

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
« 17 » января 2024 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
(заключительный)

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

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

_____ О. Э. Якубайлик

Красноярск 2024

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, заместитель директора ИВМ СО РАН по научной работе, канд. физ.-мат. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	О.Э. Якубайлик (Разделы 1, 2)
зав. отд., канд. биол. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.В. Андрианова (Раздел 1)
гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Н.Я. Шапарев (Раздел 1)
вед. науч. сотр., д-р биол. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	В.В. Заворуев (Раздел 1)
вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	М.Г. Садовский (Раздел 1)
ст. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.А. Гостева (Раздел 2)
ст. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	М.Г. Ерунова (Раздел 1)
ст. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.А. Кадочников (Раздел 2)
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Е.С. Кирик (Раздел 3)
ст. науч. сотр., д-р техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	В.В. Ничепорчук (Раздел 3)
ст. науч. сотр., канд. биол. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Г.В. Макарская (Раздел 1)
ст. науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	А.В. Токарев (Раздел 2)
науч. сотр., канд. техн. наук	<hr/> <i>(подпись, дата)</i>	Т.Б. Витова (Раздел 3)

науч. сотр., канд. физ.-мат. наук

(подпись, дата)

Т.В. Якубайлик
(Раздел 1)

мл. науч. сотр.

(подпись, дата)

А.К. Матузко
(Раздел 1)

Нормоконтроль

(подпись, дата)

Вяткин А.В.

РЕФЕРАТ

Отчёт 156 с., 78 рис., 7 табл., 4 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. Геоинформационное моделирование региональных экосистем на основе бассейнового подхода.....	9
1.2. Анализ многомерных данных методом упругих карт для оценки динамики систем	20
1.3. Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей	28
1.4. Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске в августе 2021 г.	32
1.5. Гидротермический режим р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС	37
1.6. Анализ пространственного распределения загрязнения атмосферы Красноярска по спутниковым данным.....	41
1.7. Мониторинговые исследования биологических ресурсов в водных объектах. Оценка экологического статуса водоемов с разной степенью антропогенной нагрузки методами биоиндикации	47
1.8. Анализ взаимосвязей гидробиологических характеристик с абиотическими факторами среды.....	51
1.9. Выявление зон цветения реки Енисей в городской черте города Красноярска.....	56
2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ (ГЕОПОРТАЛОВ) МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	63
2.1. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН	63
2.2. Информационно-вычислительное обеспечение системы мониторинга воздуха Красноярска.....	66
2.3. Формирование региональной геопространственной базы данных по температуре и осадкам на основе спутниковой информации и климатических моделей	72
2.4. Подсистема обработки и визуализации оперативной метеорологической информации.....	76
2.5. Программное обеспечение для визуализации данных метеорологического температурного профилемера	77
2.6. Навесное оборудование и программное обеспечение для сбора и анализа данных о параметрах атмосферы с помощью БПЛА.....	82

2.7. Программно-технологическое обеспечение для формирования архива изображений процессов туманообразования над рекой Енисей.....	87
2.8. Результаты исследований вертикального распределения концентрации аэрозольных частиц в атмосфере при температурной инверсии	92
2.9. Результаты сравнительного анализа концентрации взвешенных частиц PM2.5 в Красноярске над территорией города и акваторией незамерзающей реки Енисей.....	98
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕРВИСОВ	106
3.1. Анализ методов организации информационного пространства данных мониторинга	106
3.2. Создание каталога данных мониторинга, оценки и управления территориальными рисками ЧС.....	109
3.3. Разработка новых способов конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта	113
3.4. Проектирование системы поддержки принятия решений по защите территорий при чрезвычайных ситуациях природного характера	117
3.5. Интеллектуальная система поддержки управления территориальной безопасностью с учетом особенностей принятия решений на разных уровнях иерархии управления	121
3.6. Математические модели движения людей индивидуально-поточного типа	131
3.7. Разработка и тестирование алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования/наблюдения (мониторинга) мультиагентных потоков	134
3.8. Разработка и тестирование с учетом разнородности вычислительных сред «быстрых» алгоритмов пространственного препроцессинга для моделирования мультиагентных потоков (на примере пешеходных)	137
3.9. Разработка методов тестирования моделей динамики мультиагентного потока для корректного моделирования крупномасштабных процессов на примере реального процесса.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Избранные научные публикации по проекту за 2021-2022 гг.....	153

ВВЕДЕНИЕ

В представленном заключительном отчете содержатся результаты научных исследований и разработок, выполненных в проекте в период с 2021 по 2023 гг.

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 серви-

сов 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 – логическое 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. Геоинформационное моделирование региональных экосистем на основе бассейнового подхода

Бассейновый подход является эффективным инструментом для организации и управления природопользованием на региональном и межрегиональном уровнях. Водосборные бассейны объединяют в единое целое природные характеристики и являются уникальными модельными объектами исследования [1]. Модели управления территорией, разработанные на основе бассейнового подхода, встречаются для многих регионов [2]. Главной особенностью бассейнового подхода является масштабность: из малых водосборных бассейнов можно собрать как «мозаику» средние или крупные водосборные бассейны – в зависимости от площади исследуемой экосистемы.

