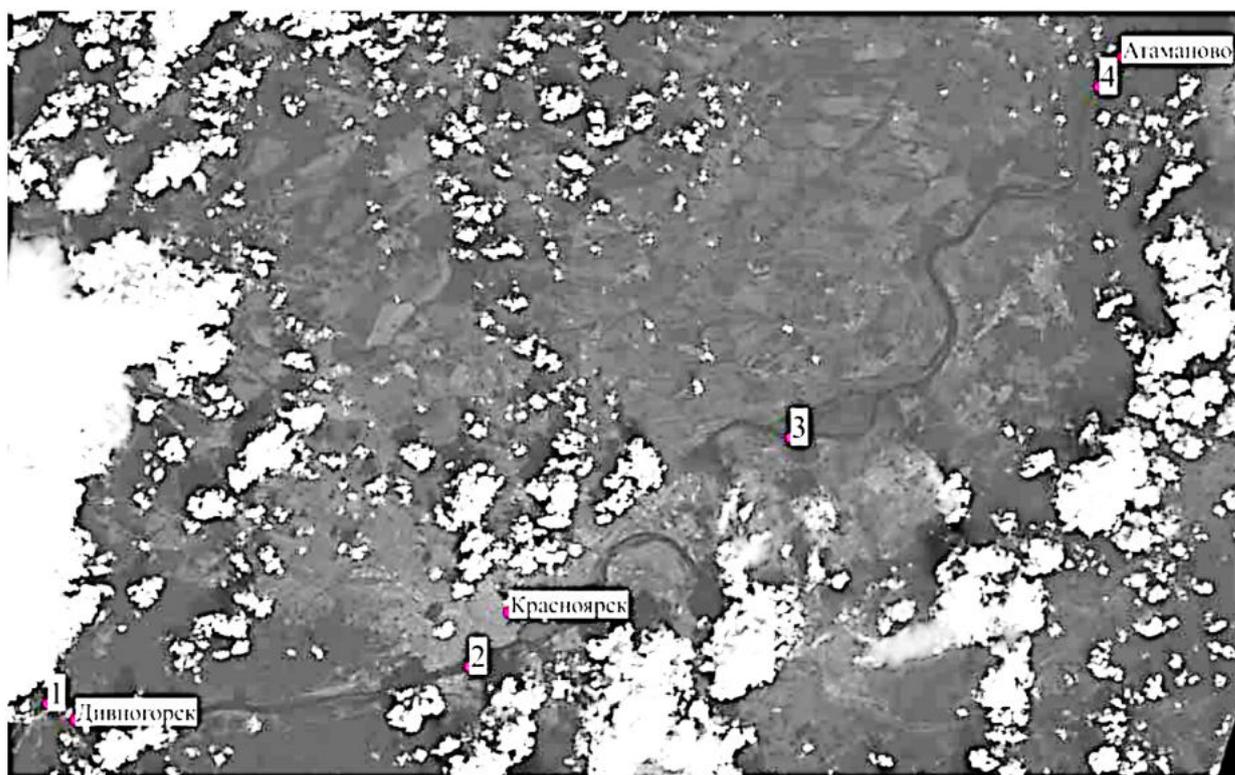


Рисунок 10 – Снимок Landsat 8 реки Енисей, дата съемки 3 июля 2016 г.

Разработанная физико-математическая модель учитывает основные физические процессы, влияющие на изменение температуры воды, обмен энергией между водой и окружающей средой. В этой модели учитывается поглощение водой прямой и рассеянной солнечной радиации, поглощение поверхностью воды исходящей из атмосферы радиации в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне, излучение поверхностью воды радиации в ИК-диапазоне, испарительный и конвективный теплообмен.

В качестве спутниковых данных рассматривались данные по температуре поверхности земли спектрорадиометра TIRS Landsat 8 (Thermal Infrared Sensor), набор Collection 2 Level 2 (C2L2). Отличительной особенностью этой коллекции данных, доступной с 2021 года, являются основанные на данных радиометра ASTER новые алгоритмы атмосферной коррекции, вычисления температуры поверхности.

Полученные результаты в контрольных точках представлены на рисунке 11.

В 1-й контрольной точке значения температуры имеют близкие значения, максимальное расхождение наблюдается на 2-й точке, которая расположена в Красноярске.

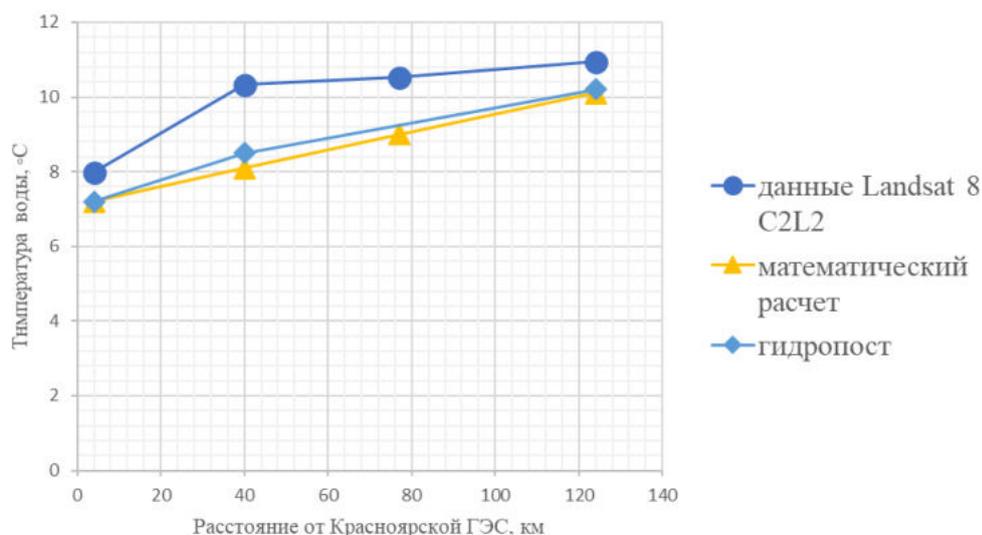


Рисунок 11 – Температура воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС по данным физико-математического моделирования, дистанционного зондирования и измерений на гидропостах.

Сравнение температуры воды в 4-х контрольных точках ниже Красноярской ГЭС на р. Енисей, показало, что значения, полученные дистанционными методами и расчетными, близки к значениям гидропостов.

Полученные в результате физико-математического моделирования и обработки данных дистанционного зондирования значения температуры воды близки к экспериментальным данным, регистрируемым на гидропостах, что позволяет судить об адекватности построенных моделей и методов определения температуры воды по ДДЗ реально происходящим гидротермическим процессам.

Предлагаемый подход, сочетающий методы физико-математического моделирования и дистанционного зондирования, перспективен и эффективен для его использования в задачах и моделях, связанных с конкретными территориями и учитывающих их специфику в условиях природно-климатических изменений. Это способствует получению качественных

научных и практических результатов при принятии управленческих решений в различных задачах анализа и оценки, мониторинга окружающей среды.

Основные публикации по разделу:

- Матушко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Летний гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск, 2022. С. 265-268.

1.4. Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей

Образование туманов на реке является одним из существенных факторов, определяющих качество городского воздуха. Для г. Красноярска, который расположен на берегах незамерзающей зимой реки Енисей, туманы всегда вызвали повышенный интерес. Вопрос о роли и степени влияния туманов в Красноярске на его микроклимат и экологию продолжает оставаться одним из самых актуальных.

Согласно международной классификации, помутнение атмосферы называется туманом, если видимость в ней составляет менее 1 км. Туманы влияют на движение авиационного, морского, автомобильного, речного транспорта, а также на городские постройки, линии электропередач, состояние экологии и здоровье населения.

Образование, существование и распад тумана являются результатом сложных взаимодействий между микрофизическими, термодинамическими и динамическими процессами. Наиболее изучены туманы, связанные с радиационным охлаждением суши – туманы охлаждения, которые обычно возникают в теплое время года. Другой тип тумана – туманы парения, обычно наблюдаются в зимнее время и возникают в результате адвекции холодного воздуха с низким давлением пара над относительно теплой поверхностью воды.

Строительство плотины Красноярской ГЭС стало причиной формирования туманов в осенне-зимний период на участке Енисея вниз по течению реки от плотины Красноярской ГЭС (нижний бьеф). В настоящей работе выполнялся анализ данных по формированию туманов в Красноярске за один год (2020 г.).

В течение всего 2020 года проводилась регистрация данных по туманам. Метеорологические условия, соответствующие времени формирования туманов, фиксировались на разработанном авторами геопортале ИВМ СО РАН, температура воды определялась по гидропостам, а регистрация туманов выполнялась с помощью веб-камер (Рис. 12).



Рисунок 12 – Туман охлаждения над р. Енисей (правый берег, 1 августа 2020 г., 07:30)

Всего в 2020 г. в Красноярске было зарегистрировано образование 45 туманов. Их распределение по месяцам представлено в Таблице 1.

Таблица 1. Число зарегистрированных туманов помесечно в 2020 г.

	Месяц											
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Количество туманов	4	10	2	–	–	–	3	2	11	1	7	5

Анализ данных показал, что в летний период образуются адвективные туманы охлаждения, а зимой, ранней весной и осенью адвективные туманы парения.

Туманы охлаждения формируются путём охлаждения влажного воздуха при взаимодействии нижнего слоя атмосферы с более холодной движущейся поверхностью воды. Анализ полученных статистических данных позволяет сделать вывод, что необходимые условия для формирования тумана следующие: относительная влажность воздуха $RH > 80\%$, разница температур воздуха и воды $0^\circ\text{C} < \Delta T < 6^\circ\text{C}$, скорость ветра $WS < 0,5$ м/с. Вне этих значений точка росы T_d недостижима. При $\Delta T > 6^\circ\text{C}$ атмосферный воздух не успевает охладиться до точки росы, а при $\Delta T = 0$ охлаждение невозможно.

Туманы парения образуются при адвективном охлаждении паров воды на поверхности реки более холодной примыкающей атмосферой. Статистические данные по RH и ΔT во время существования туманов парения в течение 2020 г., показывают, что туманы возникали при ΔT в диапазоне $8^\circ\text{C} < \Delta T < 25^\circ\text{C}$, $RH > 75\%$ и $WS < 0,5$ м/с.

Пространственное распределение туманов парения вдоль реки определялось на основе данных дистанционного зондирования Земли. Стоит отметить, что использование спутниковой информации для анализа туманов при всей своей привлекательности наталкивается на существенные технические проблемы. Туманы – это непостоянное явление, они,

как правило, возникают в определенные моменты времени (сезон года и время суток) и существуют относительно недолго. Спутниковые данные в свою очередь имеют свои пространственно-временные особенности и ограничения по времени.

Пространственное разрешение доступных спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения составляет не менее 30 м, периодичность съемки – один раз в несколько дней; при этом съемка, как правило, выполняется около полудня. Другой значительной проблемой является облачность: не менее половины дней в году Красноярск прикрыт облаками, из-за которых невозможно использовать спутниковые данные. Проведенный анализ архивов спутниковых данных Landsat-8 (пространственное разрешение данных видимого диапазона 15 м), Sentinel-2 (10 м), Planet Scope (3 м), Canopus-V (2 м) на которых можно обнаружить туманы показал, что за весь 2020 г. имеется всего лишь несколько сцен с изображением только туманов парения. На снимках Sentinel-2 за 11 января 2020 г. (Рис. 11) туманы парения наблюдаются практически непрерывно вдоль Енисея на расстоянии в ~200 км от плотины ГЭС, и далее – отдельными стратами на расстояние до 300 км. Время съемки соответствует началу формирования тумана.

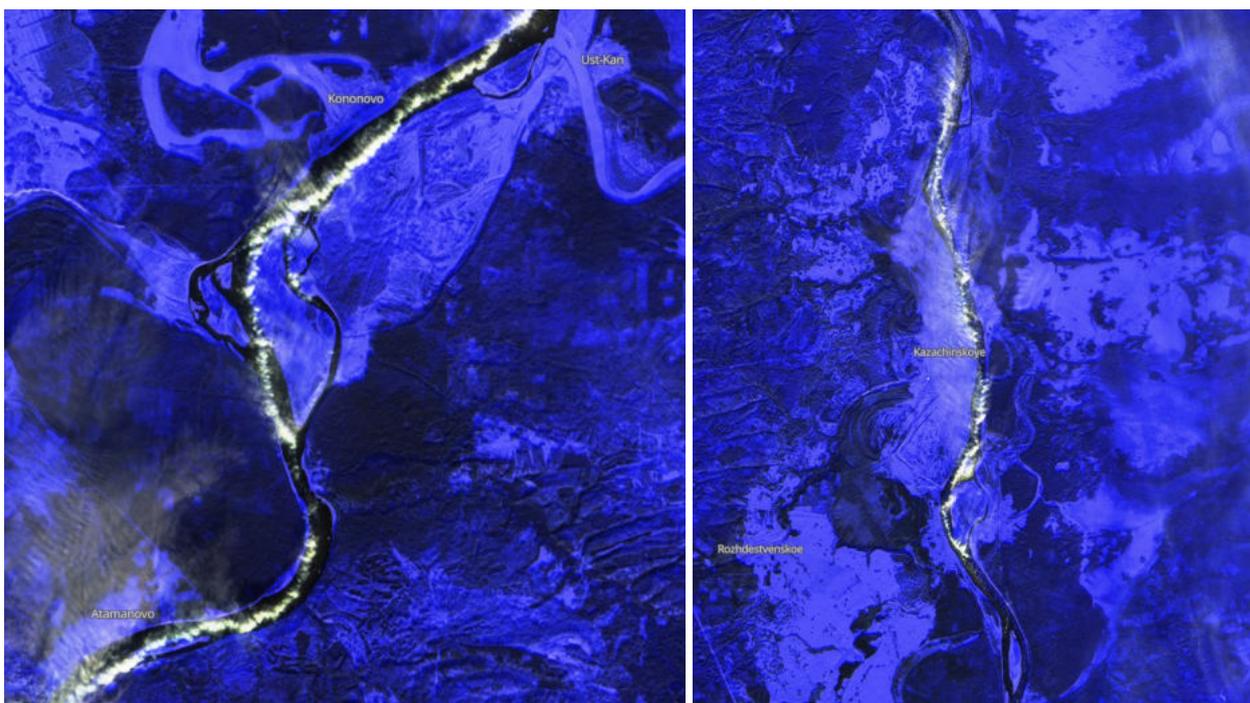


Рисунок 13 – Туманы парения на р. Енисей в районе деревни Кононово (140 км от плотины ГЭС), села Казачинское (300 км) на спутниковом снимке Sentinel-2 (2020-01-11, 12:02 местного времени), представленном в формате False Color (Urban) composite.

На фрагменте снимка Landsat-8 за 28 ноября 2020 г. (Рис. 14), как и в предыдущем случае, видно, что туман в г. Красноярске неоднородный, имеет форму страт. Время съемки соответствует рассеянию тумана.

Основные публикации по разделу:

- Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 05. С. 397–401. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20220508>.
- Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O. Fogs on the Yenisei River (Krasnoyarsk, Russia) // Thermal Science. 2022. Vol. 26, № 5 Part B. P. 4447–4458. DOI: 10.2298/TSCI220402099S.

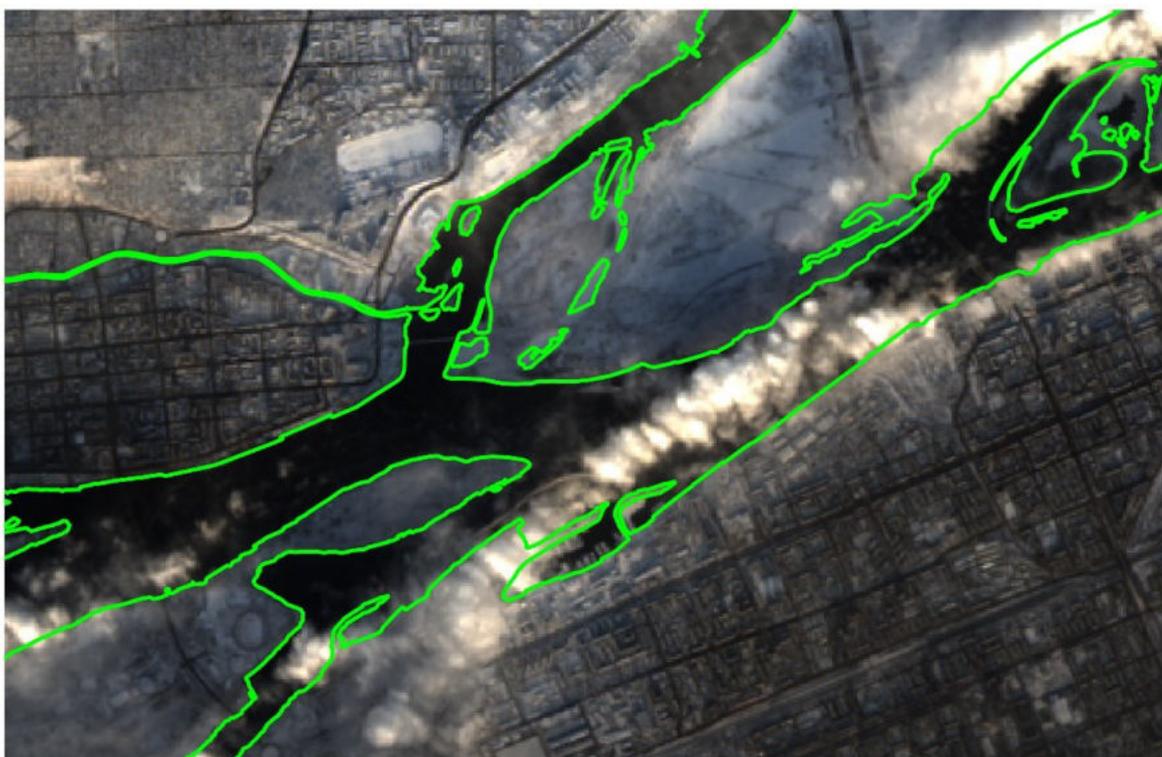


Рисунок 14 – Фрагмент центральной части г. Красноярск на снимке Landsat-8 (2020-11-28, 11:47 местного времени), изображение в естественных цветах.

1.5. Анализ загрязнения атмосферы по спутниковой информации и данным реанализа

Качество атмосферного воздуха – важнейший экологический фактор, определяющий состояние экосистем и здоровье населения. Загрязнение атмосферы обусловлено естественными, природными и антропогенными процессами.

Наземные наблюдения со станций мониторинга показывают важную пространственную и временную информацию о концентрациях РМ в атмосфере города. Однако даже самая подробная городская сеть мониторинга не может обеспечить региональное покрытие, сведения об уровне загрязнения за пределами городской черты. Логичным дополнением к данным городской сети мониторинга могут стать результаты мониторинга загрязнения, полученные с помощью спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В результате выполнения работ по оценке качества атмосферного воздуха в Красноярске была создана методика построения пространственного распределения среднемесячных значений $PM_{2.5}$ на основе информации со спектрорадиометра MODIS и по данным модели прогноза погоды Global Forecast System (GFS). Значения MODIS обрабатывались с использованием алгоритма MAIAS (продукт MCD19A2). Данный продукт содержит ежедневные данные по аэрозольной оптической толщине (AOD) с пространственным разрешением 1 км/пиксель. Используемый алгоритм предоставляет данные об оптической толщине столпа атмосферы над поверхностью с невысоким значением коэффициента отражения. По этой причине при использовании данного алгоритма нет возможности получить данные по AOD над водой и заснеженной территорией. Данные по модели GFS с января 2015 года имеют пространственное разрешение в 0,25 градуса/пиксель. В виду этого значения по $PM_{2.5}$ рассчитывались для периода с апреля по октябрь, начиная с 2015 года. Среднемесячные значения $PM_{2.5}$ рассчитаны для одной ячейки синусоидальной сетки MODIS h23v03, покрывающей такие города как Красноярск, Кызыл, Ачинск, Братск и Кодинск.

Значения $PM_{2.5}$ были рассчитаны с использованием следующей формулы:

$$PM_{2.5} = (AOD/PBLH) / \{K \cdot [(1-RH)/(1-RH_0)]^{-\gamma}\} \quad (1)$$

где AOD – аэрозольная оптическая толщина, полученная по данным MODIS, RH и $PBLH$ относительная влажность воздуха и высота пограничного слоя атмосферы, полученные из модели GFS. Переменные γ и K являются аэрозольными характеристиками, получены из открытых источников.

Для расчёта использовались программы, написанные на языке программирования Python, с использованием библиотеки для работы с пространственными данными GDAL. Данные MODIS имеют расширение файлов *.hdf. Они содержат информацию о величине AOD на двух длинах волн, значение погрешности и углы наблюдения. Для нашей работы мы извлекаем из всего набора данных, только слой со значениями AOD и сохраняем его в формат *.tiff, для дальнейших вычислений. Данные реанализа GFS имеют временной разрешение раз в шесть часов (четыре раза в сутки) и ведут отсчёт по UTS. Так как время пролёта спутников Terra и Aqua с установленным на них спектрорадиометром MODIS над Красноярском приблизительно 12 часов местного времени, а он имеет часовой пояс UTS +7, то наиболее подходящими данными являются за шесть часов по UTS.

На рисунке 15 показаны среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$. Видно, что для территории озера Увс-Нуур данные отсутствуют (располагается на юго-востоке исследуемой области), так же частично отсутствуют данные над отдельными участками таких крупных рек, как Енисей и Ангара. В весенние и осенние периоды данные отсутствуют и над территориями Восточного и Западного Саяна.

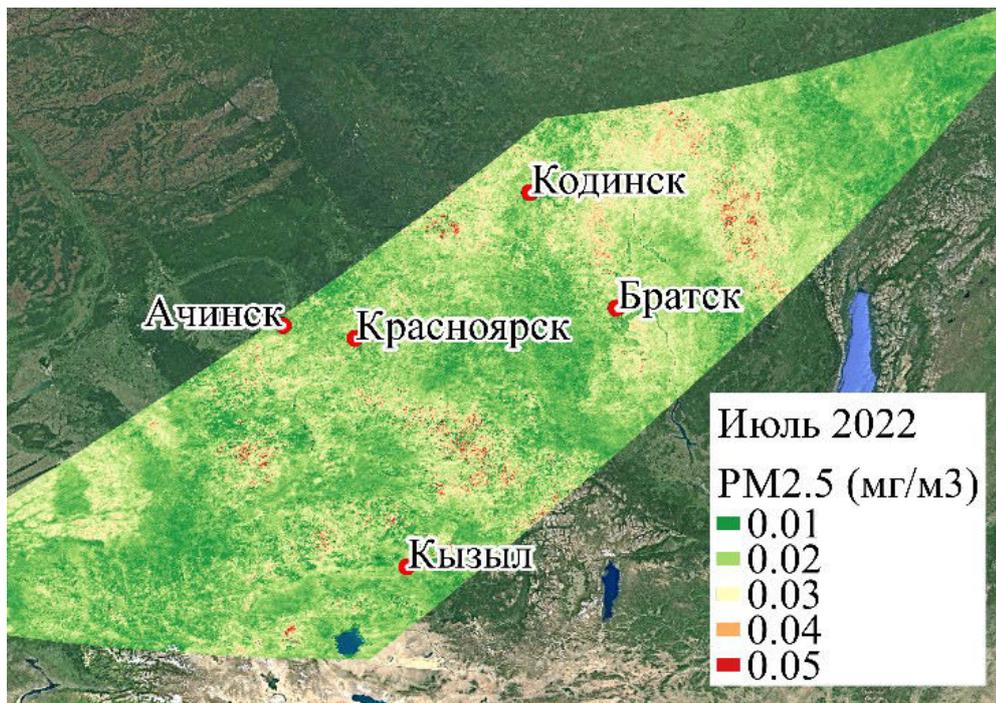


Рисунок 15 – Среднемесячные значения PM_{2.5} за июль 2022 для ячейки h23v03 синусоидальной сетки MODIS.



Рисунок 16 – Повышенные значения концентрации взвешенных частиц PM_{2.5} над дымовыми шлейфами от пожаров в мае 2022 г.

Полученные значения концентрации $PM_{2.5}$ показывают важную пространственную информацию о распределении загрязнения. Совместная обработка данных наземного мониторинга с данными ДЗЗ обеспечивает возможность расширения пространственно-временного охвата исследуемой территории, оценки влияния пригородной зоны на загрязнение города и его временной динамики. При наличии данных ДЗЗ с хорошим пространственным разрешением появляется возможность анализа загрязнения атмосферы по городским районам и микрорайонам, оценки влияния на экологию города вынесенных за городскую черту промышленных объектов и массивов индивидуальных жилых домов с печным отоплением в пригородной зоне.

Основные публикации по разделу:

- 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.
- Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э. Применение данных дистанционного зондирования для пространственной оценки экологической обстановки в Красноярске // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск, 2022. С. 237-241.

1.6. Оценка экологического статуса водоемов с разной степенью антропогенной нагрузки методами биоиндикации.

Сообщества зообентоса в оценка экологического состояния Богучанского водохранилища

Создание плотин часто оказывает значительное негативное влияние на гидрологические, биологические и химические процессы выше и ниже плотины. При этом качество воды существенно меняется, происходит «цветение» воды, размножаются синезеленые водоросли, создаются бескислородные зоны и заморы рыб в ледовый период, ухудшаются санитарно-гигиенические параметры воды из-за сброса сточных вод городов и поселков. Кроме того, происходит замещение рыбного высокосортного населения сорovým ихтиоценозом. Условия среды обитания гидробионтов могут меняться и формироваться в течение нескольких лет, поэтому необходим регулярный мониторинг за состоянием водных биологических сообществ.

Ангара наряду с Енисеем и Волгой входит в число российских рек, зарегулированных крупными водохранилищами. На сегодняшний день на Ангаре располагается каскад водо-

хранилищ, в состав которого входят 4 ГЭС: Иркутская, Братская, Усть-Илимская и Богучанская. Богучанское водохранилище стало четвертой, нижней ступенью Ангарского каскада ГЭС. В настоящее время наблюдается существенный пробел в современных исследованиях непосредственно Богучанского водохранилища. Имеются лишь фрагментарные сведения о гидрохимическом режиме и состоянии планктонных, тогда как донная фауна исследовалась лишь в других ангарских водохранилищах и в р. Ангаре до заполнения Богучанского водохранилища. Цель работы – характеристика сообществ макрозообентоса нижнего района Богучанского водохранилища с последующей оценкой качества вод методами биоиндикации.

Отбор проб зообентоса осуществляли в вегетационный сезон в течении пяти лет (2014-2015, 2017-2019 гг.) на 12 станциях, расположенных на нижнем участке водохранилища (расстояние от створа гидроузла 30 км.). Донную фауну исследовали в двух основных экологических зонах, характеризующих вертикальную расчлененность водоема: литораль – прибрежное мелководье (на глубине до 3 м) и профундаль – глубоководная зона, охватывающая наибольшую часть дна.

В глубоководной части Богучанского водохранилища преобладают мягкие илистые отложения, которые обусловили развитие пелофильные сообществ донных беспозвоночных. Структуру зообентоса в литоральной зоне определяли наличие растительного детрита и мягкий песчано-илистый грунт, местами с примесью мелкогалечника. Таким образом, в литоральной зоне сформировались псаммопелофильные сообщества бентоса с элементами фитофильной фауны. За исследованный период в донных сообществах водохранилища выявлено 75 видов и таксонов более высокого ранга беспозвоночных животных. Наибольшее количество видов (39) отмечено среди двукрылых насекомых семейства Chironomidae.

Зообентос литорали качественно и количественно традиционно намного богаче, чем в профундали (Табл. 2).

Таблица 2. Характеристики донных сообществ в профундали и литорали Богучанского водохранилища.

Зона водохранилища	Число видов	Число видов в пробах	Индекс Шеннона	Численность, тыс. экз./м ²	Биомасса, г/м ²
Профундаль (2014-2015 гг.)	22	2,9 ± 0,3	0,93 ± 0,13	0,39 ± 0,11	2,46 ± 0,82
Профундаль (2017 г.)	24	2,2 ± 0,2	1,11 ± 0,07	0,21 ± 0,03	1,60 ± 0,34
Литораль (2018 г.)	50	6,2 ± 0,5	1,67 ± 0,10	2,23 ± 0,36	2,76 ± 0,39
Литораль (2019 г.)	52	7,5 ± 0,4	2,10 ± 0,09	1,48 ± 2,05	2,02 ± 0,24

Из приведенной таблицы видно, что в глубоководной части выявлено 24 видов бентонтов, тогда как в мелководной – втрое больше. Среднее количество видов в пробе из профундали составило 2–3, в литорали – 6–7. Индекс Шеннона в литорали достоверно выше, чем в профундали.

Специфический для литорали водохранилища доминирующий комплекс видов образовали хирономиды *Camptochironomus pallidivittatus*, *Chironomus cingulatus*, *Cladotanytarsus* gr. *tancus*, *Cryptochironomus* gr. *defectus*, *Polypedilum* gr. *nubeculosum*, а также амфиподы *Gmelinoides fasciatus* и *Micruropus* sp. В профундали наиболее часто встречались представители р. *Chironomus* и амфиподы *G. fasciatus*.

Количественное преимущество в водоеме принадлежало хирономидам как на мелководье, так и в глубинных зонах (Рис. 18). На втором месте располагались амфиподы. Основу биомассы так же формировали хирономиды, но при этом доля амфипод увеличилась. Следует отметить, что в профундали обитают преимущественно крупные виды личинок хирономид, а в литорали, напротив – мелкомерные виды, но в большом количестве.

Минимальная общая численность зообентоса зафиксирована в профундали – в среднем $0,3 \pm 0,06$ тыс. экз./м². В литорали данный показатель был значительно выше – $1,8 \pm 0,2$ тыс. экз./м². Распределение биомассы носило более равномерный характер, в глубоководной части среднее значение составило $2,0 \pm 0,4$ г/м², на мелководье – $2,4 \pm 0,2$ г/м². Статистический анализ показал, что численность зообентоса в литоральной зоне достоверно выше, чем в профундали. Достоверные отличия между биомассой в профундали и в литорали отмечены только в 2017 и 2018 гг.

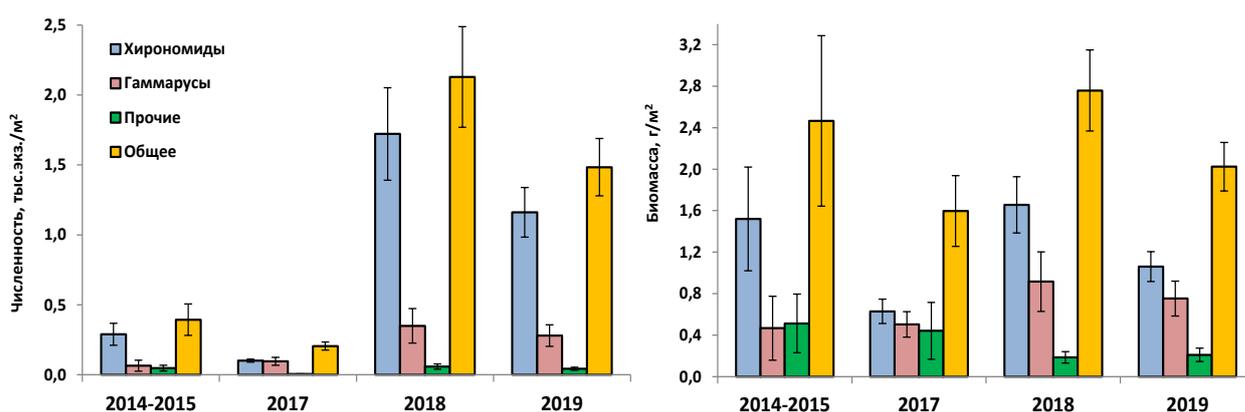


Рисунок 18 – Численность и биомасса основных групп зообентоса в Богучанском водохранилище в различные годы исследования.

Трофический статус Богучанского водохранилища, оцененный по средним значения биомассы зообентоса (табл. 2), в 2018 г. соответствовал мезотрофному типу умеренной

кормности (III класс), в остальные годы – олиготрофному типу низкой кормности (II класс). Полученные оценки трофического статуса Богучанского водохранилища вполне согласуются с исследованиями аналогичных водных объектов Сибири. Например, трофность Красноярского водохранилища по уровню биомассы зообентоса за весь период функционирования относилась к I – II классу очень низкой и низкой кормности олиготрофного типа. Мезотрофный тип с III классом умеренной кормности зарегистрирован лишь на 9-ый (1979 г.), 20-ый (1990 г.) и 24-ый (1994 г.) годы функционирования водохранилища. Известно, что глубокие холодные водохранилища Сибири весьма малопродуктивны ввиду суровых климатических условий и расположения их на подзолистых лесных почвах таежной зоны; их рыбопродуктивность не превышает 1–4 кг/га.

Оценку экологического состояния Богучанского водохранилища проводили дифференцированно для зон профундали и литорали. Для глубоководной зоны применяли индекс Майера, который хорошо зарекомендовал себя в качестве рекогносцировочной оценки при условии невозможности применения других биотических индексов. Данный показатель составил 12 баллов, что соответствует III классу качества (вода “Умеренно загрязненная”). В литоральной зоне для оценки экологического состояния использовали индекс сапробности. Согласно средним значениям индекса сапробности (в 2018 г. – $2,03 \pm 0,04$, в 2019 – $2,02 \pm 0,02$) литоральная зона водохранилища относится к III классу качества вод, β -мезосапробная зона.

Индекс видового разнообразия Шеннона использовался для оценки качества воды в обеих зонах. В профундали средние значения индекса Шеннона (табл. 2) соответствуют V классу в 2015 г. и IV классу в 2017 г. В литоральной зоне видовое разнообразие зообентоса существенно выше (табл. 2), поэтому качество вод оценивается III классом в 2018 г. и II классом в 2019 г., то есть от “Чистых” до “Умеренно загрязненных”.

Таким образом, экологическое состояние нижнего участка Богучанского водохранилища можно оценить как “Умеренно загрязненное” III класса в литоральных зонах и “Загрязненное” IV класса в профундали.

До зарегулирования Ангары Богучанской ГЭС на данном участке доминировали байкальские гаммариды, субдоминантами являлись олигохеты и хирономиды. При этом олигохеты и хирономиды были представлены типичными литореофилами. В лимнических условиях основу зообентоса составили хирономиды, доля гаммарид существенно снизилась, а олигохеты встречались единично. В хирономидном сообществе преимущество получили псаммопелофильные виды в основном подсемейства Chironominae, которые обитали в Ангаре до зарегулирования на илисто-песчаных грунтах. Следует отметить, что доминирование Chironominae в хирономидных сообществах характерно так же для Братского и Усть-

Илимского водохранилища, в отличие от Иркутского, где наряду с Chironominae велика роль Orthocladinae.

Количественные показатели зообентоса на исследованном участке снизились после зарегулирования плотиной Богучанской ГЭС. Так, ранее численность в Ангаре составляла 2,5 тыс. экз./м², биомасса – 5 г/м². В условиях водохранилища биомасса уменьшилась примерно вдвое, а максимум численности (2,2 тыс. экз./м²) зафиксирован лишь в 2018 г в литоральной зоне. Кроме того, зафиксировано снижение индекса видового разнообразия Шеннона: даже в литоральной зоне Богучанского водохранилища он не превышал в среднем 2,1 бит, тогда как в Ангаре до зарегулирования составлял 2,6 бит.

Основные публикации по разделу:

- Андрианова А.В., Шанько Ю.В. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа // Экология. 2022. № 2. С. 145–152. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.31857/S0367059722020032
English-версия: Andrianova A.V., Shan'ko Y.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. Vol. 53, № 2. P. 128–135. [Q4 Web of Science] DOI: 10.1134/S1067413622020035
- Андрианова А. В. Современные сведения о зообентосе и оценка экологического состояния Богучанского водохранилища // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2022. Т. 16, № 7 (198). С. 438-454. [Список ВАК] DOI: 10.33920/sel-09-2207-01

1.7. Биометрический анализ данных по структурной и пространственно-временной организации гидробиологических сообществ

Сформирована единая база данных рядов натуральных наблюдений за 2000-2017 гг. по содержанию растворенного кислорода в водной среде, биологического потребления кислорода (БПК), численности и биомассы бактериопланктона, доминантно-видового состава, численности и биомассы фитопланктона, продукционной активности фитопланктона, по размерно-весовым характеристикам репрезентативных выборок рыб пяти видов и функциональной активности клеток их крови в русле и заливах средней части Красноярского водохранилища с привязкой станций отбора проб к лоции Красноярского водохранилища в летний период с учетом уровня водонаполнения водотока, сроков летнего периода. Данные базы позволяют производить выборки зон средней части водохранилища по признакам качества по отдельным трофическим уровням и устанавливать его влияние на другие.

Существенные изменения уровня воды в водоеме неизменно сказываются на его гидрохимическом и биологическом режиме и закономерно отражаются на питании, развитии, размножении и поведении рыб.

Согласно данным многолетних наблюдений качество воды, оцененное по среднелетним значениям биомассы фитопланктона и индекса сапробности, соответствует 3-му классу β -мезосапробной зоне, однако в многоводные годы весь летний период сохраняется на уровне 2а класса, в средневодные годы на уровне 2б класса, а в маловодные годы на протяжении лета изменяется от 2а в июне, 2б в июле до 3 класса в августе [3]. При отсутствии достоверных отличий величины валовой первичной продукции в разнородные годы в начале и конце летнего сезона, средние за вегетационный сезон и особенно в июле значения удельной первичной продукции в средневодные годы были достоверно меньше, чем в маловодные и многоводные. Первичная продукция как первоисточник энергии для гетеротрофных организмов (от бактерий до рыб) и основание трофической пирамиды считается главным критерием общей биологической продуктивности водных экосистем. Среди абиотических факторов, которые важно учитывать в модели оценки и прогноза рыбопродуктивности водоема, начиная с первичной продукции фитопланктона, выделяется средняя и максимальная глубина водоема, влияющая наряду с другими параметрами на продукцию фитобентоса, доступность питательного субстрата для рыб. Продуктивность ихтиоценоза также определяется потенциальной удельной продуктивностью каждой отдельной особи рыб разных видов. Целостность организма рыб и стабильность его функционирования в условиях воздействия изменяющихся природных и антропогенных факторов обеспечивается сложной системой гомеостаза, многокомпонентность которой включает в себя и механизмы неспецифической резистентности.

Хемилюминесцентная кинетика генерации АФК клетками крови при антигенной активации *in vitro* может служить интегральным показателем потенциальной активности про- и антиоксидатных систем крови и отражать состояние реактивности системы неспецифической резистентности, локализованной в периферической крови рыб. На основании статистического анализа показателей кинетики АФК крови леща, плотвы и окуня в летней динамике содержания растворенного кислорода в воде выявлены общие и отличительные видовые и возрастные особенности корреляции параметров ХЛГ рыб с содержанием растворенного кислорода в различные временные отрезки летнего периода, заметно отличающиеся при разных уровнях воды (Рис. 19).

По среднемноголетним значениям объем (S) генерируемых АФК имеет обратную зависимость от содержания кислорода в воде у всех видов рыб. Выявлено, что уровень скоррелированности у рыб с изменением возраста также изменяется (Рис. 20). У окуня

увеличивается в возрастной период 2+ – 5+, у леща не изменяется от 5+ до 9+, затем снижается. У плотвы нарастает в возрастном интервале 2+ – 6+ и далее снижается до 9+. По параметру Tmax только у окуня есть прямая зависимость увеличения с возрастом.

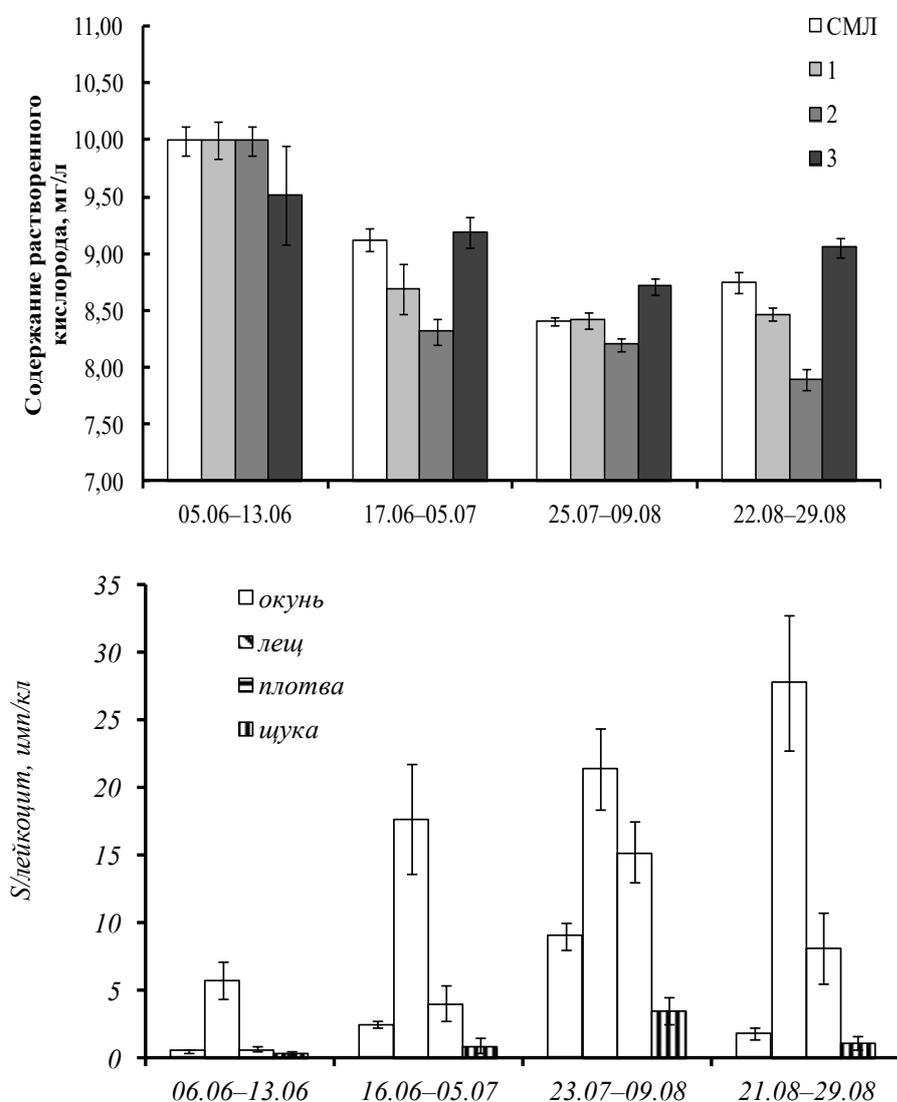
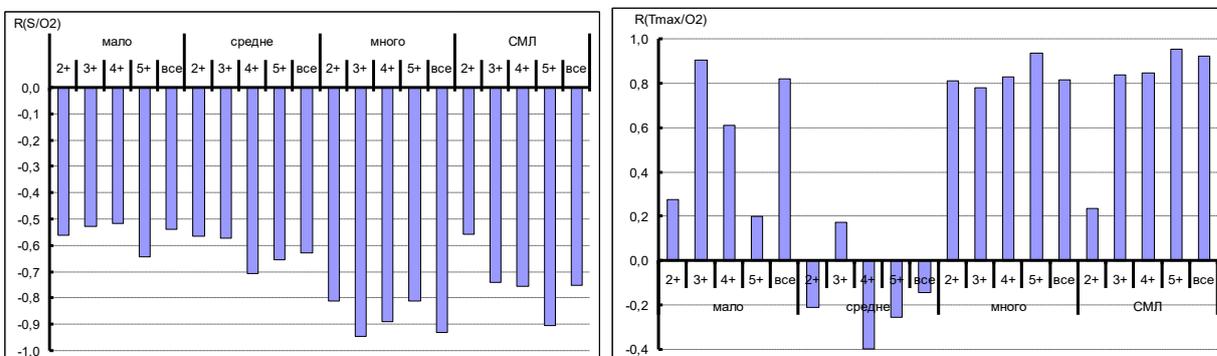


Рисунок 19 – Содержание растворенного кислорода в воде при различном уровне водонаполненности Красноярского водохранилища (А) и удельная активность лейкоцитов крови рыб по генерации АФК при антигенной активации *in vitro* (Б) на протяжении летнего периода. СМЛ – среднее многолетнее; 1 – маловодный, 2 – средневодный, 3 – многоводный сезон. По оси абсцисс – даты отлова рыб и отбора проб воды.