С появлением алгоритмов геоинформационного моделирования границ водосборов и ландшафтов [3] бассейновый подход приобрел новые возможности использования бассейновой сети в качестве матрицы элементарных территориальных единиц, которые можно наполнять разнообразной информацией о состоянии территории. Оценка состояния уникальных природных характеристик для каждого бассейна и выявление взаимосвязей между ними – это комплексная задача, которая требует применения различных методов и технологий геоинформационного моделирования с использованием многообразных наземных и спутниковых данных [4]. Обычно используется большой набор атрибутов, включающий морфометрические характеристики рельефа, климатические показатели, тип почв и почвообразующих пород, растительный покров, антропогенную нагрузку, и т.д. Многие спутниковые системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) сегодня предоставляют свободный доступ к поступающим с них данным [5], а развитие технологий автоматизированной обработки спутниковых данных позволяет обеспечить получение необходимой информации для решения задач, связанных с рациональным природопользованием в гидрологически определенных географических районах на региональном и межрегиональном уровнях.

Настоящая работа включает тематическое исследование территории Красноярского края (центральная часть бассейна реки Енисей). Сельское хозяйство Красноярского края находится в зоне рискованного земледелия. Определение уникальных характеристик природной среды поможет лицам, принимающим решения в государственном и частном секторах на всех уровнях, определить приоритеты финансирования.

Цель данной работы – это информационно-методическое обеспечение задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования.

Основная идея данной работы заключается в организации данных по природно-ресурсным характеристикам территории в одном географическом пространстве на основе бассейнового подхода. В качестве исходной информации используются разные по масштабу (пространственному разрешению) данные различного содержания. В частности, цифровой рельеф имеет пространственное разрешение 70 м, данные о температуре 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). В результате – данные с низким пространственным разрешением привязываются к верхнему уровню водосборного деления, а более точные данные, с высоким пространственным разрешением – к более детальному уровню. 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 качестве района исследования были выбраны водосборные бассейны нескольких крупных рек Красноярского края (Восточная Сибирь) – Кан, Мана, Туба и Оя общей площадью около 9 млн. га, расположенные между 91°-97° восточной долготы и широтами 52°-56° северной широты. Выбранные водосборные бассейны находятся в центральной части Красноярского края Российской Федерации и включают разнообразные природные зоны: тайга, зона смешанных лесов (здесь расположен административный центр Красноярск), участки степи. На данной территории встречаются три формы рельефа (возвышенность (200-500 м), низкие горы (500-1000 м) и средние горы (1000-2000 м) (Рис. 1). Среднегодовое количество осадков по статистике за 20 лет составляет около 650 мм/год. Климат на данной территории тоже разнообразен, средняя сумма активных температур (выше 10 градусов) меняется от 650 до 2900 градусов. На исследуемой территории представлено большое разнообразие природных и географических объектов. Среди них степные, лесостепные, таежные, смешанные и лиственные леса. Около половины территории занято сельскохозяйственными угодьями, расположенными в основном в долинах. Другая часть территории – горная тайга и тундра Саянских гор с крутыми склонами, перепадами рельефа. Значительная часть рассматриваемой территории имеет высокое экономическое значение для Красноярского края. Здесь идет интенсивное развитие агропромышленного комплекса, горнорудной промыш-

ленности и туризма, формируется новая инфраструктура железнодорожного и автомобильного транспорта, развиваются экологически чистые производства с широким применением биотехнологий. Оценка потенциала экосистемных услуг данной территории позволит рационально управлять ее экосистемой.

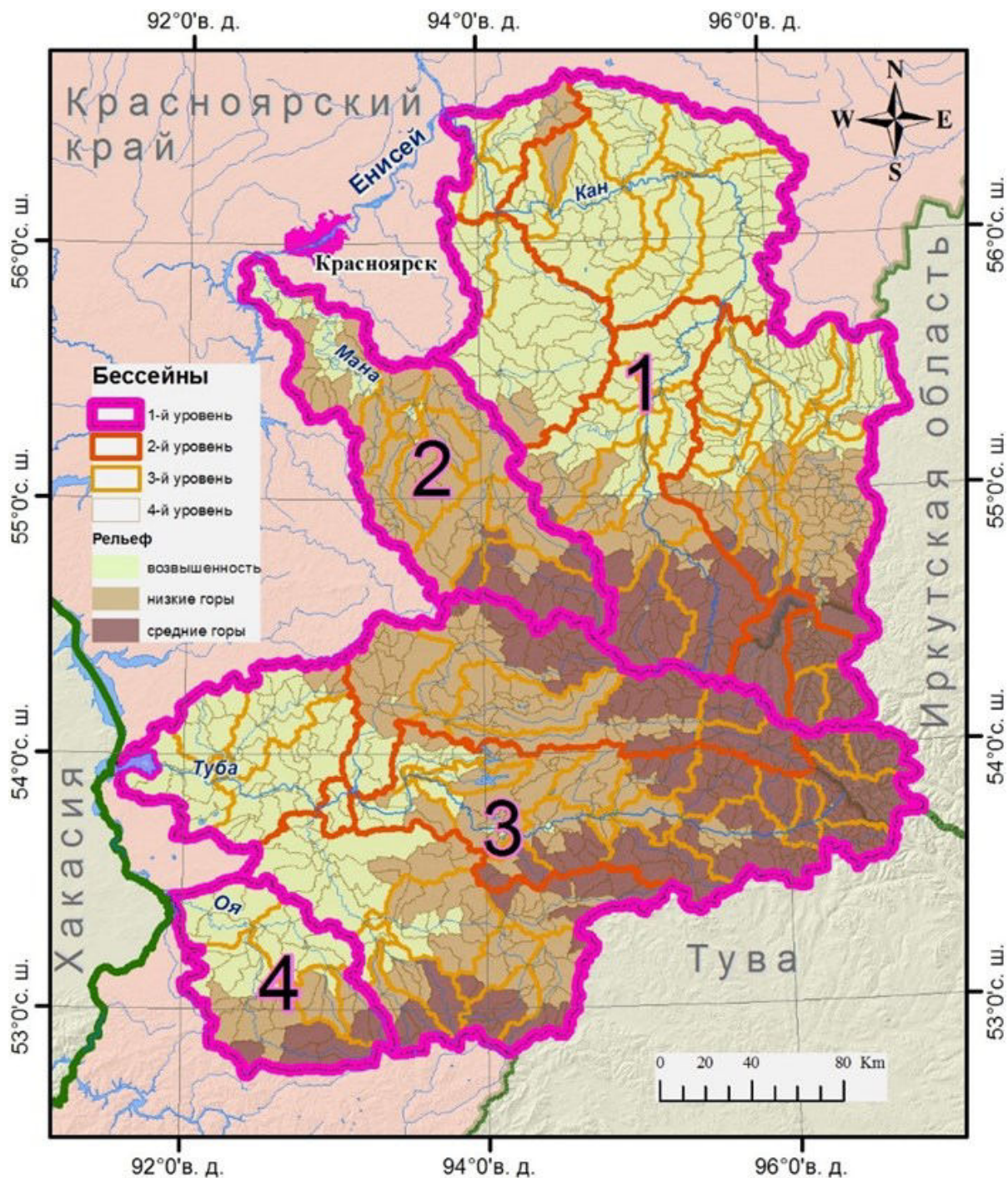


Рисунок 1 – Иерархические уровни водосборного деления района исследования на тематической карте рельефа: 1 – бассейн реки Кан; 2 – бассейн реки Мана; 3 – бассейн реки Туба; 4 – бассейн реки Оя.

За отчетный период (3 года) была организована многоуровневая база данных природных характеристик территории в одном географическом пространстве. Для формирования такой базы данных были разработаны методы и технологии геоинформационного моделирования, которые представлены в стандартном программном обеспечении ГИС.

Технология бассейнового моделирования заключалась в разработке иерархической модели классификации водосборных бассейнов исследуемой территории; которая состоит из четырех уровней. Для этого использовались геоинформационные системы (ГИС) WhiteBox GAT, QGIS с модулями GRASS и программное обеспечение ArcGIS. В качестве исходных материалов использовались следующие данные:

1. (MERIT DEM) MERIT Hydrologically Adjusted Elevations DEM [6] с пространственным разрешением 70 м;
2. Векторный слой водосборных бассейнов, построенный в полуавтоматическом режиме с помощью специальных гидрологических модулей программного обеспечения WhiteBox GAT [7] на основе цифровой модели рельефа MERIT DEM;
3. Гидрографическая сеть с топографических карт масштаба 1:1 000 000, 1:2 500 000 и 1:100 000 в векторном формате.

Технология моделирования бассейнов заключалась в следующем. На первом этапе инструментом Breach depressions была проведена предварительная обработка MERIT DEM в результате которой была сформирована цифровая модель рельефа, корректная для гидрографического анализа. Далее выполнялись этапы формирования полубассейнов и бассейнов, на основе работы алгоритма Sub-basins. Все перечисленные этапы были реализованы в программе WhiteBox GAT. Далее в программе QGIS проводилась заключительная обработка данных, коррекция границ и топологии слоя пространственных объектов водосборных бассейнов.

Иерархическая структура водосборного деления

В ГИС ArcGIS формировались водосборные бассейны рек-притоков в иерархической системе 1-го, 2-го, 3-го и 4-го уровня водосборного деления. Для этого использовались векторные слои гидрографической сети разных масштабов.

1-й уровень водосборного деления составляют крупные реки Красноярского края: река Кан имеет идентификатор 1, Мана – 2, Туба – 3, Оя – 4 2-й уровень – это крупные притоки рек 1-го уровня, 3-й уровень делит бассейны 2-го уровня, и т.д. (Рис. 1).

Иерархические уровни водосборного деления выбирались исходя из детализации гидрографической сети и исходного набора природных характеристик по спутниковым и наземным данным разного масштаба. В целом, была сформирована 4-уровневая классификация

исследуемой территории. Всего создано 1105 бассейнов 4-го уровня, со средней площадью 0,008 км².