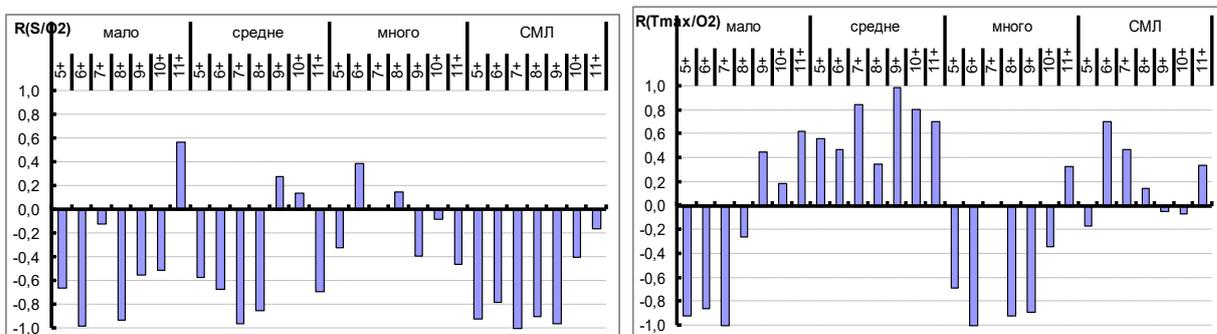
Изменение уровня воды в водохранилище отражается не только на летней динамике содержания растворенного кислорода, но на зависимости от него (содержания O₂) активности генерации АФК клетками крови рыб. У окуня при высокой воде увеличивается, при малой и средней снижается, причем при среднем уровне наиболее заметно снижается уровень

прямой и даже переходит в обратную зависимость от величины содержания O_2 в воде параметра времени достижения максимума T_{max} респираторного взрыва. У плотвы и леща проявляется обратный эффект (Рис. 18).

ОКУНЬ



ЛЕЩ



ПЛОТВА

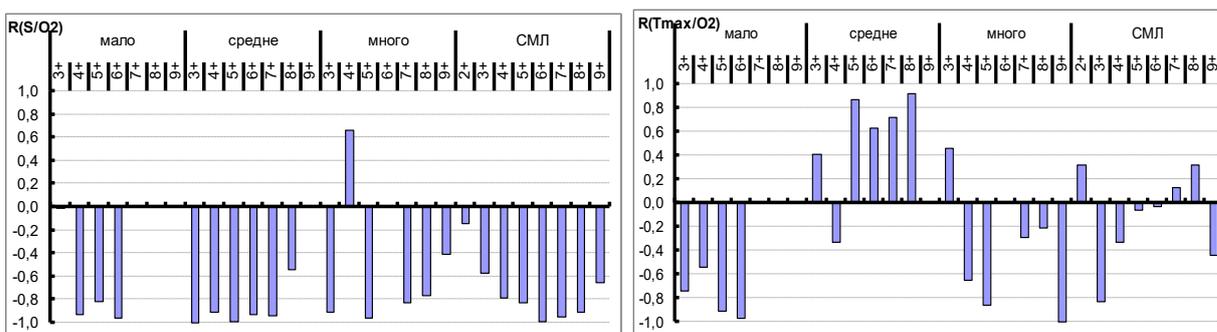


Рисунок 20 – Уровень корреляционной зависимости параметров кинетики генерации АФК клетками крови рыб от содержания растворенного кислорода в воде в летний период при среднем многолетнем (СМЛ) уровне, маловодном, средневодном и многоводном уровне Красноярского водохранилища.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ (ГЕОПОРТАЛОВ) МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН

На протяжении ряда последних лет в Красноярском научном центре СО РАН значительное внимание уделяется исследованиям и разработкам, связанным с задачами мониторинга и оценки состояния атмосферного воздуха г. Красноярска. В непрерывном режиме осуществляется развитие аппаратного и программно-технологического обеспечения этой системы. По всему городу установлено и продолжает расширяться разнообразное оборудование, устройства для регистрации характеристик природной среды – датчики концентрации взвешенных частиц в атмосфере, метеостанции, измеряющие атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, датчики температуры воды в различных точках р. Енисей, специальное оборудование для измерения вертикальных профилей атмосферы (температурные профилемеры МТР-5), несколько оригинальных измерительных устройств для измерений температуры воздуха над поверхностью воды р. Енисей (термокосы), анемометры для регистрации скорости и направления ветра, видеокамеры для фиксации туманов над Енисеем, и проч. Значительное внимание также уделяется экспериментальным исследованиям состояния атмосферы над руслом р. Енисей с применением квадрокоптера, особенно в зимнее время, над незамерзающей полыньей.

Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН (далее здесь – Система) – это комплекс специального оборудования и программного обеспечения, предназначенный для сбора и анализа объективных данных о состоянии атмосферного воздуха в г. Красноярске, в составе которого, во первых, распределенные по городу сертифицированные и откалиброванные автоматические станции контроля загрязнения атмосферного воздуха (станции мониторинга), регистрирующие характеристики атмосферы и передающие эту информацию в централизованную базу данных через сотовую сеть, во вторых, специальные программные средства – встроенное программное обеспечение станций мониторинга и веб-интерфейс для их администрирования, подсистема хранения регистрируемых данных и программные интерфейсы для их загрузки через веб-сервисы, средства для оперативной обработки и визуализации данных. Интернет-адрес Системы: <https://air.krasn.ru/>.

Программно-технологическая платформа разработки – Геопортал ИВМ СО РАН, его подсистема «Данные оперативного мониторинга».

Основной задачей создания и эксплуатации Системы является формирование информационно-аналитической основы для научных исследований и разработок, направленных на решение задач улучшения экологической обстановки в г. Красноярске.

После заключенного в 2021 году Соглашения между Министерством экологии и рационального природопользования Красноярского края, Красноярским научным центром СО РАН и общественными организациями о создании единой системы мониторинга атмосферного воздуха (<http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/news/0/news/99643>), сотрудниками ИВМ СО РАН были проведены работы по интеграции баз данных экологического мониторинга, сформирована единая централизованная база данных. В результате появилась возможность детального пространственного анализа состояния атмосферного воздуха в городе (Рис. 21).

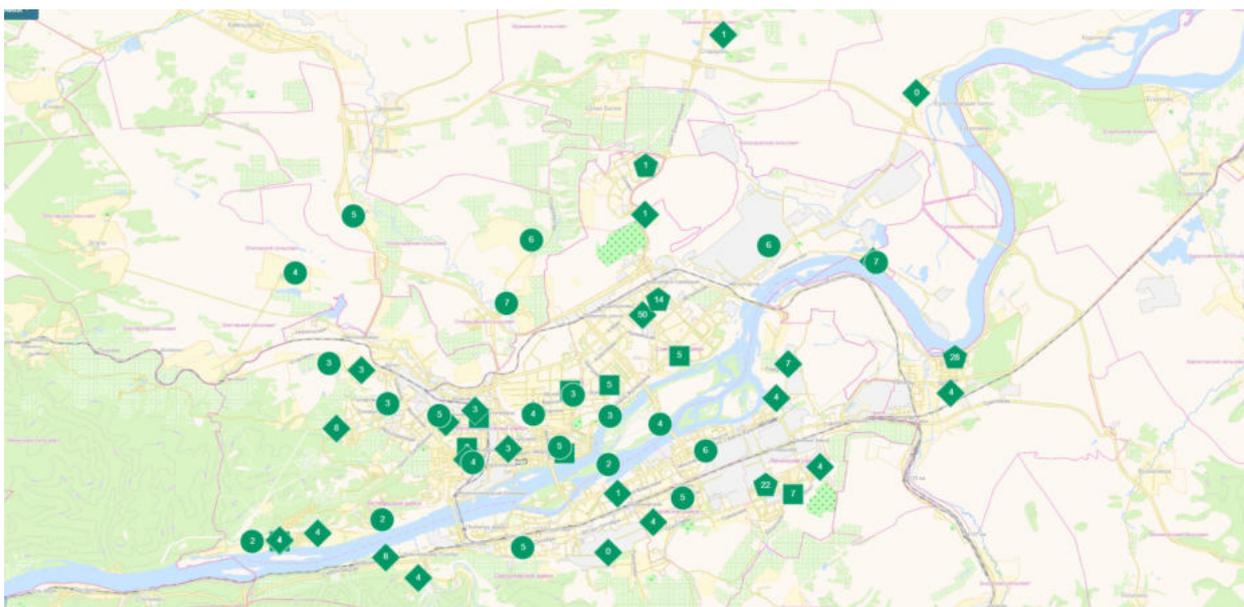


Рисунок 21 – Станции мониторинга воздуха объединенной городской системы мониторинга воздуха г. Красноярска.

В отчетном 2022 году выполнены работы по настройке, развитию пользовательских и программных интерфейсов объединенной системы мониторинга (Рис. 22).

Развитие системы сбора данных по атмосферному воздуху привело к необходимости модернизации серверного оборудования, связанных с ним средств технического обеспечения. В связи с возросшей нагрузкой и увеличившимся объемом новых данных подсистема «Данные оперативного мониторинга» была перенесена на новый выделенный сервер с сервера геопортала ИВМ СО РАН. Это позволило снизить нагрузку на геопортал Института и более эффективно распределить нагрузку между поступающими потоками данных и алгоритмами их обработки.

Модернизация оборудования обеспечила возможность беспрепятственного подключения ряда новых датчиков, устройств сбора данных (температурные профилемеры МТР-5, датчики температуры воды, сеть видеочкамер для регистрации туманов, и проч.).



Рисунок 22 – Интерфейсы пользователя системы мониторинга воздуха г. Красноярска:

а) средние значения загрязнения воздуха, скорости и направления ветра за последние 7 дней, б) графики динамики доли ПДК (средней концентрации $PM_{2.5}$ за последние 24 часа, нормированной на среднесуточную ПДК 35 мкг/м^3), в) интерфейс системы на смартфоне.

Основные публикации по разделу:

- Kadochnikov A.A. Technologies and principles of data collection and processing for the atmospheric air state monitoring system // Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: материалы VI Всероссийской конференции, Владивосток, 3–8 октября 2022 г. / Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерал. университета, 2022. С. 36. DOI: 10.24866/7444-5341-1.
- Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Картографическое веб-приложение для визуализации состояния атмосферы г. Красноярска // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022610487, 12.01.2022. Заявка № 2021682040 от 29.12.2021.

2.2. Формирование региональной геопространственной базы данных по температуре и осадкам на основе спутниковой информации и климатических моделей

Современные исследования природных и антропогенных систем неизбежно приводят к необходимости решения задач информационно-вычислительного обеспечения климатической информацией. Два основных источника данных, которые становятся все более взаимосвязанными – спутниковые снимки с информационными продуктами на их основе и климатические модели (данные реанализа).

В рамках настоящего проекта было разработано и внедрено программное обеспечение для приема, архивирования и анализа ежедневных данных по осадкам GPM, а также данных по температуре и ряду других характеристик NCEP GFS.

Проект Global Precipitation Measurement (GPM) является совместной миссией американского научно-исследовательского управления NASA и японского аэрокосмического агентства JAXA, а также ряда других международных космических агентств, цель которой – проводить частые наблюдения за снежными и дождевыми осадками на Земле и устанавливающая стандарты измерения атмосферных осадков из космоса. Проект предоставляет централизованный доступ к глобальным картам осадков, с целью помочь исследователям улучшить прогнозирование экстремальных явлений, изучить глобальный климат и расширить существующие возможности для использования таких спутниковых данных на благо общества (<https://gpm.nasa.gov>).

В ИВМ СО РАН был сформирован набор программ для загрузки и обработки данных об осадках с целью комплексного анализа данных за длительный период времени. Сформирована база данных, позволяющая в онлайн режиме получать данные по осадкам в выбранной точке за период от одних суток до нескольких лет с шагом в месяц, неделю или 4 суток. Композит данных длиной 4 суток был выбран для совместимости с данными некоторых продуктов MODIS, имеющих наборы данных с шагом в 8 суток. Общая схема подготовки данных представлена на рисунке 23.

Процесс подготовки данных выполняется ежедневно, состоит из следующих этапов: загрузка файла с данными об осадках за очередные сутки, чтение данных и их обрезка по границам территории России, формирование композитных изображений, расчет средних значений и растров (недельные и месячные данные). Отдельно формируется векторная сетка из растровых файлов для информационных пространственных запросов к БД.

Инструменты для просмотра и анализа данных, имеющих временное измерение в геопортале ИВМ СО РАН позволяют просматривать данные в выбранный пользователем момент времени в одном ресурсе геопортала с помощью инструментов навигации по временному отрезку.



Рисунок 23 – Формирование набора данных Global Precipitation Measurement (GPM).

На геопортале ИВМ СО РАН добавлена возможность создания плавной градиентной раскраски тематических карт и спутниковых данных. Новые инструменты позволяют существенно улучшить возможности геопортала при работе со спутниковыми данными, имеющими временные измерения, а у пользователя появляются дополнительные возможности для анализа данных наблюдения за выбранный период времени.

Еще одним набором данных, для которого был создан комплекс программных инструментов для скачивания, архивирования и предварительной обработки, являются данные климатической модели NCEP GFS. Модель GFS – это одна из самых известных и популярных моделей прогноза погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и вариационный анализ, разработанная Национальным центром экологического прогнозирования США (NCEP). Данная модель является совокупностью четырех отдельных моделей: атмосферы, океана, суши/почвы и морского льда. Атмосферная модель разбита по вертикали на 127 уровней. Глобальный анализ данных и прогнозирование осуществляется 4 раза в сутки вплоть до 384 часов. Текущее горизонтальное разрешение составляет 0.25 градуса с января 2015 года. Исходные файлы модели NCEP GFS содержат более 600 слоев метеоинформации, из них около 90 являются уникальными метеопараметрами (температура, влажность воздуха, скорость ветра и т.д.), многие из которых приведены на десятках вертикальных уровней. Например, параметр «температура» приведен для 73 уровней, из которых в слое от поверхности земли до 1500 метров насчитывается 10 уровней. В связи с этим метеоданные модели GFS могут быть основой для анализа суточного хода температуры в приземном слое атмосферы, периодов температурных инверсий.

Данные модели GFS в настоящее время используются в целом ряде научно-исследовательских задач, решаемых в ИВМ СО РАН. В частности, их совместный анализ с данными метеорологического температурного профилера МТР-5 помогает определить состояние устойчивости атмосферы, оценивать вероятность возникновения неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы (Рис. 24).

Для визуализации и оперативного анализа сформированного набора данных реанализа NCEP GFS был создан специализированный веб-интерфейс (Рис. 25).

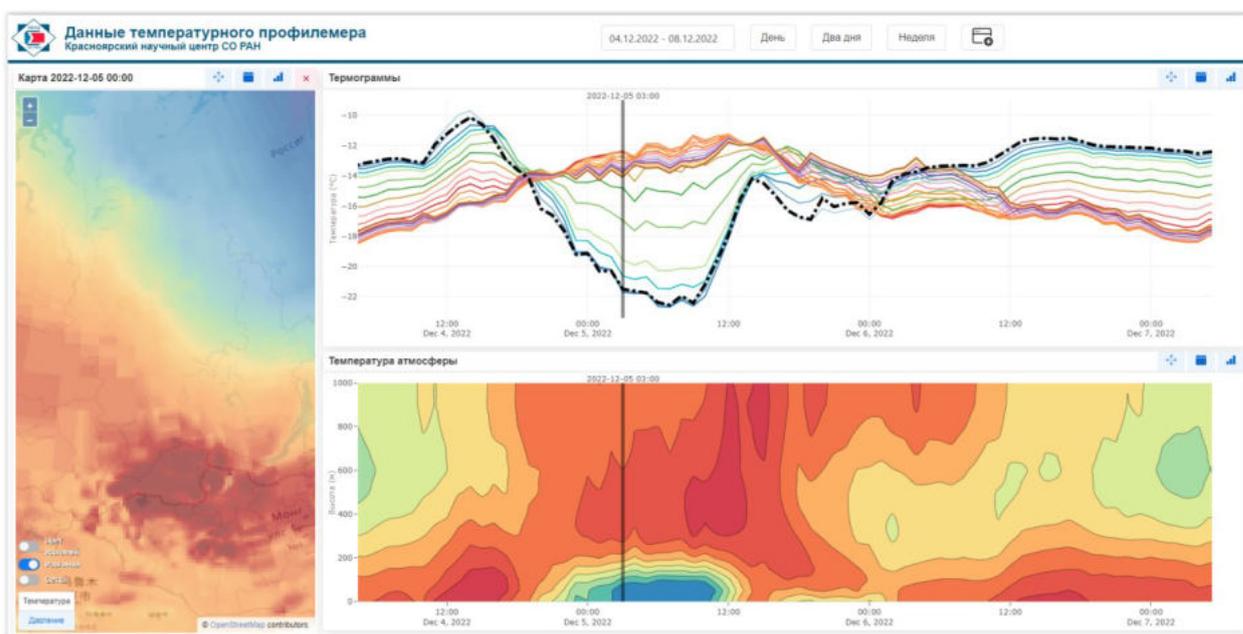


Рисунок 24 – Веб-интерфейс системы экологического мониторинга отображает картографические данные NCEP GFS по температуре и давлению на разных высотах совместно с данными измерений метеорологического температурного профилера МТР-5.

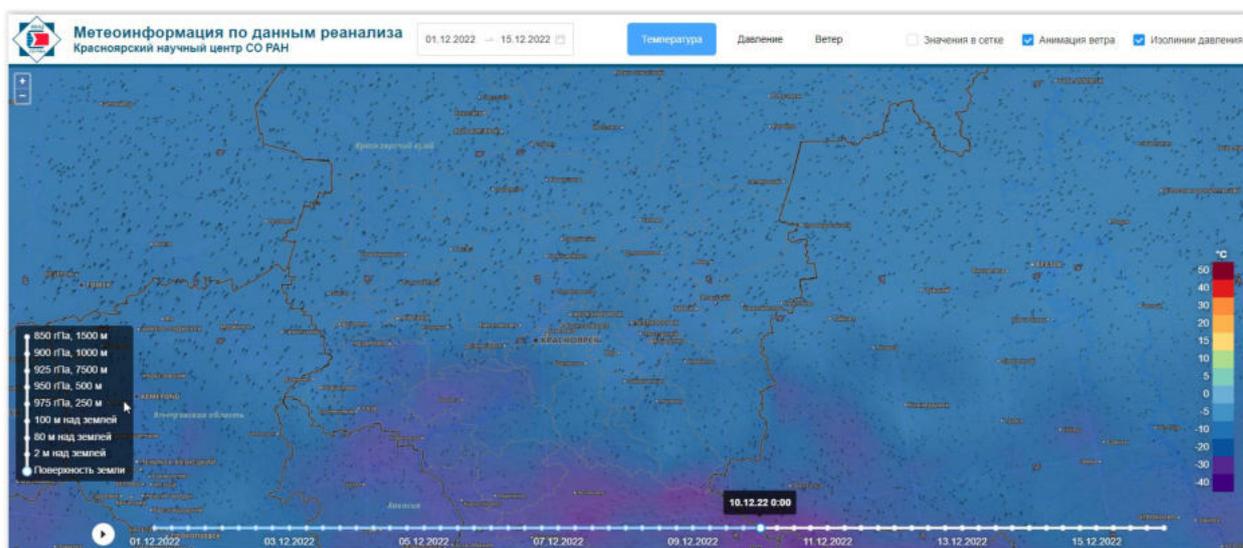


Рисунок 25 – Веб-интерфейс к данным реанализа NCEP GFS на геопортале ИВМ СО РАН.

2.3. Программное обеспечение для визуализации данных метеорологического температурного профилемера

Одной из задач в рамках реализации настоящего проекта стало создание программно-технологического обеспечения визуализации данных метеорологического температурного профилемера МТР-5. Разработанные программные средства базируются на следующих программных инструментах: vue.js, plotly.js, element-plus и node.js. В созданной программе реализованы несколько модулей для обработки и создания наборов данных для визуализации. На рисунке 26 представлена схема модулей программы.

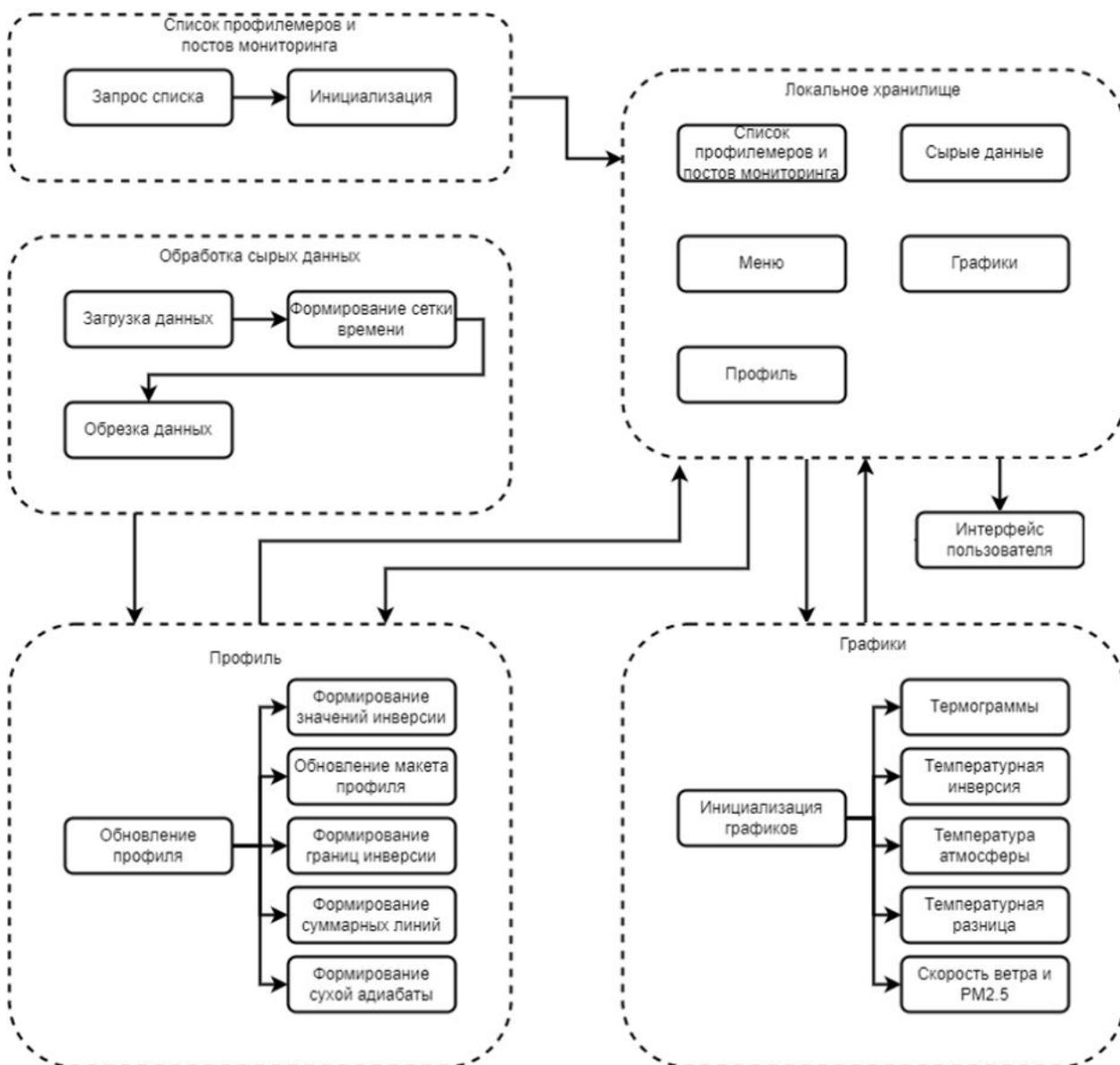


Рисунок 26 – Модульная система программы визуализации данных метеорологического температурного профилемера.