Методы формирования базы данных природных характеристик

Расчет основных статистических показателей морфометрических характеристик рельефа для каждой водосборной территории осуществлялся в ГИС QGIS на основе скорректированной цифровой модели рельефа MERIT DEM. База данных морфологических характеристик состоит из следующих показателей: средняя высота, уклон и экспозиция склона. Определены основные статистические значения (минимальное, максимальное, среднее и среднее квадратичное отклонение).

Данные о температуре поверхности были подготовлены с использованием продукта Terra MODIS MOD11A2, архив которого находится в открытом доступе с 2000 года. Каждое изображение содержит информацию о дневной и ночной температуре поверхности Земли с пространственным разрешением около 1 км. Вегетационные индексы NDVI и SAVI были рассчитаны с использованием продукта MOD09Q1, где каждый пиксель имеет пространственное разрешение 250 м. Расчет вегетационного индекса LAI был основан на продукте MOD15A2H, с пространственным разрешением 500 м.

Информация о растительном покрове исследуемой территории была получена из нескольких карт почвенно-растительного покрова России, карт пахотных земель России и ряда других наборов исходных данных [8]. Все эти данные были созданы с использованием технологий автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования Земли. Цифровые карты, построенные в этой работе, основаны на данных Terra MODIS и Landsat. Сгенерированный набор данных имеет пространственное разрешение 250 м.

По всем водосборным бассейнам на основе архива данных Глобального измерения осадков (GPM) были подготовлены ежедневные данные о накоплении осадков с 2001 года по настоящее время. Данная информация может быть использована для рассмотрения и решения различных задач в пространственно-временном моделировании динамики развития экосистем. Миссия GPM, инициированная NASA и JAXA, представляет собой международную сеть спутников, которые обеспечивают глобальные наблюдения за дождем и снегом.

Почвенный покров сформирован с использованием цифровых данных Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. Данный регистр содержит векторные данные, полигональные объекты почвенной карты России в масштабе 1:2 500 000 под редакцией В.М. Фридланда (<http://egrpr.esoil.ru/>). К каждому полигону были привязаны атрибуты, включая диагностику и описание почв (тип почвы, подтип и т. д.). Данные о преобладающей характеристике почвы были добавлены для каждого водосборного бассейна.

Для исследуемой территории построена четырехуровневая иерархическая система водосборных бассейнов с учетом гидрографической сети различных масштабов. Всего было создано 1105 бассейнов 4-го уровня со средней площадью 1 га, в том числе 479 бассейнов 4-го уровня для реки Кан, 94 для реки Мана, 483 для реки Туба и 49 для реки Оя. Полученная иерархическая структура позволяет добавлять более детальные уровни водосборного деления (5-й уровень и далее), если есть потребность в более подробной пространственной информации. Например, такими данными 5-го уровня могут быть карты водотоков на землях сельскохозяйственного назначения – по ним можно получить сведения о засушливых и переувлажненных участках, подготовить план проведения мелиоративных мероприятий. Наиболее целесообразным источником данных о рельефе в этом случае будет съемка с беспилотного самолета или квадрокоптера.

Сформирована база данных набора природных характеристик-атрибутов иерархической системы водосборного деления, которая состоит из морфологических характеристик, характеристик растительного и почвенного покрова, за 2000-2021 год каждый бассейн содержит значения (с шагом 8 дней) о температуре, выпавших осадков и вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории, используя различные методы математического моделирования, статистического и кластерного анализа.

На основе данных MERIT Hydro DEM был проведен анализ морфологических характеристик, таких как средняя высота, уклон и экспозиция склона, для каждого уровня иерархической системы водосборных бассейнов. В частности, вычислены следующие показатели для бассейна реки Оя: минимальная высота – 280 м, максимальная высота – 1373 м, средняя высота – 594 м, стандартное отклонение – 283 м. Перечисленные показатели также определены для рек Туба, Мана и Кан. Для ранжирования водосборных бассейнов по средней высоте была использована стандартная классификация местности по абсолютной высоте (рисунок 1).

Для территории четырех водосборных бассейнов был составлен и проанализирован архив спутниковых данных для каждого бассейна каждого уровня на основе 8-дневных безоблачных данных о среднесуточной температуре и нескольких вегетационных индексах, полученных Terra MODIS за 2000-2022 годы. Он может быть использован для анализа состояния и тенденций природной среды. Накопленная статистика дает основу для количественной оценки характеристик различными методами пространственного анализа: наложением, отбором, зонированием, сводной статистикой. Архив позволяет оценить состояние водо-

сборных бассейнов любого уровня и сравнить динамику вегетационных показателей и температур, осадков для разных типов растительности или высотных поясов, типов характеристик почв.

Был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течение разных годов для каждого бассейна. Посчитана средняя сумма активных температур воздуха выше 10°C за 2000–2022 года. На территории исследования находится несколько наземных метеостанций (Рис. 2), архив которых находится в свободном доступе. Сравнение годового хода температуры по данным метеостанций и MODIS показывает хорошую согласованность между ними. Коэффициент корреляции данных о годовом ходе температур для всех метеостанций по сравнению с данными MODIS превышает 0,9.