Первый модуль «Список профилемеров и постов мониторинга» отвечает за загрузку и инициализацию списка существующего оборудования, куда входят такие параметры: уникальный идентификатор, имя и координаты. Инициализация списка задает каждому объекту свой цвет и устанавливает зависимое оборудование.

Второй модуль «Обработка сырых данных» отвечает за загрузку и обработку данных из списка оборудования. При обработке создается временная сетка, на которую накладываются данные. Это необходимо для создания «разрывов» в графиках, чтобы отобразить отсутствие данных.

Модуль «Профиль» отвечает за формирование различных сущностей, связанных с этим типом графика: границы инверсии по высоте, сухая адиабата, значения инверсии на каждой высоте и т.д.

Модуль «Графики» отвечает за формирование и инициализацию различных типов графиков: термограммы, температурная инверсия, температура атмосферы, температурная разница, скорость ветра и PM2.5.

На рисунке 27 представлено несколько типов графиков, формируемых программой.

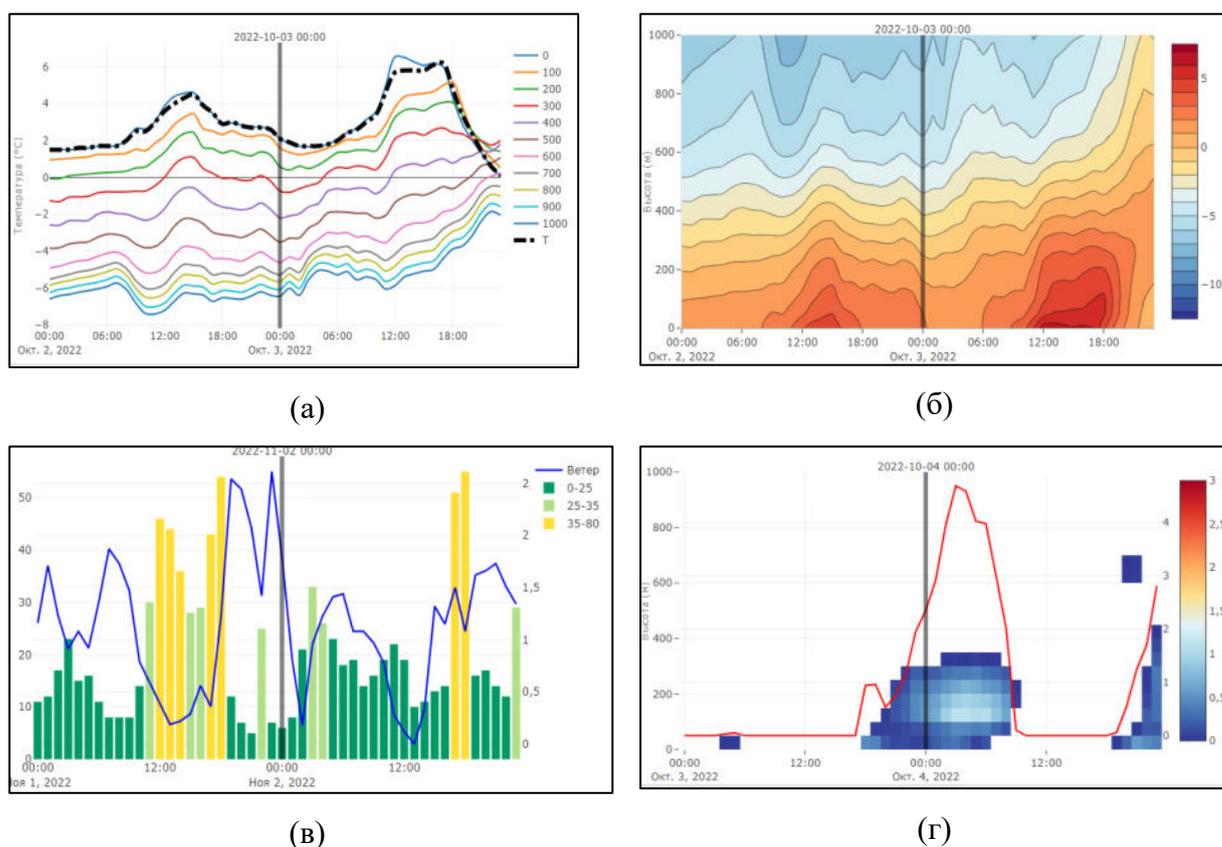


Рисунок 27 – Визуализация данных метеорологического температурного профилемера: термограммы (а), температура атмосферы (б), загрязнение и скорость ветра (в), температурные инверсии (г).

Модуль «Локальное хранилище» представляет собой систему управления состоянием приложения, где хранятся сформированные объекты для отображения на графиках, механизмы для управления различными настройками, сырые данные и т.д.

На данный момент существует два температурных профилера в системе. Один профилимер является статичным, другой мобильным. Мобильный профилимер, в зависимости от своего местонахождения, получает различные имена.

Таблица 3. Список профиломеров системы.

	Обозначение	Место размещения
#1	Стационарный	ул. Качинская, 56А
#2	Мобильный	
#2А	ГЭС	на территории Красноярской ГЭС
#2В	Посадный	на территории о. Посадный

Программа была разработана таким образом, чтобы позволить пользователю не только быстро переключаться между профиломерами, но и сравнить данных профиломеров. На рисунке 28 представлены данные графика «Профиль».

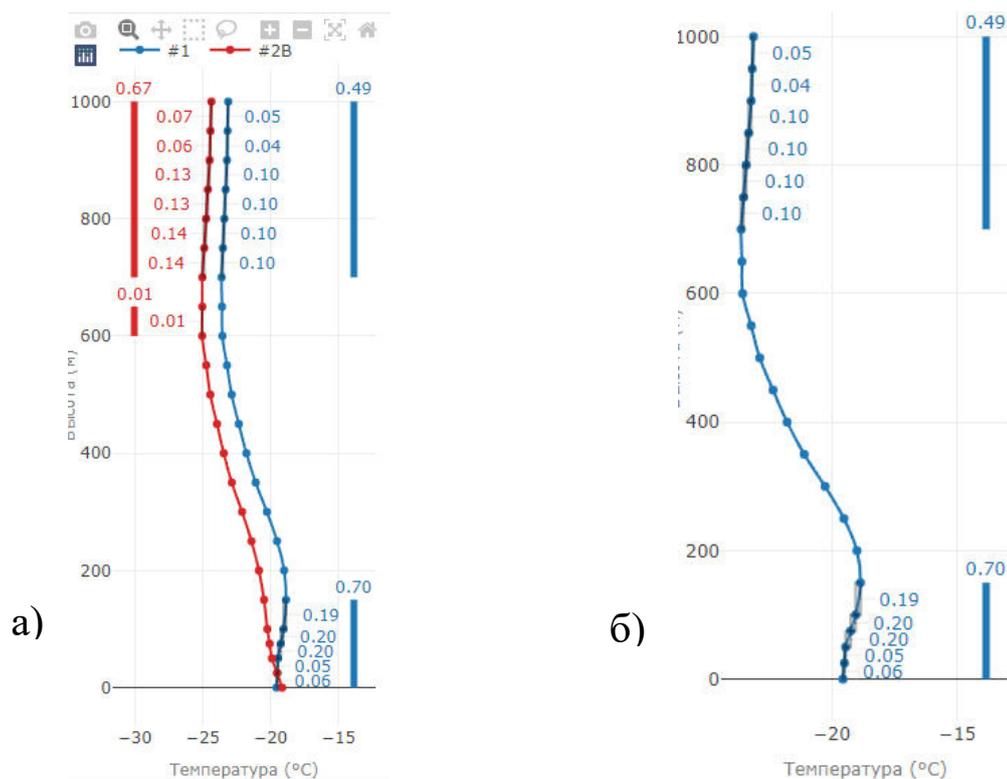


Рисунок 28 – Данные графика «Профиль» при сравнении данных метеорологических профиломеров (а) и без их сравнения (б).

Основное внимание при создании веб-приложения уделялось отображению и анализу данных по температурной инверсии. При выборе определенной точки на графике строится профиль. Отдельно для профиля рассчитываются температурные инверсии. С помощью написанного инструмента создаются определённые сущности для визуального отображения температурной инверсии на профиле. Если между соседними высотами есть инверсия, то между этими высотами строится прямоугольник, для которого указываются координаты по оси *y*. Справа от прямоугольника указывается значение температурной инверсии. Если на определенном участке множественные температурные инверсии, то считается сумма температурных инверсий и выводится на график в виде суммирующего прямоугольника. Сверху него отображается сумма температурных инверсий за этот промежуток.

Веб-приложение позволяет определить типы термической устойчивости, продолжительность температурной инверсии, прохождение холодных и теплых атмосферных фронтов, анализировать динамику изменения состояния атмосферы.

Основные публикации по разделу:

- Кадочников А.А., Токарев А.В., Малимонов М.И., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Визуализация данных температурного профилера // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022664929, 08.08.2022. Заявка № 2022663951 от 26.07.2022.
- Малимонов М. И. Веб-интерфейс для отображения и взаимодействия с данными температурного профилера // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXV): тезисы докладов (Красноярск, 14 апреля 2022 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2022. С. 83.

2.4. Разработка приборной базы для регистрации метеорологических параметров и загрязнения атмосферы взвешенными частицами на базе БПЛА

Развитие технологий мониторинга воздуха с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет получить значительный объем качественных данных и проводить их анализ данных на новом уровне. Появляется возможность определить распределение концентрации примесей в атмосфере на разных высотах, а также выполнять измерения в труднодоступных местах и над водными поверхностями. Для решения поставленной задачи предлагается прототип прибора для измерения температуры, относительной влажности воздуха и оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью на базе БПЛА.

Неблагоприятные метеоусловия в г. Красноярске часто возникают в зимнее время года при низких температурах и повышенной относительной влажности воздуха из-за влияния незамерзающей реки Енисей. Анализ рынка показал, что ожидаемым условиям эксплуата-

ции лучше всего соответствует промышленный квадрокоптер DJI Matrice 210 V2. Это универсальная платформа, которая отличается прочностью и легкостью применения в различных отраслях промышленности. Подвес с камерой и объективом DJI Zenmuse X4S в базовой комплектации обеспечивает возможность гиростабилизированной покадровой/серийной/интервальной фото/видео съемки с разрешением до 5472×3648 (20 Мп). На корпусе предусмотрено два разъема DGC2.0, которые могут использоваться как для крепления стандартных камер, так и для стороннего навесного оборудования.

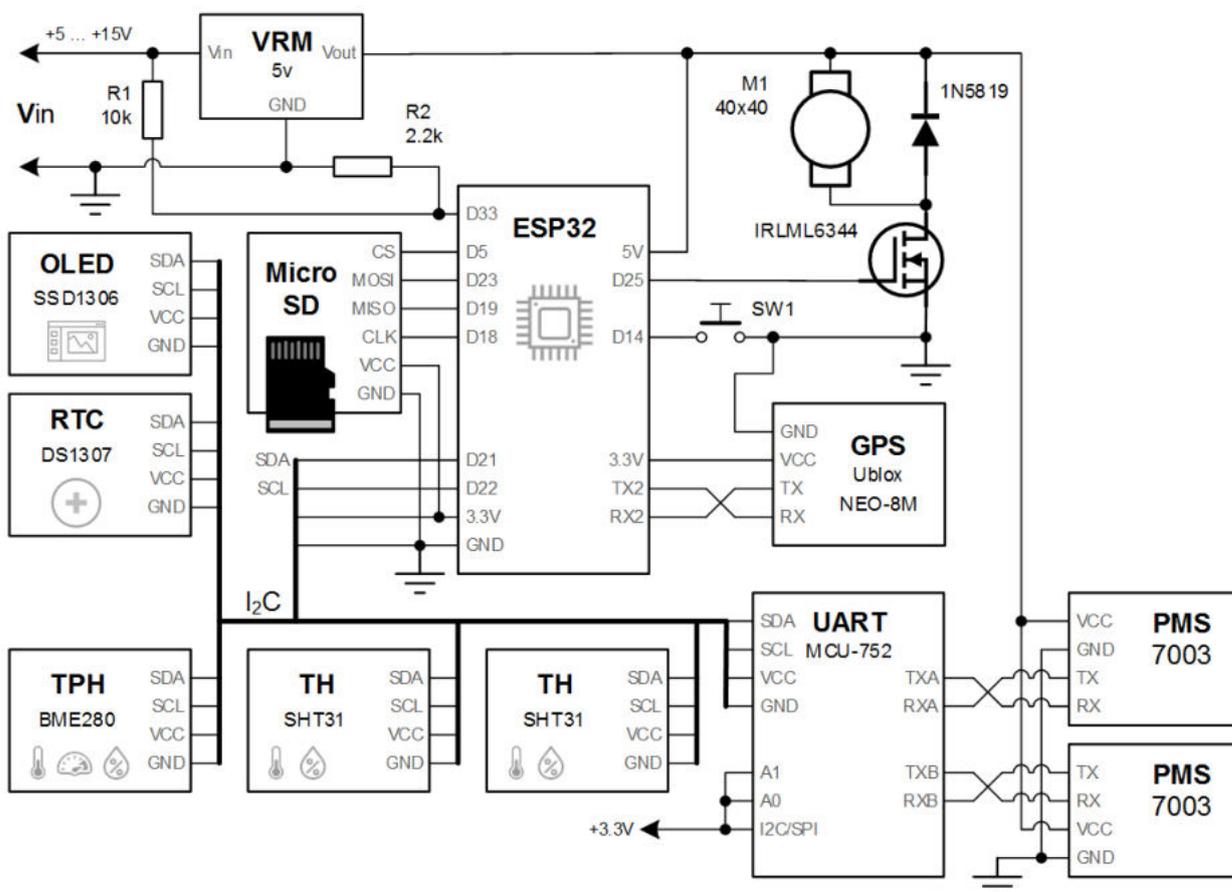


Рисунок 29 – Принципиальная схема измерительного прибора.

В разработанном измерительном оборудовании основой является высокопроизводительный модуль ESP-WROOM-32 от компании Espressif. Кристалл включает в себя 2-ядерный 32-разрядный процессор Tensilica Xtensa LX6, 520 Кб памяти SRAM и 448 Кб флеш-памяти, 4 Мб внешней флеш-памяти. Поддерживается передача данных с DMA, емкостные датчики, АЦП, ЦАП, ШИМ, интерфейсы I2C, UART, SPI, I2S. В приборе используется типовая макетная плата NodeMCU-32S с распаянным контроллером, стабилизатором питания и USB мостом. Основные компоненты измерительного прибора показаны на рисунке 29:

понижающий DC-DC преобразователь напряжения, микроконтроллер ESP32, карта памяти MicroSD, модуль часов реального времени, OLED дисплей, преобразователь интерфейса I2C-UART и набор внешних датчиков. Выбраны следующие датчики для измерения состояния атмосферы:

1. Bosch BME280 – комбинированный модуль датчика влажности, температуры и атмосферного давления с цифровым интерфейсом. Точность измерения относительной влажности: $\pm 3\%RH$, давления: $\pm 1.0hPa$, температуры: $\pm 1.0^{\circ}C$. Рабочий диапазон температуры: $-40\dots 85^{\circ}C$, давления: $300\dots 1100 hPa$.
2. Sensirion SHT31 – высокоточный цифровой датчик температуры и влажности, чип хорошо откалиброван и линеаризован. Типичная точность этого модуля составляет $\pm 2\% RH$ для относительной влажности и $\pm 0.3^{\circ}C$ для температуры. Диапазон рабочих температур: $-40\dots 125^{\circ}C$.
3. Plantower PMS7003 – универсальный цифровой датчик для измерения концентрации взвешенных частиц PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} компании Plantower. Точность сенсора находится в пределах $\pm 10\text{мкг}/\text{м}^3$ при концентрациях до $100\text{мкг}/\text{м}^3$ и $\pm 10\%$ при концентрациях более $100\text{мкг}/\text{м}^3$. Диапазон рабочих температур: $-10\dots 60^{\circ}C$, однако есть опыт использования при более низких температурах. В основе работы этого датчика лежит измерение рассеивания лазерного излучения на взвешенных частицах. С помощью встроенного микроконтроллера на основе физической модели рассеяния сферической, гомогенной, изотропной и немагнитной частицы в непоглощающей среде рассчитывается эквивалентный диаметр частиц и число частиц с разным диаметром на единицу объема.
4. uBlox Neo 8M – GPS/GLONAS модуль с активной антенной и UART интерфейсом.

Для повышения точности и надежности измерений, часть датчиков задублирована.

В приборе установлено два датчика PMS7003 для измерения концентрации PM , два датчика SHT31 и один датчик BME280 для измерения температуры, относительной влажности и атмосферного давления. Для минимизации влияния атмосферных осадков, солнечной радиации и ветра датчики установлены внутри пластикового кожуха жалюзийной конструкции (экран Стивенсона). Часть пластиковых элементов была спроектирована в программе 3D моделирования и распечатана на 3D-принтере Wanhao Duplicator 6 Plus.

Базовым фреймворком для программирования микроконтроллера ESP32 является ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) на основе FreeRTOS. FreeRTOS – это многозадачная, мультиплатформенная, бесплатная операционная система жесткого реального времени с открытым исходным кодом для встраиваемых систем. К сожалению, под ESP-IDF очень мало библиотек драйверов устройств, в отличие от среды разработки Arduino. Однако посредством фреймворка Arduino ESP32 поддерживается разработка в среде Arduino с

использованием огромного количества ее стандартных и сторонних библиотек. Для микроконтроллера была разработана внутренняя программа на языке C/C++, которая обеспечивает получение информации с внешних сенсоров, запись данных на карту памяти, отображение параметров на дисплее и взаимодействие с оператором. Реализация основного цикла программы выполнена на основе библиотеки TaskScheduler, которая позволяет использовать элементы кооперативной многозадачности.



Рисунок 30 – Размещение прибора на квадрокоптере DJI Matrice 210.

Прибор собран в пластиковом корпусе размером $150 \times 80 \times 70$ мм (Рис. 30). Для его соединения с квадрокоптером через стандартный разъем DGC2.0 был спроектирован и распечатан на 3D-принтере узел крепления с возможностью поворота в горизонтальной плоскости. Питание прибора выполняется от внешней Li-Ion батареи, состоящей из двух элементов типоразмера 18650, в защитном термокожухе. Во время работы данные записываются на MicroSD карту в виде CSV-файлов. Замеры выполняются с заданным интервалом (1 сек), при этом сохраняется привязка данных к географическим координатам, высоте и времени.

2.5. Информационная система для сбора и анализа данных о параметрах атмосферы с приборов, размещенных на БПЛА

Данные мониторинга, получаемые с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), имеют особенности по сравнению с данными со стационарных постов наблюдения. Основное отличие – это изменение положения в пространстве датчиков, как в горизонтальной плоскости, так и по высоте во время измерений. Необходимо учитывать эту особенность при обработке и анализе данных.

Для хранения данных, собираемых во время полетов с подвешеного оборудования и вспомогательной стационарной станции разработана концептуальная модель базы данных (Рис. 31). *Полет* описывает отдельную миссию с выполнением измерений. При регистрации оператор указывает его наименование и дополнительное описание задач, условий и каких-то особенностей. Для полета можно указать один из плановых *маршрутов*, которые в дальнейшем предназначены для структурирования всех данных. Поскольку местоположение взлета/посадки БПЛА обычно не совпадает с маршрутом, оператор указывает время начала и окончания основного блока миссии.

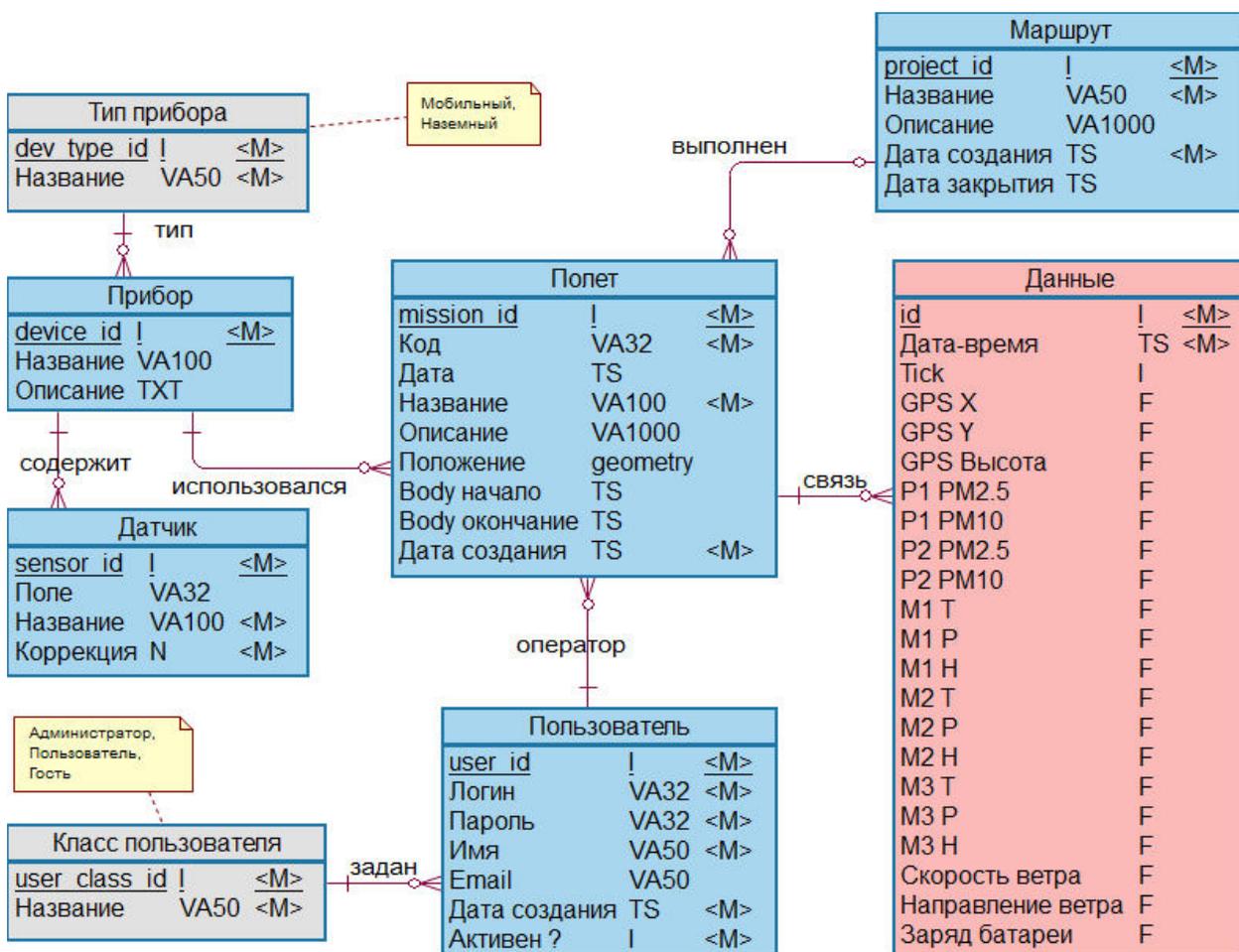


Рисунок 31 – Концептуальная модель базы данных полетов.