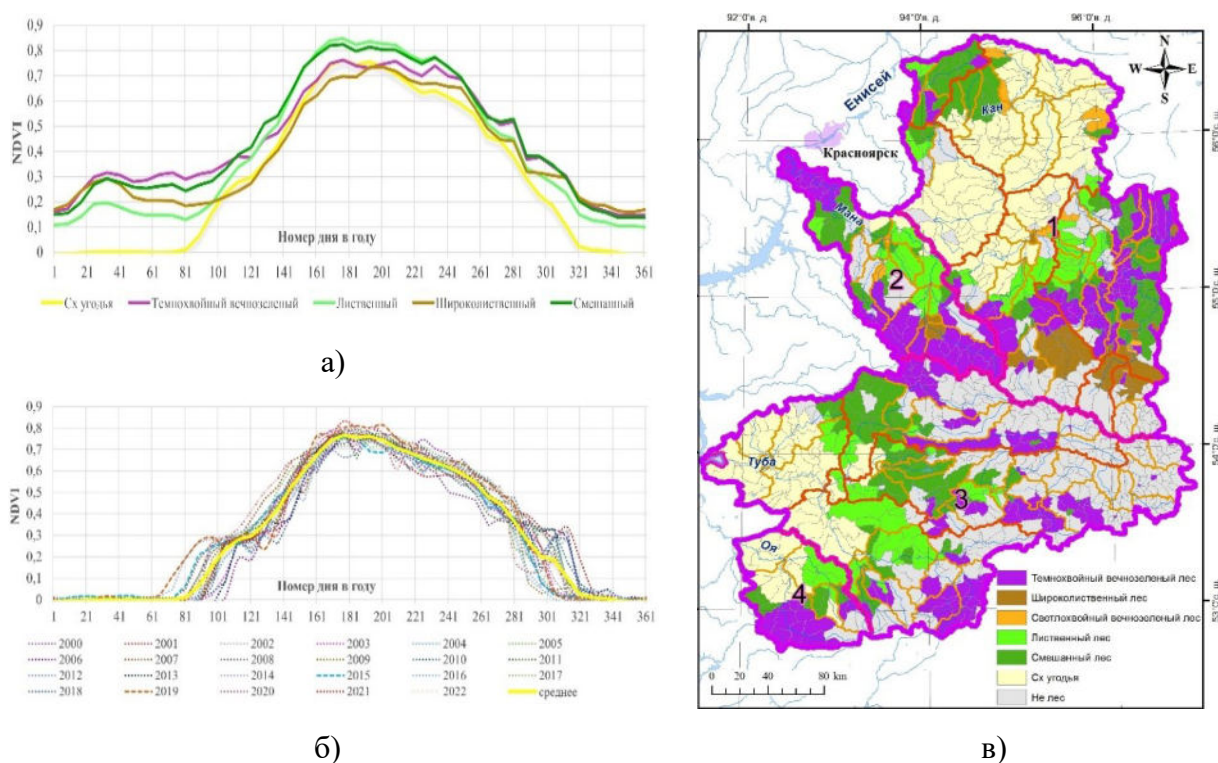


Рисунок 2 – а) Среднее значение динамики NDVI в течение 2000-2022 гг. для различных типов растительности; б) Средние значения динамики NDVI в разные годы для сельскохозяйственных угодий; в) тематическая карта растительного покрова.

Были получены среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого бассейна. Накопленные данные позволяют выполнять количественную оценку развития сельскохозяйственных культур на рассматриваемой

территории. На рисунке 2б представлен ход средних значений динамики NDVI для сельскохозяйственных районов за отдельные года с 2000–2022 гг. На рисунке 2а показаны средние значения за этот же период для некоторых типов растительности. Получены характеристики преобладающих видов растительного покрова (рис. 2в) и почвенного покрова. База данных характеристик почв содержит более 50 атрибутов, которые определяют характер и свойства почв.

За 2023 отчетный период по данным реанализа NASA GPM для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам и ряду других характеристик за период 2000–2022 г. Сравнительный анализ полученных данных и данных с наземных метеостанций по осадкам показал высокую степень соответствия между рассмотренными наборами данных. Так, например, в 2019 году чрезмерное число дождей, наблюдавшееся в южных и местами в центральных районах, привело к увеличению количества осадков относительно нормы в 1.1–1.8 раза. На рисунке 3а представлена тематическая карта суммы накопленных осадков за 2019 год и имеющиеся на данной территории наземные метеостанции. На рисунке 3б представлен результат вычисления среднемноголетних значений количества накопленных осадков за период 2000–2020 гг.