Предусмотрено использование различных типов оборудования при выполнении полета, для этого предназначена сущность **прибор**. В зависимости от **типа** это может быть, как подвесное оборудование, так и оборудование для наземной вспомогательной станции. Для каждого прибора регистрируется набор **датчиков**, с которых собираются данные. У каждого датчика задается **показатель**, который он измеряет и поле в таблице данных для хранения. Поддерживается автоматическая коррекция систематических ошибок с каждого датчика после калибровки приборов. Измеренные значения показателей собираются в таблице **данных**.

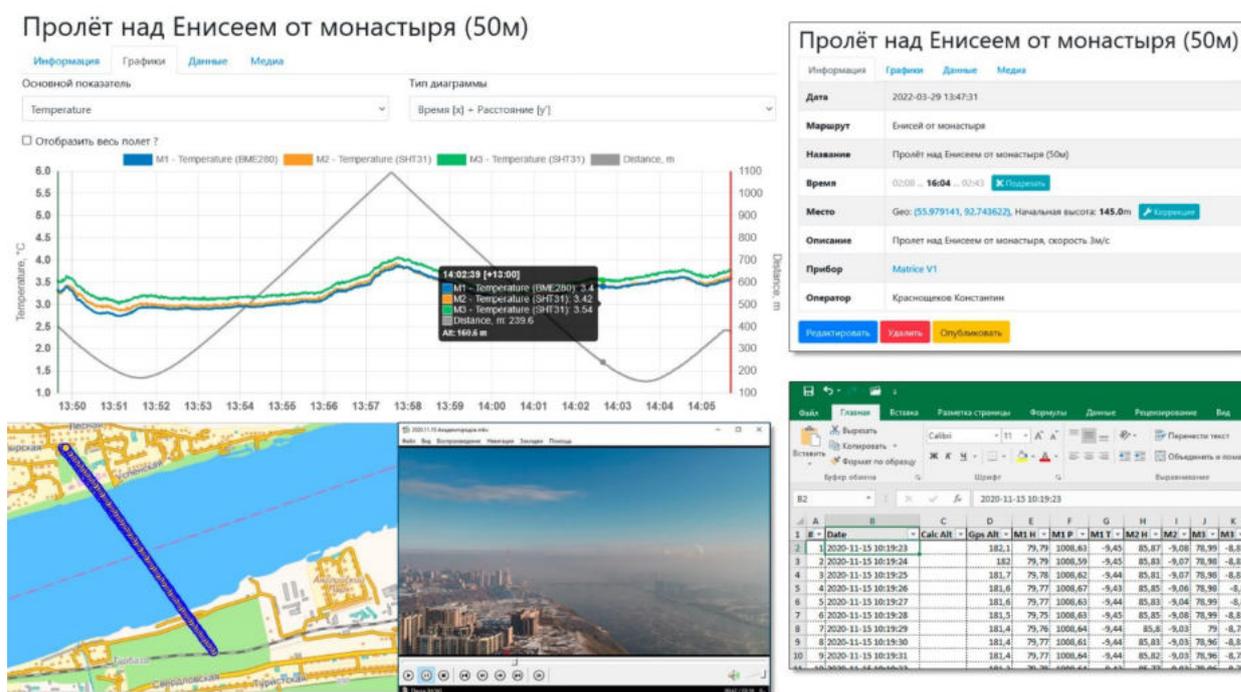


Рисунок 32 – Элементы пользовательского интерфейса.

Информационно-аналитическая система построена в виде веб-приложения (Рис. 32) с рабочими столами для администратора, оператора и аналитика. Все выполненные полеты систематизируются операторами и размещаются в каталоге системы. Модуль импорта данных обеспечивает загрузку данных из обменных файлов с навесного оборудования квадрокоптера. В интерфейсе импорта данных оператор указывает прибор, с которого получены результаты, маршрут выполненного полета, название, описание условий и особенностей миссии, а также указывает файл с данными для загрузки. В результате данные попадают в единую базу полетов для хранения и аналитической обработки.

Для просмотра данных наблюдений создан блок визуализации и анализа данных. В главном окне раздела отображается таблица с выполненными полетами с возможностью поиска и фильтрации. В карточке полета указываются основные характеристики, собранные

данные в табличной форме, инструменты для интерактивной визуализации и анализа данных, а также дополнительные фото-видеоматериалы.

Страница раздела «Графики» состоит из блока настроек, диаграммы изменения выбранного показателя и карты, на которой отображается траектория полета. На диаграмме может отображаться один из показателей: температура воздуха, атмосферное давление, относительная влажность воздуха, концентрация PM1, PM2.5, PM10, высота полета. Если на приборе установлено несколько датчиков, то отображаются значения с каждого датчика в виде нескольких серий данных.

Тип диаграммы задает форму представления данных на диаграмме, влияя на выбор осей координат:

- **Время [x]** – по оси X отображается местное время (ММ:СС).
- **Время [x] + Расстояние [y`]** – по оси абсцисс отображается время, а также добавляется вспомогательная серия данных с расстоянием от точки старта на дополнительной оси ординат y`.
- **Время [x] + Высота [y`]** – по оси абсцисс отображается время, а также добавляется вспомогательная серия данных с высотой полета на дополнительной оси ординат y`.
- **Расстояние [x]** – по оси абсцисс отображается расстояние от точки взлета.
- **Высота [x]** – по оси абсцисс отображается высота полета.

Выбирая тот или иной тип диаграммы, можно анализировать различные срезы данных. Предусмотрена возможность отображения не только данных основной фазы полета, но участки взлета и посадки. При наведении указателя мыши на линию одной из серий данных диаграммы появляется всплывающее окно с характеристиками текущей точки. Диаграмма и траектория полета на карте связаны между собой. Для выполнения расширенной аналитической обработки данных реализован табличный экспорт в формате CSV или Microsoft Excel.

В результате проведенных исследований и многолетнего опыта решение было построено на основе свободно распространяемых технологий и программного обеспечения: основной язык разработки – PHP 7; СУБД PostgreSQL 12 с расширением PostGIS 3.0; платформа для публикации картографических данных MapServer 7, PHP-фреймворк Yii 2 для разработки масштабируемых веб-приложений, основой картографического модуля служит библиотека OpenLayers.

2.6. Анализ взаимосвязи между загрязнением атмосферы Красноярска и температурными инверсиями по данным реанализа NCEP GFS

Как и все крупные города, Красноярск подвержен негативному влиянию на экологическую обстановку, особенно в холодное время года, когда возрастает роль источников теплоснабжения, печного отопления.

Одним из главных факторов возникновения повышенного загрязнения воздуха в Красноярске является метеорология. Периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ) характеризуются низкой скоростью ветра и наличием приземных или приподнятых температурных инверсий в атмосфере, что в совокупности препятствует вертикальному и горизонтальному рассеянию загрязняющих частиц. Возникает необходимость исследования различных метеорологических параметров нижнего слоя атмосферы для решения задач, связанных с изучением периодов неблагоприятной экологической обстановки в городе.

На сегодняшний день существующие наборы данных реанализа и глобальных моделей прогноза погоды обладают достаточно высоким пространственным и временным разрешением и могут предоставить как архивные метеоданные, так и прогнозы вплоть до двух недель вперед и больше. В настоящей работе рассматривалась модель прогноза погоды Национального центра экологического прогнозирования США (NCEP) Global Forecast System (GFS), которая считается одной из самых популярных в мире.

Исходные данные модели NCEP GFS представляют собой файлы формата *.grib2 и содержат более 600 слоев метеоинформации, из них около 90 являются уникальными метеопараметрами (температура, влажность воздуха, скорость ветра и т.д.), многие из которых приведены на десятках вертикальных уровней. Например, параметр «TMP» (температура) приведен для 73 уровней, в слое от поверхности земли до 1.5 километров насчитывается 10 таких уровней. В связи с этим метеоданные модели GFS могут быть основой для анализа суточного хода температуры в приземном слое атмосферы, периодов образования температурных инверсий.

Массивы исходной информации GFS занимают терабайты дискового пространства, в связи с чем возникает задача автоматизации процессов загрузки, обработки и выдачи сформированных данных на исследуемую территорию за интересующий период времени.

Реализованная в рамках выполнения настоящего проекта система хранения и обработки данных реанализа выполнена на основе программно-вычислительных средств геопортала ИВМ СО РАН. Загрузка данных в базу геопортала осуществляется напрямую с ресурса NCO (портал центральных операций NCEP) благодаря скрипту загрузки данных, использующему свободное программное обеспечение GNU Wget. Пополнение данных происходит в оперативном режиме по мере их подготовки на стороне разработчика.

Обработка данных подразумевает извлечение всех или отдельных метеорологических параметров из общего набора в конкретном исходном файле на различных вертикальных уровнях, например, температура воздуха на изобарических поверхностях 1000-850 мбар, скорость ветра на высотах 10, 20, 50 и 100 метров и т.д. Был реализован механизм выгрузки обработанных данных в табличном виде. Для этого были написаны специальные программные инструменты на языке Python, включающие в себя утилиту и библиотеку для чтения, записи и редактирования метеорологических данных формата *.grib2 wgrib2.

Доступ к обработанным данным производился стандартными средствами геопортала ИВМ СО РАН, которые включают в себя экспорт табличных данных, возможность выбора временных интервалов. По запросу пользователь может загрузить нужный для исследования набор метеоданных за интересующий период времени, в том числе прогностическую информацию.

Выявление слоев температурной инверсии производилось путем получения разности между данными о температурах на различных вертикальных уровнях, когда разность дает отрицательное значение. Например, при отрицательной разности между температурами на изобарических поверхностях 1000 и 925 mb – инверсия считается приземной или приподнятой, если между 925 и 850 mb – приподнятая или высотная (инверсия свободной атмосферы).

В рамках данной работы проводился совместный анализ метеоданных модели NCEP GFS с результатами наземного мониторинга воздуха в Красноярске для холодных периодов с 2019 по 2021 год. Использовались данные анализа модели NCEP GFS о температуре воздуха на трех вертикальных уровнях, соответствующих трем изобарическим поверхностям: 1000, 925 и 850 mb; информация о порывах ветра (GUST), а также данные о концентрациях частиц PM_{2.5} наземной сети мониторинга воздуха для зимних периодов (ноябрь-февраль) 2019, 2020 и 2021 года Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН эксплуатацию и поддержку которой осуществляет ИВМ СО РАН.

Анализ данных показал высокий уровень корреляции между наличием температурных инверсий и периодами повышенного загрязнения взвешенными частицами PM_{2.5}. Во время всего периода исследования в 81% случаев превышение среднесуточного ПДК концентрациями PM_{2.5} сопровождалось температурными инверсиями.

Были выбраны дни, когда детектировались одновременно и среднесуточные концентрации PM_{2.5}, превышающие среднесуточную ПДК, и температурные инверсии атмосферы, всего 105 из 130 дней с повышенным уровнем загрязнения воздуха за весь период исследования. Установлена устойчивая взаимосвязь между вариациями значений интенсивности температурных инверсий (ΔT) и среднесуточных концентраций PM_{2.5} для выбран-

ных 105 дней с повышенным загрязнением атмосферы (Рис. 33). О согласованности интенсивности приземных температурных инверсий ΔT и среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$ свидетельствует коэффициент корреляции 0.6 (Рис. 34).

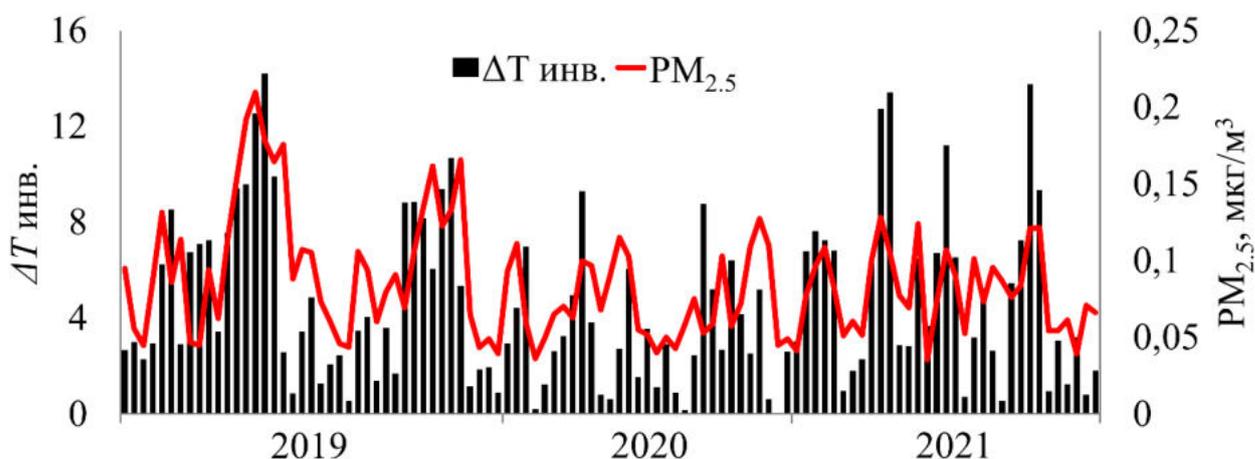


Рисунок 33 – Динамика изменения концентраций $PM_{2.5}$ и интенсивности инверсий ΔT в периоды повышенного загрязнения воздуха зимой 2019, 2020 и 2021 года.

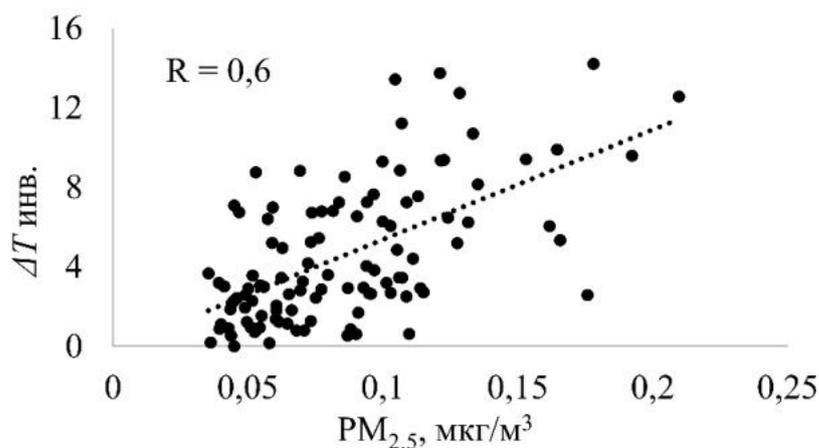


Рисунок 34 – Сравнение значений интенсивности инверсий (ΔT) и среднесуточных концентраций $PM_{2.5}$.

В результате анализа отдельных зимних периодов для выбранных трех лет установлена тенденция к снижению доли дней с повышенным загрязнением относительно количества дней с температурными инверсиями (Рис. 35). В зимний период 2019 г. количество дней с инверсиями температуры составило 65, дней с загрязнением – 41, а для 2021 г. – 64 и 33 дня соответственно. Доля дней с загрязнением атмосферы относительно количества дней с температурными инверсиями за три года уменьшилась на 11%.

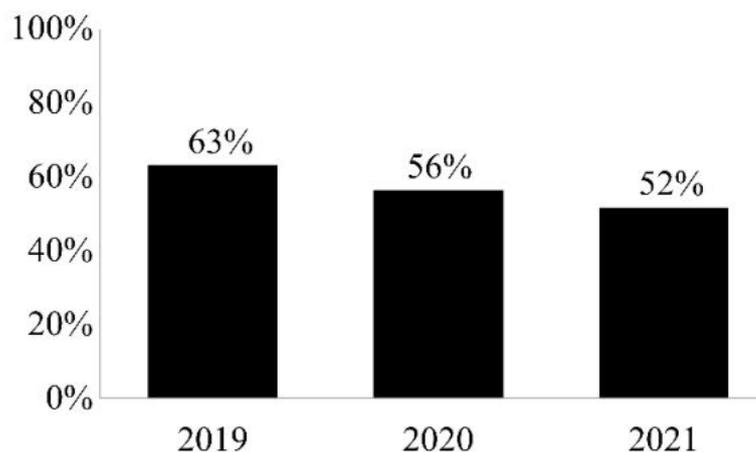


Рисунок 35 – Изменение доли дней с загрязнением, относительно количества дней с инверсиями за 3 года.

Дополнительно по данным модели NCEP GFS рассматривалась взаимосвязь скорости порывов ветра и изменения среднесуточных концентраций PM_{2.5} для всего периода исследования. Корреляция составила 0.67, что указывает на высокую обратную зависимость выбранных параметров.

Полученные выводы говорят о высокой применимости данных реанализа NCEP GFS в задачах экологического мониторинга окружающей природной среды города Красноярска и прилегающих территорий. Они способствует решению задач, связанных с изучением нижнего слоя атмосферы, его загрязнения, может сыграть важную роль в более точном выявлении периодов неблагоприятных метеорологических условий и их прогнозировании.

Основные публикации по разделу:

- 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. [Scopus] DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.007
- Дергунов А.В., Якубайлик О.Э. Влияние метеорологических факторов на экологическое состояние атмосферы в Красноярске // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск, 2022. С. 211-214.

2.7. Анализ концентраций взвешенных частиц над территорией Красноярска и акваторией незамерзающей реки Енисей

В период отопительного сезона наблюдается загрязнение приземного слоя атмосферы г. Красноярска взвешенными частицами с динамическим размером до 2.5 мкм (PM2.5). Это обусловлено выбросами загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения, угольных котельных, ТЭЦ, промышленных предприятий и автотранспорта.

При неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ) высокие концентрации PM2.5 фиксируются во всех районах города. При этом следует обратить внимание на то, что территория г. Красноярска разделена рекой Енисей на две части: приблизительное соотношение площадей левого и правого берега равно 3:2. Ширина реки в черте города (на протяжении около 35 км) варьирует от 570 до 1800 м. Загрязнение атмосферы над такой довольно обширной акваторией незамерзающей р. Енисей не оценивалось с момента строительства Красноярской ГЭС. Актуальность данного исследования определяется тем, что два самых крупных острова (Молокова и Татышева) в настоящее время используются для рекреации населения.

Цель работы состояла в сравнительной оценке величин концентраций PM2.5 в приземной атмосфере над территорией города и над акваторией р. Енисей.

Для исследования воздушной среды над р. Енисей в начале декабря 2020 года силами ИВМ СО РАН на островах Молокова и Татышева было создано два автоматизированных поста непрерывного мониторинга воздуха, обозначенные на рисунке 36 как E1 и E2, соответственно. Они дополнили существующую с конца 2018 года сеть станций мониторинга Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра КНЦ СО РАН. Для сравнительного анализа концентраций PM2.5 использовали данные береговых станций наблюдения, которые ближе всего расположены к островам. На левом берегу были выбраны посты Покровка (L1), Ленина, 41 (L2), Шахтеров, 25 (L3), Партизана, 3г (L4), а на правом берегу – Кировский (R1) и Спутник (R2). На карте города зона расположения постов обозначена красным прямоугольником (Рис. 36).

Среднесибирское УГМС для г. Красноярска прогнозирует начало и окончание НМУ. Одним из необходимых критериев объявления НМУ является предшествующее этому явлению возрастание концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Таким образом, рассматривая временной интервал с момента формирования загрязнения до окончания периода НМУ, можно установить диапазон вариации и динамическую картину изменения концентраций конкретного загрязняющего вещества.



Рисунок 36 – Схема расположения постов мониторинга PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей (E1 и E2), на левом (L1-L4) и правом (R1 и R2) берегах.

Для временных рядов, которые включали в себя периоды январских НМУ 2021 и 2022 годов, были построены зависимости изменения концентраций PM_{2.5} в приземном слое атмосферы над акваторией р. Енисей, а так же левого и правого берега. С этой целью концентрации PM_{2.5}, измеренные в течение 20 минут в 2021 г. и одного часа в 2022 г, усреднялись по результатам мониторинга на постах E1, E2 (р. Енисей), L1-L4 (левый берег) и R1, R2 (правый берег). Динамика концентраций PM_{2.5} представлена на рисунках 35 и 36.

Анализ данных (рис. 35 и 36) показывает, что диапазоны изменения двадцатиминутных и часовых концентраций PM_{2.5} на левом и правом берегу больше, чем над руслом р. Енисей. Кроме того, во всех случаях величина концентрации PM_{2.5} над рекой меньше, чем над территорией обоих берегов или одного из них.

Для рядов концентраций PM_{2.5}, представленных на рисунках 37 и 38, были рассчитаны коэффициенты корреляций (табл. 4). Видно, что величина корреляции между концентрациями взвешенных частиц над Енисеем и над территориями левого и правого берега характеризуется значениями 0,84-0,86 и 0,77-0,90, соответственно. Это может свидетельствовать о практически одинаковом влиянии на воздушную среду над р. Енисей источников выбросов PM_{2.5}, которые расположены по обе стороны реки. На основании этого для дальнейшего анализа среднюю концентрация PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией города рассчитывали по данным шести постов L1-L4 (левый берег) и R1, R2 (правый берег).

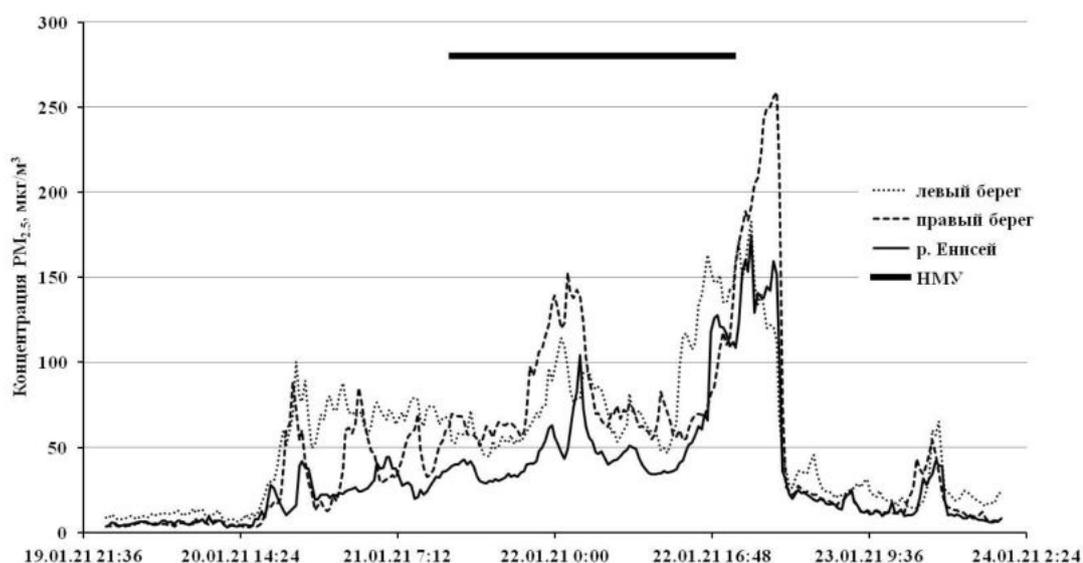


Рисунок 37 – Изменение усредненных двадцатиминутных концентраций PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегу в период 19-24 января 2021 г.

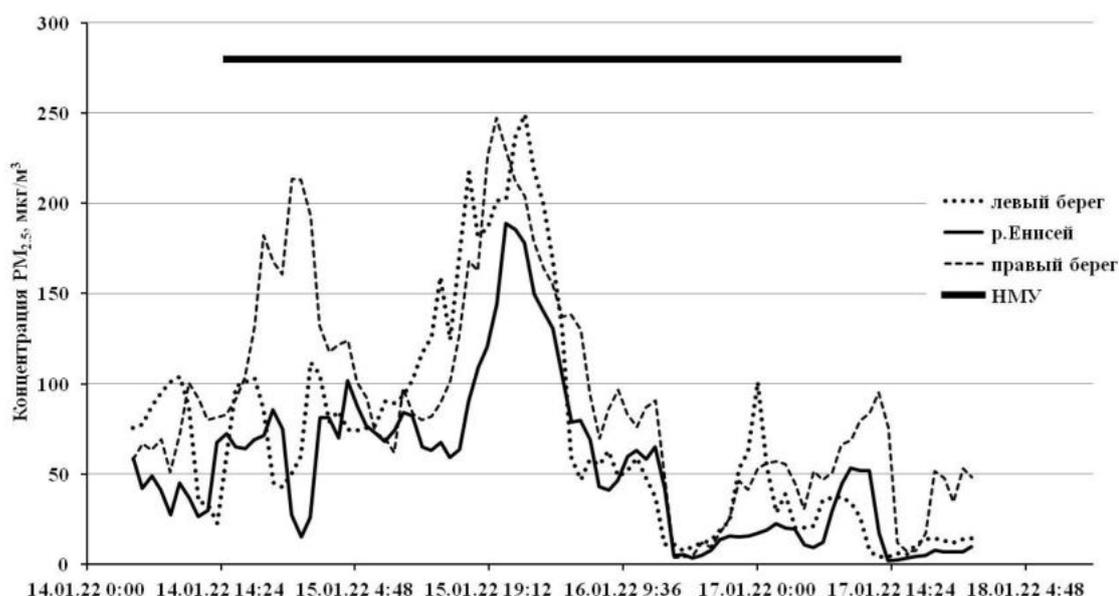


Рисунок 38 – Изменение усредненных часовых концентрация PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегу в период 14-18 января 2022 г.

Таблица 4. Корреляция концентраций PM_{2.5} в приземной атмосфере над акваторией р. Енисей, левого и правого берега для временных рядов, которые включали в себя периоды январских НМУ 2021 и 2022 гг. Коэффициенты за 2022 г представлены в скобках.

	левый берег	правый берег	р. Енисей
левый берег	1,00 (1,00)		
правый берег	0,79 (0,73)	1,00 (1,00)	
р. Енисей	0,86 (0,84)	0,90 (0,77)	1,00 (1,00)

Оценки величин среднечасовых концентраций PM_{2.5} над Енисеем и прилегающих к нему с обеих сторон территорий г. Красноярск были выполнены следующим образом. Двадцатиминутные концентрации PM_{2.5}, которые получены в определенный (задачей исследования) период со всех станций мониторинга, разбивались на две группы, условно названные «р. Енисей» и «город». Для каждой группы рассчитывали средние концентрации PM_{2.5} и доверительные погрешности (P=0,95). Аналогично рассчитывали среднесуточные и среднемесячные концентрации PM_{2.5}, используя для этого, соответственно, часовые и суточные измерения.

Средние двухчасовые концентрации PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей и над территорией города в период 21-23 января 2021 г. показаны на рисунке 39. Видно, что загрязнение атмосферы над руслом реки меньше, чем над городом, и для подавляющего числа измерений эти различия статистически достоверно различаются.

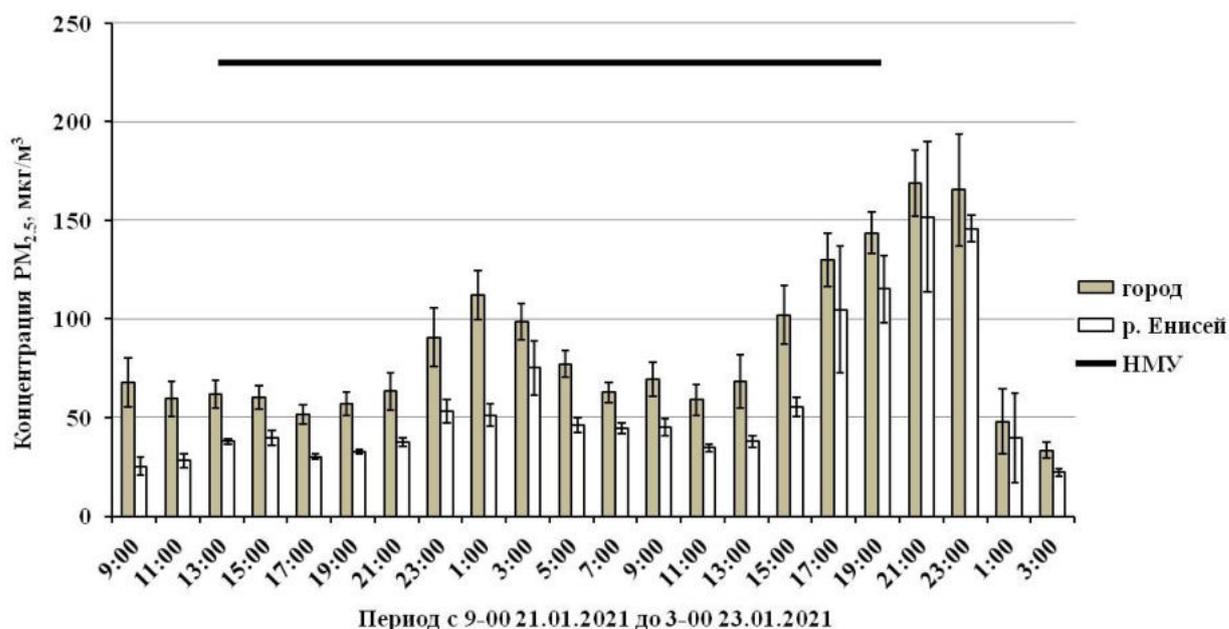


Рисунок 39 – Изменение двухчасовых концентрация PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей и над территорией города в период 21-23 января 2021 г.

Согласно официальным сообщениям Среднесибирского УГМС в январе 2021 года на территории г. Красноярск пять раз формировались метеорологические условия, неблагоприятные для рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе. Для этого зимнего месяца были рассчитаны среднесуточные концентраций PM_{2.5} в приземной атмосфере города и русла реки (Рис. 40). Во все дни НМУ, кроме 9 января, загрязнение атмосферы над рекой было достоверно ниже, чем над городом. Впрочем, такая же закономерность наблюдалась в дни отсутствия НМУ, за исключением 14 и 24 января. Следует заметить, что в

январе величины среднесуточных концентраций PM_{2.5} в воздухе над р. Енисей всегда были ниже, чем над городом.

Кроме того, оценка загрязнения атмосферы в период 21-23 января 2021 г. по среднесуточным концентрациям PM_{2.5} однозначно свидетельствует о достоверном различии этих величин над р. Енисей и над городом (Рис. 40). При использовании двухчасовых концентраций PM_{2.5} (Рис. 39) это различие не так однозначно. Следовательно, среднесуточное усреднение сглаживает двухчасовые флуктуации концентраций PM_{2.5}.

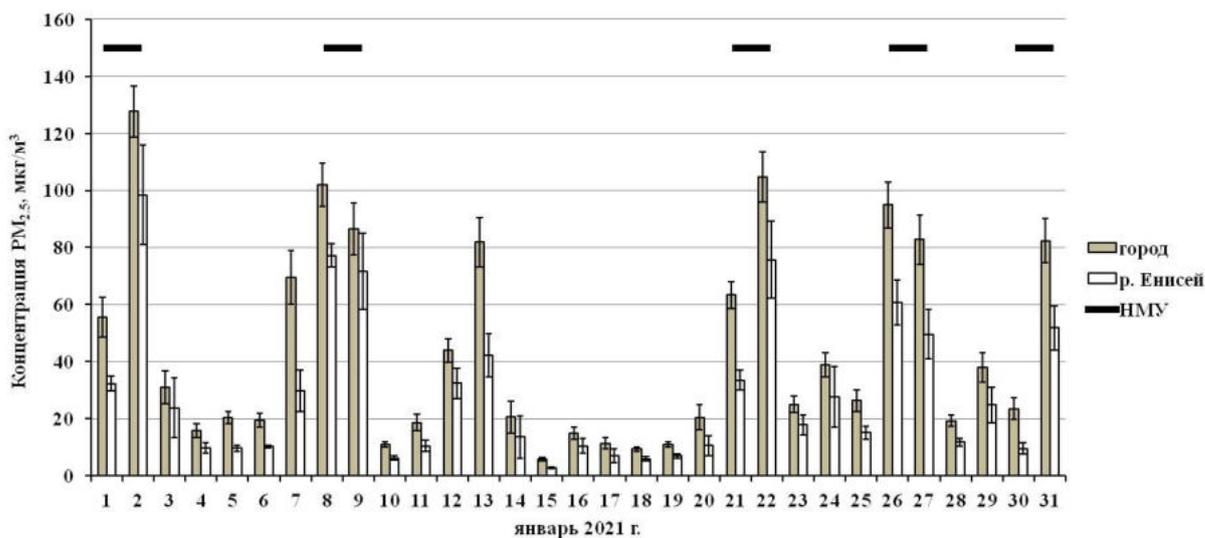


Рисунок 40 – Среднесуточные концентрации PM_{2.5} в приземной атмосфере над рекой Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска в январе 2021 г. Черные горизонтальные линии обозначают периоды НМУ.

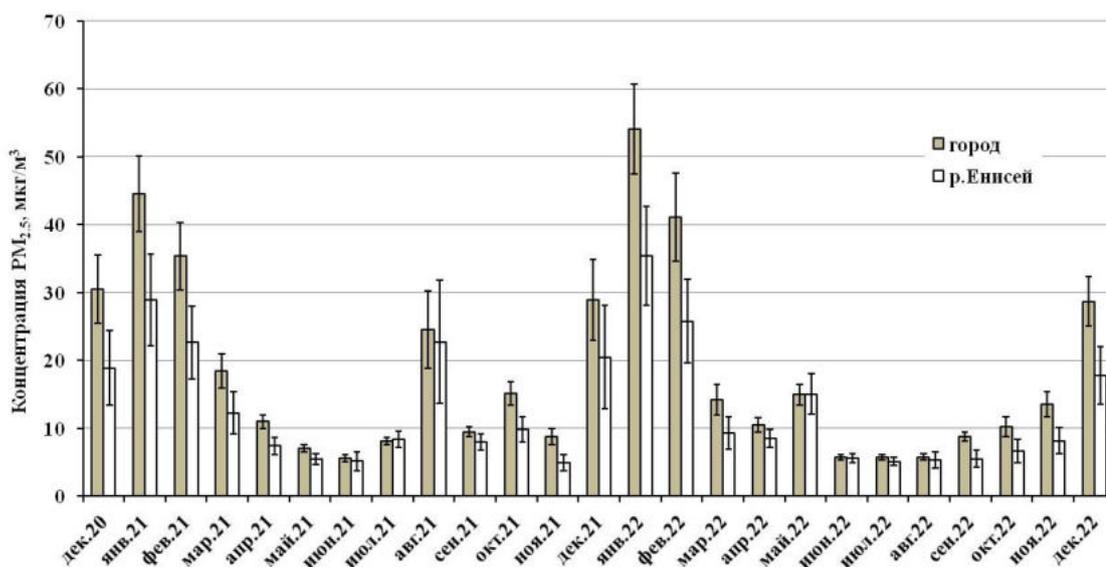


Рисунок 41 – Среднемесячные концентрации PM_{2.5} в приземной атмосфере над акваторией незамерзающей реки Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска.

Двухлетняя динамика среднемесячных концентраций PM_{2.5} показана на рисунке 41.

Анализ представленных (Рис. 41) данных показывает, что концентрации PM_{2.5} над Енисеем и над прилегающей к реке территории города синхронно изменяются (коэффициент корреляции равен 0,98). Однако над руслом реки величины среднемесячных концентраций взвешенных частиц меньше, чем концентрации PM_{2.5} над сушей. Исключение наблюдалось в июле 2021 года. Статистически значимое различия концентраций PM_{2.5} зафиксированы в сентябре, ноябре, октябре, декабре, январе, феврале, марте, апреле.

Самые высокие концентрации PM_{2.5} в приземной атмосфере наблюдаются в январе: над городом – $44,5 \pm 5,5$ мкг/м³ в 2021 г. и $54,1 \pm 6,6$ мкг/м³ в 2022 г.; над рекой Енисей – $28,9 \pm 6,8$ мкг/м³ в 2021 г. и $35,4 \pm 7,3$ мкг/м³ в 2022 г. В летний период, за исключением августа 2021 г. среднемесячные концентрации PM_{2.5} в городской атмосфере изменялись в диапазоне $5,6 \pm 0,5 \div 8,1 \pm 0,6$ мкг/м³, а над рекой – $5,1 \pm 1,4 \div 8,4 \pm 1,4$ мкг/м³.

Высокие концентрации взвешенных частиц в приземном слое атмосферы г. Красноярска и р. Енисей в августе 2021 года обусловлены дымом лесных пожаров. Задымление городской воздушной среды наблюдалось с 7 по 13 августа (Рис. 42).

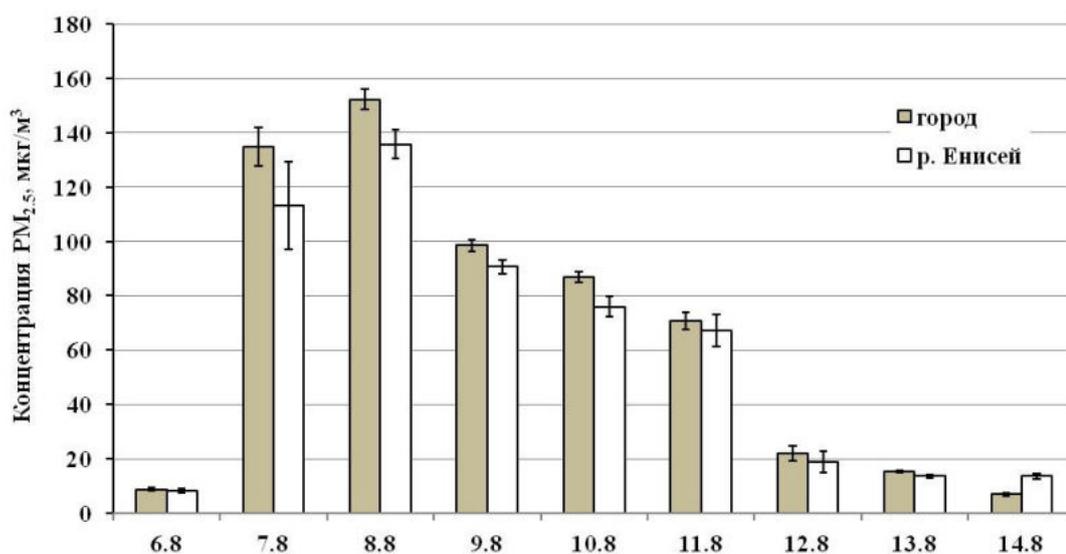


Рисунок 42 – Среднесуточные концентрации PM_{2.5} в приземной атмосфере над рекой Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска.

Таким образом, проведена сравнительная оценка величин концентраций PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией города и над акваторией р. Енисей. Для временных периодов от нескольких суток до двух лет показано, что за редким исключением загрязнение над рекой ниже, чем над территорией города. Эта закономерность сохраняется в периоды НМУ и во время загрязнения городской атмосферы дымом лесных пожаров.

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

3.1. Проектирование системы поддержки принятия решений по защите территорий при чрезвычайных ситуациях природного характера

Разработана модель управления территориальными рисками, увязывающая данные комплексного мониторинга с конкретными стратегическими решениями по обеспечению приемлемого уровня безопасности и учитывающая географические и социально-экономические особенности территорий. Проведена тестовая апробация модели оценки состояния безопасности и мер по её повышению для муниципальных образований Красноярского края.

Предлагаемая модель оценки и управления рисками территорий является результатом синтеза двух методов: графического представления факторов рисков в виде диаграмм качества К. Исикавы и оценки аварийных рисков «галстук-бабочка». С использованием диаграмм выявлены ключевые взаимосвязи различных факторов, формирующих опасную гидрологическую обстановку, описаны их атрибутивные характеристики. Исследованы процессы развития опасных событий от причин до последствий при помощи схемы с указанием конкретных мер управления причинами событий и их последствиями (Рисунки 43 и 44).



Рисунок 43 – Концептуальная схема управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с затоплением территорий.

На основе схем сформирована информационная база и определен состав информационных ресурсов системы поддержки принятия решений по защите территорий при паводковых чрезвычайных ситуациях. Сформулированы требования к структурной, информационной и вычислительной полноте модели.

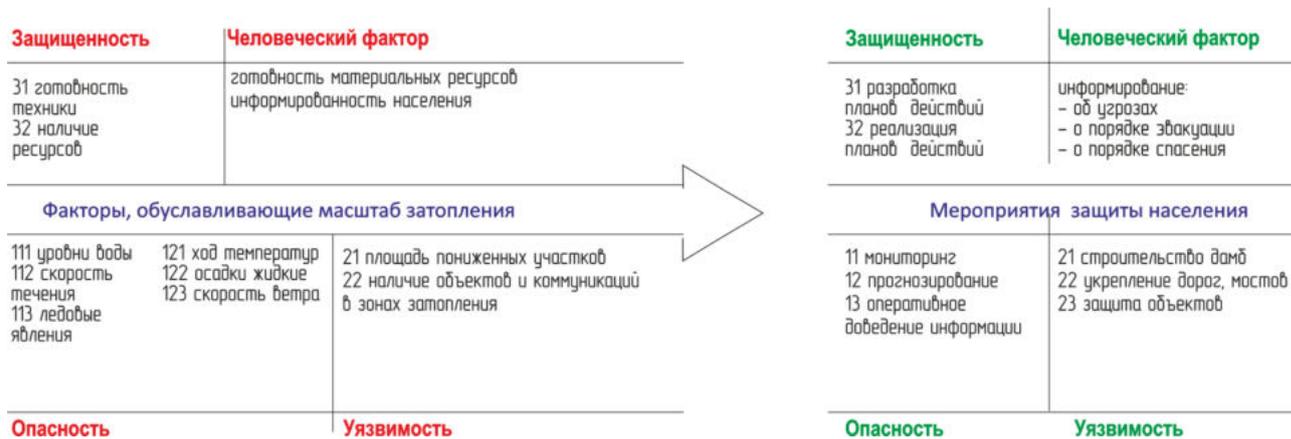


Рисунок 44 – Концептуальная схема управления риском эскалации факторов затопления территорий.

Структурная полнота обеспечивается содержанием диаграмм. Факторы опасности детализированы до атомарных показателей, исследованы возможности их мониторинга. На основе нормативных, методических документов и описаний конкретных ситуаций сформирован перечень управляющих воздействий. Для определения информационной полноты выполнен анализ объема и качества используемых информационных ресурсов. Обеспечена статистически достоверная темпоральная глубина описаний опасных ситуаций и процессов, а также проведенных мероприятий. Усовершенствован метод интегрального аналитического оценивания территориальных рисков и эффективности превентивных мероприятий. Это позволило обеспечить вычислительную полноту модели.

Модель позволяет итерационно увеличивать число объективных показателей, используемых в принятии стратегических решений по защите территорий, уменьшая при этом вклад экспертных рассуждений. Формируемые информационные ресурсы в сочетании с универсальными методами доступа к распределённым данным могут использоваться и для других задач управления: при оперативном реагировании, подборе территорий и ситуаций-аналогов при разработке планов ликвидации ЧС разных уровней.

Система поддержки принятия решений по управлению рисками затопления территорий является развитием информационно-аналитических систем поддержки оперативного управления, эксплуатирующихся в подразделениях МЧС России Красноярского края.

Принципы модельно-ориентированного подхода (MDD) использованы для детализации архитектуры системы визуальными схемами структур данных и бизнес-процессов. Это позволило использовать распределённую разработку программных моделей, автоматическую обработки исключений, минимизировать рутинные операции, возникающих в процессе разработки.

Общий вид информационных ресурсов СППР в сфере территориальной безопасности представлен в виде онтологии (Рис. 45). Ключевой является информация о мероприятиях, а остальные сущности отражают условия их проведения, что определяет специфику «цифрового отображения» объектов, процессов и событий. Разработаны структуры объектов и событий, ориентированные на последующее извлечение знаний. Для всех сущностей, представленных на схеме, обосновано применение разных технологий сбора/ доступа к данным, регламенты обновления, с учётом требований к качеству формируемых решений.

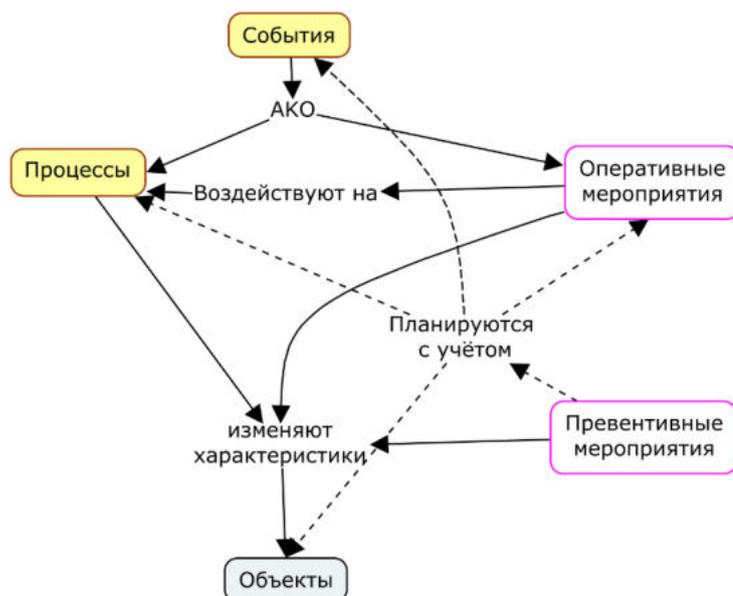


Рисунок 45 – Верхний уровень онтологии информационных ресурсов сферы обеспечения природно-техногенной безопасности (АКО – As Kind Of – состоит из)

Информационная поддержка мероприятий по подготовке к весеннему паводковому сезону, защите населения и территорий при прохождении пика половодья есть экземпляр класса, представленного онтологией.