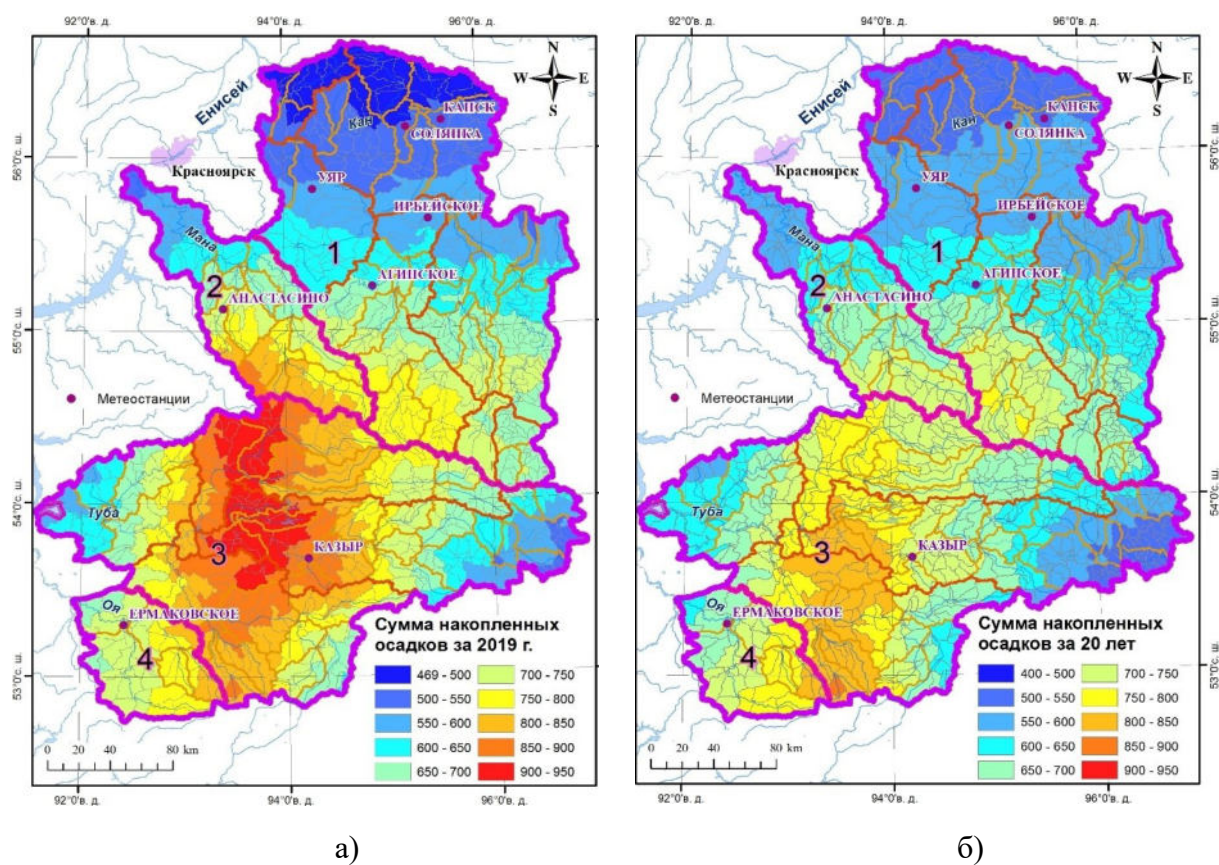


Рисунок 3 – Тематические карты суммы накопленных осадков: а) за 2019 год; б) за 2000–2020 гг.

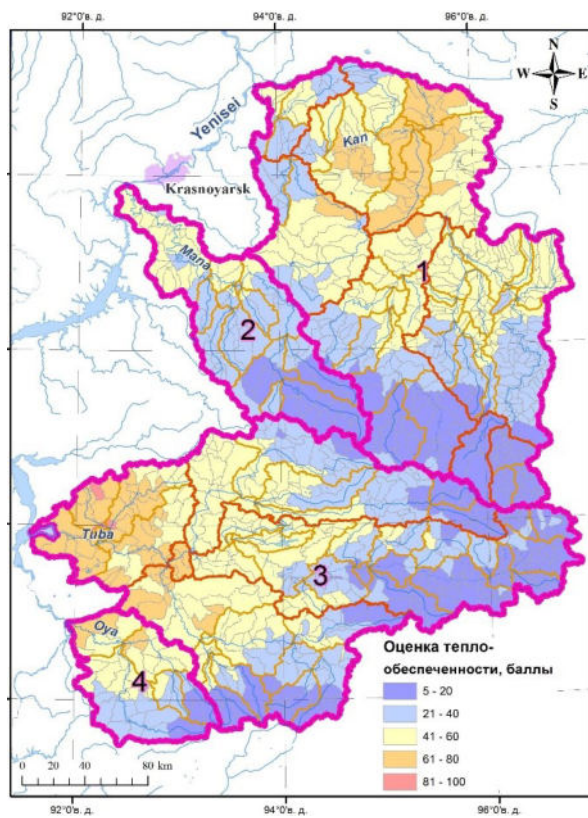
Отдельным этапом данного проекта является разработка методов оценки природно-ресурсного потенциала (ПРП) территории – комплексный анализ многомерных данных о природных объектах. Качественная оценка ПРП территории служит важным инструментом оптимизации природопользования, включает в себя полный учет особенностей 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.

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. 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 (Рис. 4).