Разработаны принципы межсистемного информационного обмена с гарантированным доступом к распределённым данным. Это позволяет автоматически консолидировать данные о объектах, процессах и событиях, необходимых для синтеза управленческих решений. Апробировано применение гибких сервисов распределённого сбора данных, технологий No Code для управления сбором данных и представлением результатов.

Формирование решений реализовано с использованием технологии ситуационного моделирования. Перечень населённых пунктов, для которых разработаны сценарии затопления, разработан на основе пятидесятилетнего каталога событий Енисейского бассейнового водного управления и реестра гидротехнических сооружений Министерства экологии и природопользования Красноярского края.

Технология заключается в моделировании последствий тяжёлых сценариев (наводнения 1% обеспеченности для водного бассейна в целом с максимальной продолжительностью и возможными неблагоприятными условиями) для оценивания необходимых ресурсов, планирования мероприятий, организации взаимодействия формирований разного профиля и подчинённости. Например, организация эвакуационных мероприятий и последующего обеспечения пострадавших является сложной задачей управления, решаемой в масштабах региона сравнительно редко. На случай более частых событий (например, 10 % обеспеченности) предусмотрено автоматическое редуцирование сценариев, спроектированных как с учётом экспертных знаний, так и по данным натурных наблюдений.

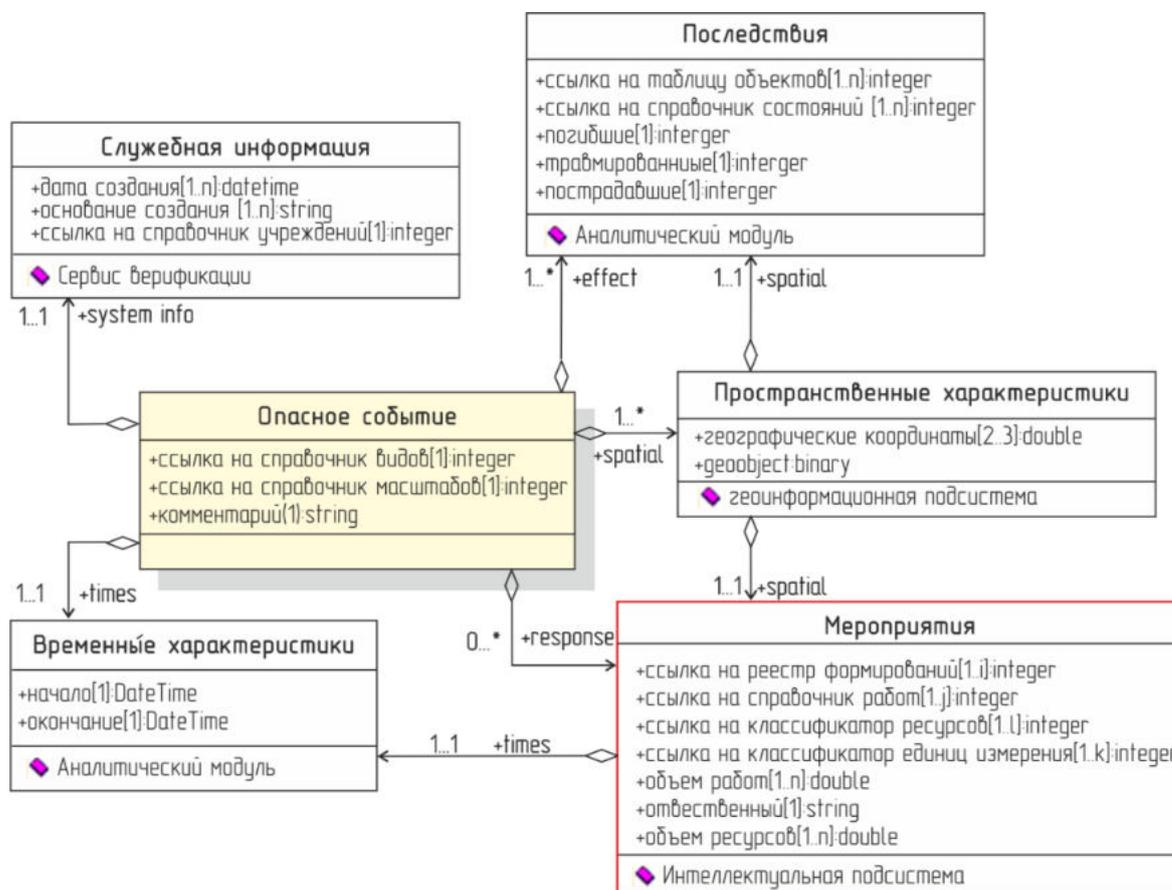


Рисунок 46 – Представление события для извлечения информации для принятия решений.

Для формирования баз знаний разработана модифицированная форма записи событий (Рис. 46). Такая структура позволяет проводить пространственный анализ, верификацию сил и средств, визуализировать сценарии в виде графического представлений. Разработан метод анализа произошедших событий, выполнения мероприятий, оценки качества принятых решений и эффективности действий участниками ликвидации ЧС с целью последующей формализации опыта управления действиями в опасных ситуациях.

Основные публикации по разделу:

- Moskvichev V.V., Nicheporchuk V.V., Postnikova U.S., Taseiko O.V. Architecture of the intelligent assessment system for territorial risks // Computational Technologies, 2022, 27(6), С. 115–123. [Scopus] DOI:10.25743/ICT.2022.27.6.010.
- Kalach A.V., Nicheporchuk V.V., Arifullin E.Z., Akulov A.Yu., Kulikova T.N. Systematization of the parameters of monitoring for situational modeling of response to emergency situations // Journal of Physics: Conference Series, 2022, 1902, 12072. [Scopus] DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012072.
- Пенькова Т.Г., Ничепорчук В.В. Мета модель детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий // Информатизация и связь, 2022, 5, С. 14-20. [Список ВАК] DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-5-14-20.

3.2. Разработка и тестирование «быстрых» алгоритмов пространственного преппроцессинга для моделирования мультиагентных потоков

Предметом исследований в настоящей работе является моделирование пешеходного движения, которое рассматривается в контексте решения задач пожарной безопасности, организации массовых мероприятий на открытом воздухе, проектировании/изучении объектов массового пребывания, включая задачи оценки вероятности распространения вирусных инфекций. Организация масштабных мероприятий требует усиленных мер и новых концепций безопасности, адаптированных к большому количеству людей. Спортивная арена и прилегающая территория должны быть устроены так, чтобы обеспечивать комфортное пребывание зрителей, не допускать возможности образования плотных скоплений людей, а в чрезвычайной ситуации обеспечивать безопасную эвакуацию с объекта.

Характерной особенностью мультиагентных потоков является наличие отдельных индивидов (агентов), совершающих свои действия (как правило – перемещение) в ограниченном фазовом пространстве. Действия каждого индивида обусловлены состоянием окружающей среды других индивидов, препятствий (условных или фактических). Примером такого процесса является движение людей.

При математическом моделировании движения людей моделями индивидуально-поточного типа на каждом расчетном шаге для каждого индивида (человека) определяется новая координата его положения на плоскости. Моделируется перемещение человека из начального положения до цели, при этом может быть задана последовательность целей. Когда достигнута последняя цель, человек изымается из расчета.

На каждом расчетном шаге определяется положение каждого человека на основе дискретизированного выражения для скорости как производной пути по времени. Сдвиг определяется как произведение оценки мгновенной скорости (скаляр) и определенного направления движения (вектор) на этом расчетном шаге. Для определения направления движения разработана специальная процедура, одним из параметров которой является расстояние до выхода, для определения которого используется соответствующее поле расстояний.

Перемещение человека моделируется в плоскости, поэтому при решении практических задач сначала происходит распределение всех поверхностей, входящих в область моделирования и расположенных на разных уровнях по вертикали, на непересекающиеся в горизонтальной проекции условные этажи-плоскости. Целью/подцелью движения является заданная область или граница двух смежных областей или часть границы расчетной области, имеющая специальные условия, так называемой, мягкой стенки (в практических задачах это, как правило, выход из здания). В зависимости от набора целей, на этапе подготовки данных для последующего использования при определении положения каждого индивида на новом расчетном шаге формируются, так называемые, поля расстояний. Поле расстояний определяется для каждого уникального маршрута найденного в процессе анализа исходных данных, пример такого поля приведен на рисунке 47.

Поле расстояний для конкретного маршрута хранит информацию о расстоянии в каждой точке до ближайшей цели из заранее составленного списка целей для данного маршрута. Список целей определяется целью моделирования и набором заданных исходных данных. В зависимости от количества целей в рассчитываемом сценарии, сложности конфигурации расчетной области, которая определяется планировкой этажей здания и прилегающей территории, количество полей может насчитывать десятки для одного этажа.

В текущей постановке задачи поля расстояний являются статическими. Это накладывает ряд ограничений, выраженных в том, что все множество возможных маршрутов определяется до начала моделирования, и новые маршруты не могут возникнуть в процессе моделирования. Поля расстояний считаются в узлах сетки, наложенной на расчетную область (Рис. 48).

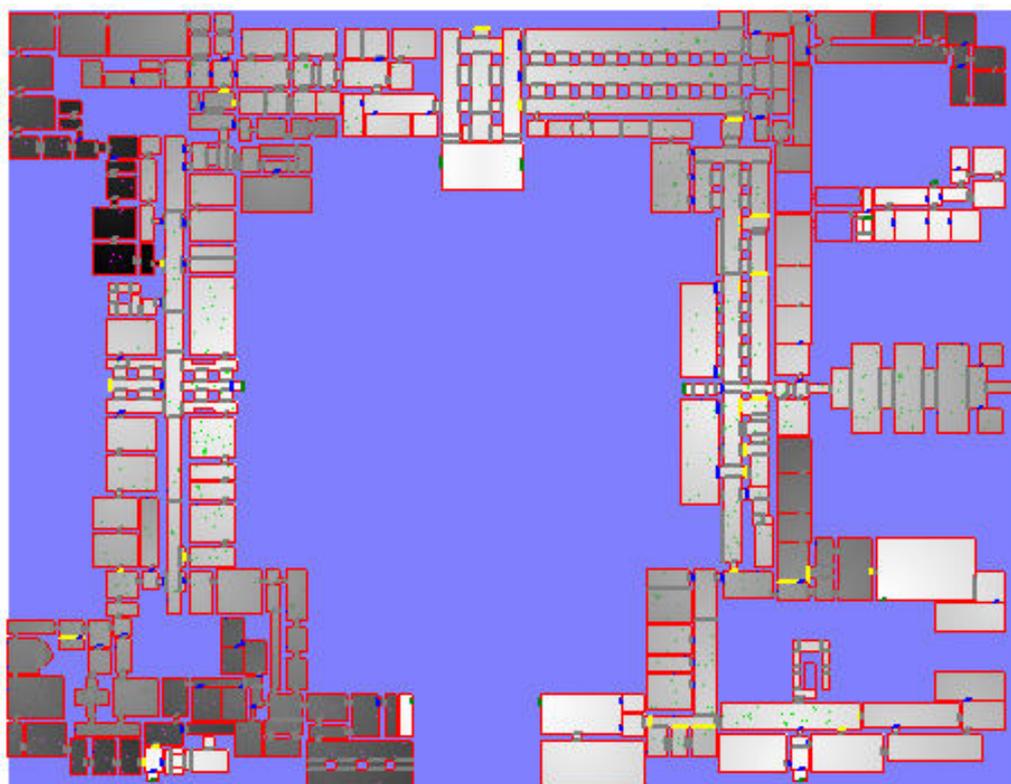


Рисунок 47 – Поле расстояний для 1-го этажа Зимнего дворца Государственного Эрмитажа (одно из 20).

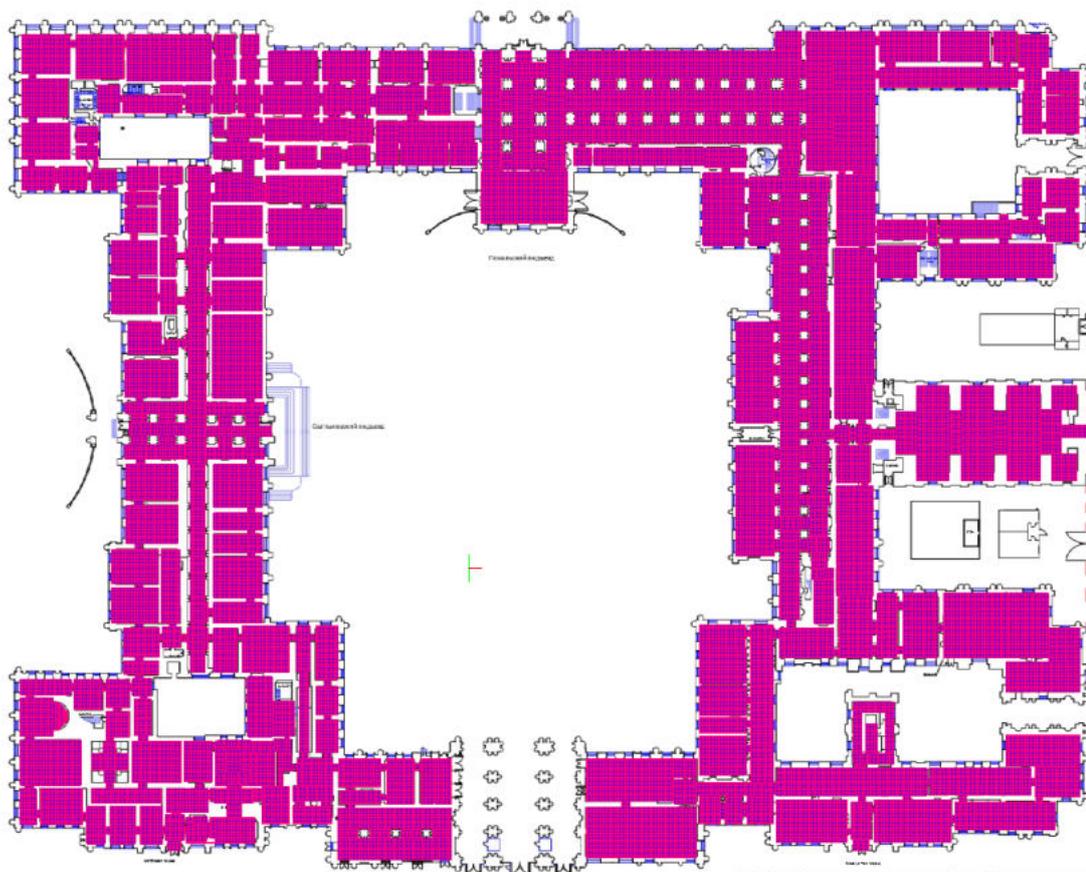


Рисунок 48 – Сетка для расчета поля расстояний для 1-го этажа Зимнего дворца Государственного Эрмитажа (1 860 000 узлов, линейный размеры области $180 \times 230 \text{ м}^2$).

Вычислительная сложность задачи моделирования пешеходного движения для реальных объектов в основном обусловлена двумя обстоятельствами. Первое – это большое количество индивидов (до нескольких десятков тысяч на этаж), каждый из которых на каждом временном шаге расчета, согласно модели, взаимодействует как с ближайшими к нему людьми, так и с окружающими его элементами геометрии здания: стенами, проемами, лестницами, мебелью, выходами, вместе, зачастую, образуя достаточно сложную комбинацию проходов и препятствий. Второе – это большой объем данных, порождаемый при расчете полей расстояний, которых на каждый этаж может достигать до сотни в случае крупных стадионов; при этом общий объем этих полей в многоэтажном здании может превышать лимит памяти в 4Gb. Таким образом, параллельная реализация расчета (особенно если иметь в виду в качестве цели расчет в режиме реального времени) является естественным и необходимым выбором, позволяющим в полной мере использовать ресурсы современных компьютеров и операционных систем.

3.3. Методы распараллеливания при моделировании пешеходного движения людей

Крупноблочное распараллеливание

Моделирование пешеходного движения людей в многоэтажном здании естественным образом разбивается на движение большого количества людей по этажу и сравнительно небольшого (в силу малой пропускной способности) количества людей по межэтажным лестницам. Таким образом, разнесение расчета по этажам на разные процессы с передачей между ними людей, перемещающихся с этажа на этаж, как решает проблему возможной нехватки памяти за счет распределения полей расстояний между несколькими процессами, так и позволяет более полно загрузить ядра процессора и тем самым ускорить счет. Фактически это функциональная декомпозиция по числу этажей. Для реализации здесь оптимально подходит парадигма MPI: она позволяет легко оперировать богатым набором функций обмена сообщениями, и, при должной настройке окружения, запускать расчет движения людей на различных этажах не только в разных процессах, но и на разных компьютерах. В нашем случае была использована свободно распространяемая реализация MPICH2 [MPICH | High-Performance Portable MPI. URL: <http://www.mpich.org/>] для платформы Windows.

Схема MPI-запуска модуля расчета представлена на рисунке 49. В процессе расчета процессы используют коллективные взаимодействия и коммуникации «точка-точка» для обмена между собой людьми и различными данными. Передача людей производится один раз на каждом временном шаге. В конце результаты расчета («треки» движения людей, статистические данные) собираются на нулевом процессе, объединяются и сохраняются на диск для последующего использования.

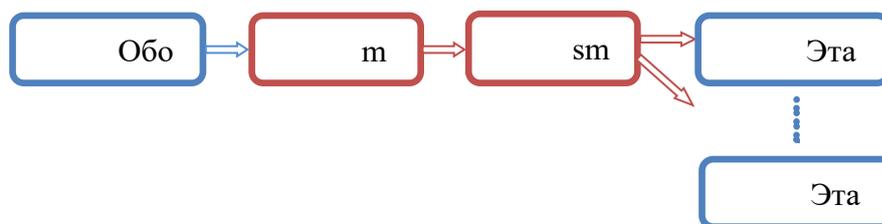


Рисунок 49 – Схема крупноблочного распараллеливания.

Важное достоинство этой реализации состоит в том, что при запуске всех процессов на том же компьютере, что и оболочка, все процессы могут показывать свои окна, и, таким образом, появляется возможность визуального контроля хода расчета. При запуске на другом компьютере/компьютерах MPICH2-процессы в норме запускаются без своего окна, скрыто; но есть возможность настроить там запуск `smrpd.exe` с ключом `-d`, чтобы увидеть окна процессов.

Мелкозернистое распараллеливание

Наряду с функциональной декомпозицией реализуемая математическая модель допускает и распараллеливание при расчете каждого этажа. Каждый расчетный шаг (цикл) содержит вычислительные процедуры, которые могут выполняться одновременно различными нитями для различных групп людей, так как они не содержат условий для взаимной блокировки на запись по данным; так же имеются действия, распараллеливание которых неэффективно из-за наличия большого количества взаимных блокировок.

Для работы с нитями использовался класс `Delphi TThread`, упрощающий порождение, запуск/остановку и уничтожение нитей. Нити порождаются однократно в должном количестве, определяемом в зависимости от числа ядер, доступных приложению, и количества процессов, работающих над расчетной областью (зданием). Кроме того, при уменьшении количества людей в здании количество активных нитей уменьшается так, чтобы каждая обрабатывала не менее 30 человек (пока не останется только одна), с тем чтобы повысить эффективность параллелизма.

Такой алгоритм распараллеливания диктует необходимость синхронного исполнения всех нитей, то есть после выполнения распараллеливаемых шагов исполняющие нити должны синхронизироваться на барьере друг с другом и с основной нитью. Реализация барьера была взята из свободно распространяемой библиотеки `pthread-win32`. На рисунке 50 приведена блок-схема реализации описанного распараллеливания. Для простоты приведена только одна исполняющая нить и исключены действия программы, не относящиеся к параллелизму.

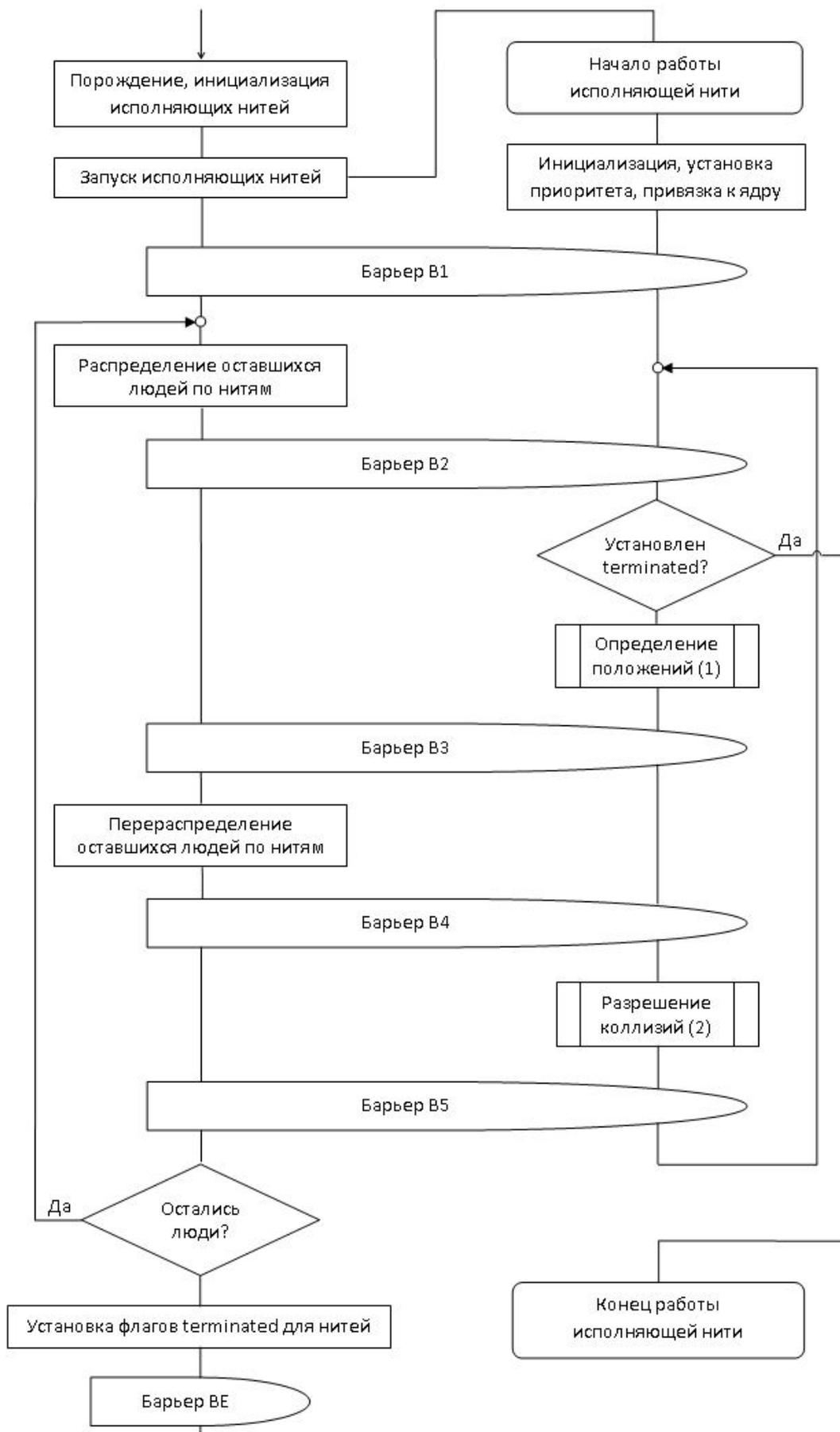


Рисунок 50 – Мелкозернистое распараллеливание. Блок-схема много-нитевого исполнения основного цикла программы.