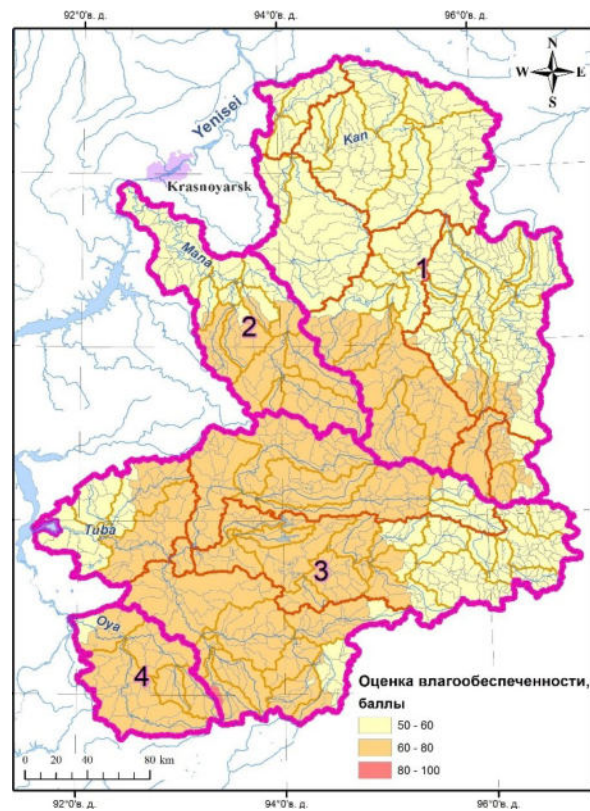
Оценка ПРП определяется по следующей градации (баллы): 1—20 – низкий; 21—40 – пониженный; 41—60 – средний; 61—80 – повышенный; 81—100 – высокий.

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.

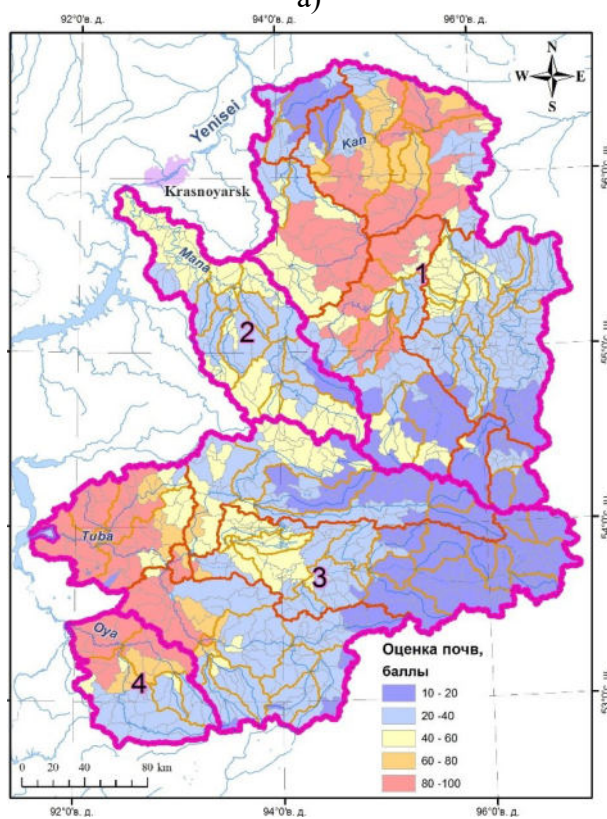
Выполненная оценка ПРП агроландшафтов является основой для определения путей оптимизации аграрного природопользования, активизации рынка сельскохозяйственной продукции и роста рентабельности сельского хозяйства земледельческой территории Красноярского края.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Результаты многомерного геостатистического анализа территории: а) оценка теплообеспеченности; б) оценка влагообеспеченности; в) оценка почв; г) оценка природно-ресурсного потенциала.

Разработана детальная многоуровневая иерархическая система разграничения водосборных бассейнов территории южного Красноярского края. Разработаны необходимые методы и технологии для создания, хранения и обработки данных о каждом водосборном бассейне. Методы многомерного анализа данных могут быть использованы для выявления закономерностей распределения данных и определения взаимосвязей между ними. Полученная многоуровневая база данных природных характеристик территории может быть расширена как по масштабу, за счет добавления более детального уровня бассейна, так и за счет наполнения его природными характеристиками не только продукта MODIS, но и других спутниковых продуктов. База данных природных характеристик, представленных в данном исследовании, служит для оценки состояния уникальных природных свойств каждого водосборного бассейна и выявления их взаимосвязей. Для рационального управления территорией необходимо правильно оценить состояние экосистемы. Предложенная методика формирования и использования совокупности природных характеристик территории позволяет осуществлять мониторинг изменений экосистем, планирование рациональной деятельности человека (землепользования), зонирование территории для оказания основных экосистемных услуг.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Рогов В. Ю., Багайников М. Л. Бассейновый подход к формированию институтов экономического развития региона (применительно к Байкальскому региону). Вестник Забайкальского государственного университета, 2020. Т. 26, № 5. С. 106–117.
DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-5-106-117.
2. Браславская Т.Ю., Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С., Коротков В.Н., Немчинова А.В., Чуракова Е.Ю., Козыкин А.В., Кулясова А.А., Алейников А.А. Ландшафтно-бассейновый подход в экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. Т. 84(6). С. 905-919. DOI: 10.31857/S2587556620060035.
3. Haag S. et al. A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries // Environmental Modelling & Software, 2020. V. 134. P. 104842.
4. Лупян Е.А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д. Е., Толпин В. А., Уваров И. А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