Сочетание описанных выше подходов позволяет полностью использовать ресурсы компьютера с многоядерным процессором (процессорами). Так, при расчете эвакуации из многоэтажных зданий в основном работает крупноблочное распараллеливание, а количество нитей ограничено одной-двумя на процесс из-за нехватки ядер; при расчете одного этажа, напротив, количество нитей будет соответствовать количеству процессорных ядер.

Перед началом моделирования процессами полностью независимо друг от друга производится построение полей расстояний. Параллельная эффективность при выполнении этой существенной вычислительно-емкой операции практически равна единице (если количество физических ядер там, где производится расчет, не меньше количества этажей).

Эффективность много-нитевого подхода проверялась путем прямых замеров. Для экспериментов выбрана задача моделирования эвакуации из Зимнего дворца Государственного Эрмитажа. Рассматривался 2-й этаж здания с 8 выходами, перед началом эвакуации на этаже находится 2000 человек.

Проведено два эксперимента: на компьютере с 4-ядерным процессором Intel Core i5-760 под управлением ОС Windows 7 Pro x64, на сервере с 4-мя 4-ядерными процессорами Quad-Core AMD Opteron-8378 под управлением ОС Windows Server 2008 R2; рисунок 51 отображает его результаты. В диапазоне от единицы до количества ядер наблюдалась неплохая динамика эффективности, с ожидаемой деградацией, доходящей до 80% в первом случае и до 60% во втором. Ускорение достигает соответственно трех и десяти. После того, как количество нитей становится больше количества ядер, происходит провал, эффективность подобного расчета мала, поэтому в использовании количества нитей, большего, чем количество доступных ядер, нет практического смысла.

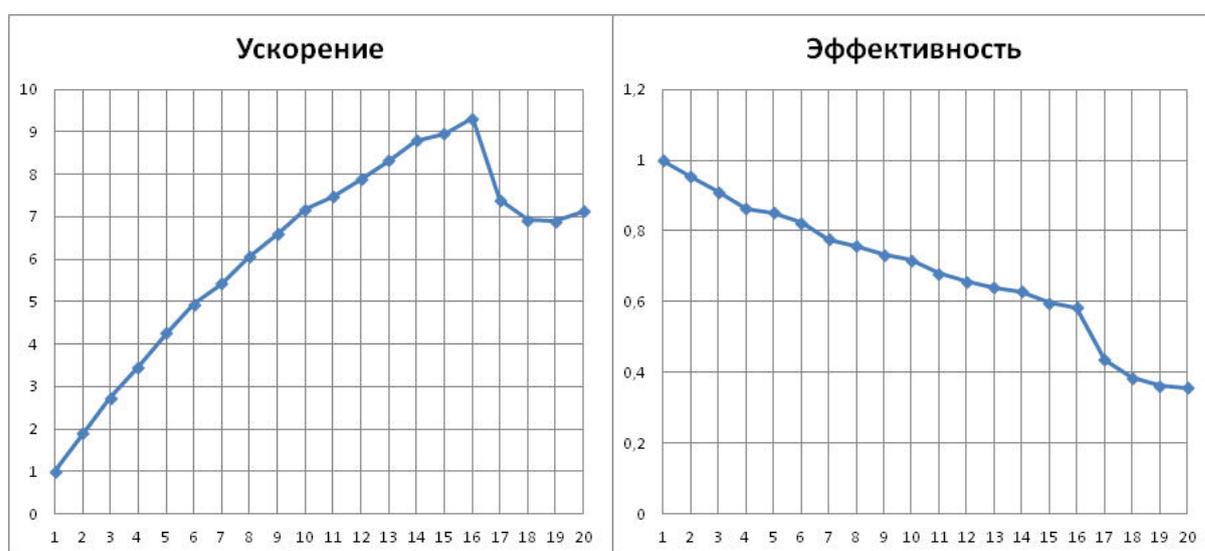


Рисунок 51 – Мелкозернистое распараллеливание. Ускорение и эффективность на 16 ядрах.

Основные публикации по разделу:

- Gravit M., Kirik E., Savchenko E., Vitova T., Shabunina D. Simulation of Evacuation from Stadiums and Entertainment Arenas of Different Epochs on the Example of the Roman Colosseum and the Gazprom Arena // *Fire*, 2022, 5(1), 20. [Q2 Web of Science]
DOI: 10.3390/fire5010020.
- Kirik E., Bogdanov A., Sushkova O., Gravit M., Shabunina D., Vitova, T., Lazarev Y. Fire Safety in Museums: Simulation of Fire Scenarios for Development of Control Evacuation Schemes from the Winter Palace of the Hermitage // *Buildings*, 2022, 12(10), 1546.
[Q2 Web of Science] DOI: 10.3390/buildings12101546.
- Kirik E., Vitova T. Time discretization in the time-continuous pedestrian dynamics model SigmaEva // *Natural Computing*, 2022, 21(3), pp. 407-415. [Q3 Web of Science]
DOI: 10.1007/s11047-022-09894-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Проведены исследования и разработки методического и программного-технологического обеспечения для задач моделирования и оценки состояния природных и антропогенных экосистем. Используемый подход основан на методах геопространственного моделирования и анализа, данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационных системах и веб-сервисах, технологиях построения инфраструктуры геопространственных данных. Сформированы интегрированные базы геопространственных данных на исследуемые территории, содержащие природно-климатические, географические и антропогенные характеристики территорий, данные о различных биотопах и природных объектах.

На основе бассейнового подхода реализована многоуровневая структура данных по природно-ресурсным характеристикам юга Красноярского края, основанная на иерархической системе водосборного деления территории. Созданы интегрированные базы данных антропогенных экосистем по данным сельскохозяйственных территорий опытно-производственных хозяйств ФИЦ КНЦ СО РАН. На основе проведенного статистического анализа указанных данных получены оценки характеристик исследуемых экосистем.

Исследованы характеристики термического режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в летний период. Разработана физико-математическая модель, которая учитывает основные физические процессы, влияющие на изменение температуры воды, обмен энергией между водой и окружающей средой. Результаты моделирования соответствуют измерениям на гидропостах, данным спутникового мониторинга.

Проведены исследования основных характеристик и особенностей формирования туманов над Енисеем в нижнем бьефе Красноярской ГЭС. Получены статистические данные о метеоусловиях, которые способствуют возникновению туманов охлаждения в летнее время года и туманов парения зимой.

Исследованы пространственные распределения загрязнения атмосферного воздуха на основе данных спектрорадиометра MODIS и климатической модели NCEP GFS. Данные спутникового мониторинга позволяют оценивать степень уровень загрязнения воздуха за пределами города, в котором работают наземные станции мониторинга воздуха.

Проведены мониторинговые исследования биологических ресурсов в водоемах и водотоках на территории Красноярского края. В отчетный период основное внимание было уделено исследованию сообществ зообентоса района Богучанского водохранилища с последующей оценкой качества вод методами биоиндикации.

Продолжены работы по созданию и модернизации Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН. Разработаны новые программные интерфейсы и сервисы системы, проведено обновление серверного оборудования. Значительно расширен перечень подключенных в системы устройств сбора данных – температурные профилемеры МТР-5, датчики температуры воды, сеть видеокамер для регистрации туманов, и проч.

В рамках развития региональной информационно-вычислительной инфраструктуры для задач мониторинга и оценки состояния природных и антропогенных экосистем сформирована геопространственная база данных по температуре и осадкам на основе спутниковой информации и климатических моделей. Принимаемые данные используются в системах оперативного мониторинга состояния атмосферы и динамики изменения растительности на сельскохозяйственных угодьях.

Разработано аппаратное и программно-технологическое обеспечение для задач экологического мониторинга с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В составе навесного оборудования БПЛА – набор датчиков, информация с которых записывается в процессе работы на microSD-карту. Создано веб-приложение, обеспечивающее возможность оперативного анализа регистрируемой информации.

Исследованы данные по температурным инверсиям в г. Красноярске, формируемые климатической моделью NCEP GFS. Получена высокая степень корреляции с высоким уровнем загрязнения атмосферы в городе – за период с 2019 по 2021 гг. в 81% случаев превышение среднесуточного ПДК концентрациями PM_{2.5} сопровождалось температурными инверсиями.

Проведена сравнительная оценка величин концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией города и над акваторией р. Енисей. Для временных периодов от нескольких суток до двух лет показано, что за редким исключением загрязнение над рекой ниже, чем над территорией города. Эта закономерность сохраняется в периоды НМУ и во время загрязнения городской атмосферы дымом лесных пожаров.

Разработана модель управления территориальными рисками, увязывающая данные комплексного мониторинга с конкретными стратегическими решениями по обеспечению приемлемого уровня безопасности и учитывающая географические и социально-экономические особенности территорий. Проведена тестовая апробация модели оценки состояния безопасности и мер по её повышению для муниципальных образований Красноярского края.

Продолжены исследования в области моделирования пешеходного движения. Впервые для Зимнего дворца Государственного Эрмитажа создана цифровая модель здания, выполнено моделирование эвакуации при пожаре для различных очагов, выполнен анализ

расчетов, из условий безопасности определено максимальное единовременное число посетителей, безопасные маршруты, разработаны принципы составления схем эвакуации. В настоящее время реализуется апробация результатов работы в практической деятельности Эрмитажа. Значительное внимание в отчетный период было уделено методам распараллеливания вычислений в решении задач эвакуации при пожаре.

Практическая значимость результатов исследований направлена, прежде всего, на эффективную организацию природопользования. В частности, реализуется возможность для информационно-аналитического обеспечения решения актуальных управленческих задач, количественной оценки различных характеристик природных и антропогенных экосистем, экологического мониторинга в Красноярском крае. Информационное обеспечение необходимо для осуществления широкого спектра мероприятий, организации систем поддержки принятия управленческих решений. Реализуемые технологии и программное обеспечение будут содействовать оперативному информированию населения Красноярска и пригородов о качестве атмосферного воздуха и временных трендах его изменения.

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

1. Andrianova A.V., Shan'ko Y.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, V. 53, p. 128-135. [Q4 Web of Science] DOI: 10.1134/S1067413622020035.
2. 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. [Scopus] DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.007
3. Moskvichev V.V., Nicheporchuk V.V., Postnikova U.S., Taseiko O.V. Architecture of the intelligent assessment system for territorial risks // *Computational Technologies*, 2022, 27(6), С. 115–123. [Scopus] DOI:10.25743/ICT.2022.27.6.010.
4. Gravit M., Kirik E., Savchenko E., Vitova T., Shabunina D. Simulation of Evacuation from Stadiums and Entertainment Arenas of Different Epochs on the Example of the Roman Colosseum and the Gazprom Arena // *Fire*, 2022, 5(1), 20. [Q2 Web of Science] DOI: 10.3390/fire5010020.
5. Kirik E., Bogdanov A., Sushkova O., Gravit M., Shabunina D., Vitova, T., Lazarev Y. Fire Safety in Museums: Simulation of Fire Scenarios for Development of Control Evacuation Schemes from the Winter Palace of the Hermitage // *Buildings*, 2022, 12(10), 1546. [Q2 Web of Science] DOI: 10.3390/buildings12101546.
6. Kirik E., Vitova T. Time discretization in the time-continuous pedestrian dynamics model SigmaEva // *Natural Computing*, 2022, 21(3), pp. 407-415. [Q3 Web of Science] DOI: 10.1007/s11047-022-09894-2.
7. Batalova A.Y., Putintseva Y.A., Sadovsky M.G., Krutovsky K.V. Comparative Genomics of Seasonal Senescence in Forest Trees // *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, v. 23, № 7, 3761. [Q1 Web of Science] DOI: 10.3390/ijms23073761.
8. Kirichenko, A.D., Poroshina, A.A., Sherbakov, D.Yu., Sadovsky, M.G., Krutovsky, K.V. Comparative analysis of alignment-free genome clustering and whole genome alignment-based phylogenomic relationship of coronaviruses // *PLoS ONE*, 2022, v. 17, e0264640. [Q1 Web of Science] DOI: 10.1371/journal.pone.0264640.
9. Zinovyev A., Sadovsky M., Calzone L., Fouche A., Groeneveld C.S., Chervov A., Barillot E., Gorban A.N. Modeling Progression of Single Cell Populations Through the Cell Cycle as a Sequence of Switches // *Frontiers in Molecular Biosciences*, 2022, v. 8, 793912. [Q1 Web of Science] DOI: 10.3389/fmolb.2021.793912.

10. Андрианова А.А. Шанько Ю.В. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа // Экология, 2022, № 2, С. 145-152. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.31857/S0367059722020032.
11. Tachkov M.A., Shcherbatyuk P.A., Kirik E.S., Gravit M.V., Kotlyarskaya (Vasileva) I.L. Design solutions for residential multi-storey steel modular building // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. № 3 (101). С. 10102. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.4123/CUBS.101.2.
12. Gravit M.V., Tsepova A.S., Kirik E.S. Renovation of the "Hydro Tower with Laboratories" building at the Polytechnic University adapt for the museum // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. № 3 (101). С. 10104. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.4123/CUBS.101.4.
13. Дунаевская С.С., Чередниченко М.В., Макарская Г.В. Особенности хемилюминесценции нейтрофилов у больных кардиохирургического профиля в послеоперационном периоде // Сибирское медицинское обозрение, 2022, № 2, С. 56-61. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.20333/25000136-2022-2-56-61.
14. Fedotova A.S., Turitsyna E.G., Makarskaya G.V., Tarskikh S.V. Radical Generation by Animal Cells under the Impact of low Doses of Ionizing Radiation “in Vivo” and “in Vitro” // AIP Conference Proceedings, 2022, V. 2467, 070023. [Ядро РИНЦ] DOI: 10.1063/5.0092982.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности

1. Кадочников А.А., Токарев А.В. Данные измерений профилей температуры атмосферы в Красноярске за 1 квартал 2022 года // Свидетельство о регистрации базы данных 2022622253, 15.09.2022. Заявка № 2022621838 от 26.07.2022. Регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 622121200170-4.
2. Кадочников А.А., Токарев А.В., Малимонов М.И., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Визуализация данных температурного профилемера // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022664929, 08.08.2022. Заявка № 2022663951 от 26.07.2022. Регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 622121200164-3.
3. Кадочников А.А. Инструменты обработки и подготовки спутниковых данных для быстрого отображения посредством веб-браузера // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022664789, 04.08.2022. Заявка № 2022663920 от 26.07.2022. Регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 622121200171-1.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях

1. Андрианова А.В. Современные сведения о зообентосе и оценка экологического состояния Богучанского водохранилища // Рыбоводство и рыбное хозяйство, 2022, т. 16, № 7 (198), С. 438-454. [Список ВАК] DOI: 10.33920/sel-09-2207-01.
2. Заворуев В.В., Соколова О.В., Заворуева Е.Н. Тенденция концентрации формальдегида в приземном слое атмосферы Красноярска в период 2000-2021 годов // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 87-6. С. 144-148. DOI: 10.18411/trnio-07-2022-250
3. Заворуев В.В., Соколова О.В., Заворуева Е.Н. Анализ результатов измерения взвешенных частиц автоматическими станциями мониторинга в зависимости от их расположения на различных сторонах административного здания // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 88-4. С. 126-132. DOI: 10.18411/trnio-08-2022-174
4. Матузко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Летний гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск, 2022. С. 265-268.
5. Матузко А.К. Обработка спутниковых наборов данных Landsat 8 C2L2 для определения температуры поверхности // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск, 2022. С. 118-121.
6. Кадочников А.А. Развитие системы сбора данных для задач анализа состояния атмосферного воздуха // Решетневские чтения, 2022, Т. 1, С. 476-478.
7. Федотова А.С., Макарская Г.В., Тарских С.В. Генерация АФК в периферической крови крупного рогатого скота под действием «in vivo» и «in vitro» сверхмалых доз ионизирующего излучения // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета, 2022, т. 14, № 2, с. 125-134. DOI: 10.36508/RSATU.2022.54.2.015.
8. Teterleva A., Abramov V., Morgun A., Larionova I., Sadovsky M. Unsupervised Classification of Some Bacteria with 16S RNA Genes // Lecture Notes in Computer Science, 2022, v. 13346, p. 205-215. [Web of Science] DOI: 10.1007/978-3-031-07704-3_17.
9. Molyavko A., Borovikov I., Karepova E. and Sadovsky M. Efficient Clustering of Genetic Entities // 12th International Conference on Pattern Recognition Systems, ICPRS 2022. [Web of Science] DOI: 10.1109/ICPRS54038.2022.9854064.
10. Tutsenko K., Horoshavina A., Abramov V., Tunik M., Chanchikova N., Karlova E., Pohabov D., Sadovsky M. Efficiency of Positron-Emission Tomography with 18F-DOPA for

- Parkinson's Disease Diagnostics // AIP Conference Proceedings, 2022, v. 2647, 070002. [Web of Science] DOI: 10.1063/5.0117998.
11. Horoshavina A., Tutsenko K., Abramov V., Tunik M., Pohabov D., Sadovsky M. Non-Linear Statistics Technique to Differ the Patients with Parkinson Disease from Essential Tremor Through Kinesthetic and Olfactory Data // AIP Conference Proceedings, 2022, v. 2647, 070003. [Web of Science] DOI: 10.1063/5.0118001.
 12. Nedorez Y., Sadovsky M. Strong Prevalence of the Function over Taxonomy in Human tRNA Genes // Lecture Notes in Computer Science, 2022, v. 13347, p. 169-178. [Web of Science] DOI: 10.1007/978-3-031-07802-6_15.
 13. Senashova M., Sadovsky M. Comparative Analysis of the Spatial Structure Chloroplasts and Cyanobacteria Photosynthetic Systems I and II Genes // Lecture Notes in Computer Science, 2022 v. 13346, p. 197-204. [Web of Science] DOI: 10.1007/978-3-031-07704-3_16.
 14. Малимонов М. И. Веб-интерфейс для отображения и взаимодействия с данными температурного профилера // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXV): тезисы докладов (Красноярск, 14 апреля 2022 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2022. С. 83.
 15. Матушко А. К. Технология обработки спутниковых данных Landsat 8 для восстановления потерянной информации при вычислении температуры поверхности // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXV): тезисы докладов (Красноярск, 14 апреля 2022 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2022. С. 85.
 16. Пенькова Т.Г., Метус А.М., Ничепорчук В.В., Морозов Р.В. Проектирование интернет-платформы для формирования рейтинговых оценок качества жизни муниципальных образований региона // Информатизация и связь, 2022, 1, С. 82-87. [Список ВАК] DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-1-82-87.
 17. Пенькова Т.Г., Ничепорчук В.В. Мета модель детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий // Информатизация и связь, 2022, 5, С. 14-20. [Список ВАК] DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-5-14-20.
 18. Коробко А.В., Гилёк С.А., Ничепорчук В.В. Региональная цифровизация управления безопасностью территорий: задачи, результаты, перспективы // Сибирский пожарно-спасательный вестник, 2022, 3(26), С. 69-77. [Список ВАК] DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.15.90.004.
 19. Гилёк С.А., Ничепорчук В.В. Связывание наборов данных для решения задач информационной поддержки управления лесопожарными рисками // Проблемы анализа риска, 2022, Т. 19, № 5, С. 28-39. [Список ВАК] DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-5-28-39.

20. Kalach A.V., Nicheporchuk V.V., Arifullin E.Z., Akulov A.Yu., Kulikova T.N. Systematization of the parameters of monitoring for situational modeling of response to emergency situations // *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 1902, 12072. [Scopus]
DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012072.
21. Ничепорчук В.В. Региональные аспекты цифровизации управления природно-техногенной безопасностью территорий // *Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции* – Москва: Государственный университет управления, 2022, С. 80-85.
22. Ничепорчук В.В. Интеллектуальная поддержка управления природно-техногенной безопасностью территорий // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы VI Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием* – Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2022. С. 268-275.
23. Тасейко О.В., Ничепорчук В.В., Постникова У.С., Ефремова И.С. Управление и минимизация техногенными территориальными рисками // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции* – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022, С. 19-22.
24. Пенькова Т.Г., Ничепорчук В.В. Мета модель детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий // *Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXX Всероссийского семинара, 30 сентября – 2 октября 2022 года*; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2022, С. 102-114.
25. Калач А.В., Ничепорчук В.В., Муллагалиев М.Г., Акулов А.Ю., Арифиллин Е.З. Систематизация параметров мониторинга для ситуационного моделирования реагирования на чрезвычайные ситуации // *Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции* – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2022, С. 472-479.
26. Гилёк С.А., Ничепорчук В.В. К вопросу о прогнозировании чрезвычайных ситуаций // *Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов*, 2022, 11, С. 248-254.
27. Kirik E., Vitova T. Pedestrian Movement: An Analysis of Transition Regime the Real-Life Experiment, a Comparison with a Simulation Data at an Example of the “SigmaEva” Software //

Lecture Notes in Computer Science, 2022, 13402, pp. 314-323. [Web of Science] DOI: 10.1007/978-3-031-14926-9_28.

28. Шапарев Н.Я., Токарев А.В., Якубайлик О.Э. Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в городе Красноярске в августе 2021 // *Аэрозоли Сибири. XXIX Конференция: Тезисы докладов.* — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022, С. 48.
29. Kadochnikov A.A. Technologies and principles of data collection and processing for the atmospheric air state monitoring system // *Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: материалы VI Всероссийской конференции, Владивосток, 3–8 октября 2022 г. / сост. А.С. Еременко.* – Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2022. С. 36. DOI: 10.24866/7444-5341-1.