5. Макарова М. А., Владимирова Н. А. Обзор ресурсов открытых пространственных данных о растительном покрове земли в сети Интернет. Ботанический журнал, 2020. Т. 105. № 4, С. 387–407. DOI: 10.31857/S0006813620040067.
6. Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P. D., Allen G. H., Pavelsky T. M. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. Water Resour Res., 2019. V. 55. № 6. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.
7. Lindsay J. B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. Comput Geosci., 2016. V. 95. С. 75–84. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104842.
8. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М., ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Основные публикации по разделу:

1. Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Геоинформационное моделирование экосистем на основе бассейнового подхода // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 560–573. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-560-573. [Ядро РИНЦ, Scopus]
2. Marina G. Erunova, Oleg E. Yakubailik. Methods and technologies for spatial analysis of regional ecosystems based on the watershed approach // Integrated Environmental Assessment and Management. 2023. 19(4), 972-979. DOI: 10.1002/ieam.4652. [Scopus Q1, Web of Science]

1.2. Анализ многомерных данных методом упругих карт для оценки динамики систем

В рамках выполнения работ по настоящему проекту были проведены дополнительные исследования по анализу многомерных данных, представляющие также интерес и в смежных областях.

Рассмотренные в предыдущем разделе уникальные природные характеристики интегрированной базы 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 исходных 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 K -средними для диапазона $2 \leq K \leq 8$. Нет стабильных (или даже частично устойчивая) классификация с помощью K -средних найдена даже для $K = 2$. Этот факт кажется относительно естественным: конфигурация данных позволяет проводить различные классификации с помощью K -средних так,

чтобы они дополняли друг друга в течение серии запусков метода. Рост числа классов в K -средних еще больше ухудшает классификацию.

Метод эластичных карт выявляет очень отчетливую и четкую кластерную структуру (Рис. 5). На этом рисунке показано «сырое» распределение водоразделов по мягкой упругой карте 16×16 (Рис. 5а), а также идентификация кластеров (Рис. 5б), обеспечиваемая локальной двумерной плотностью (1, 2) по той же карте.

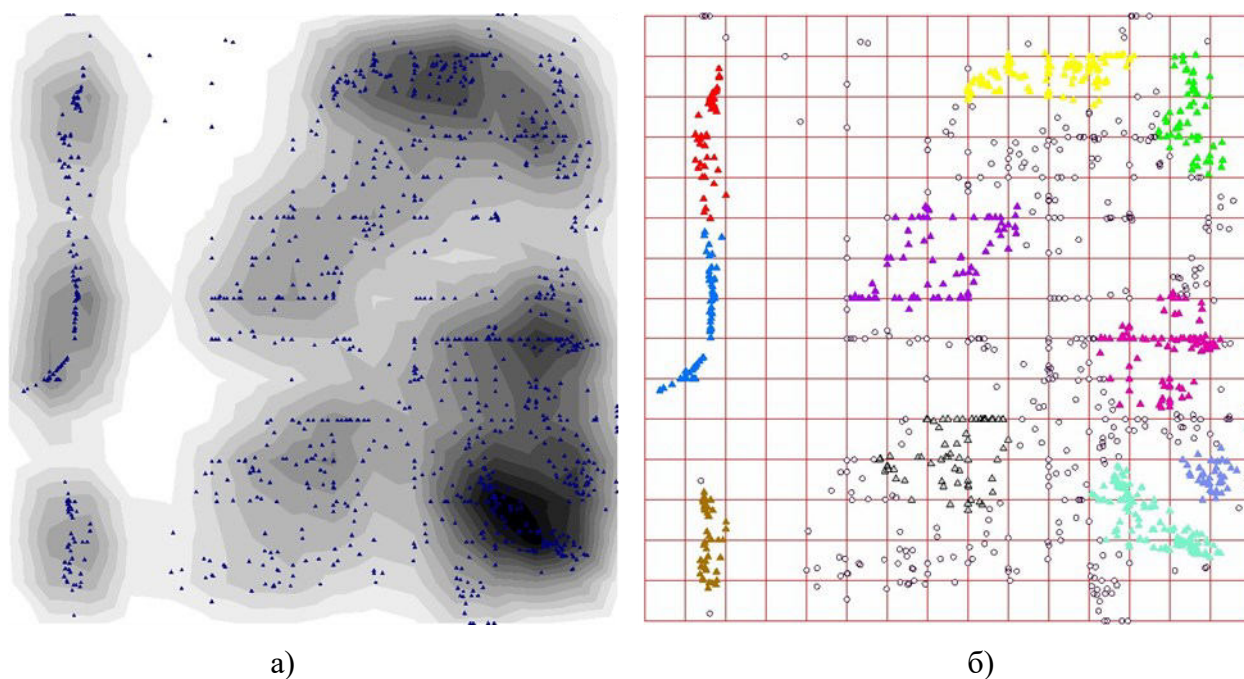


Рисунок 5 – Эластичные мягкие карты 16×16 для кластеризации водоразделов четвертого уровня. а) Общее распределение по локальной плотности (2). б) 10 кластеров, идентифицированных на этой эластичной карте через локальную плотность.

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 аквамашиновыми 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 эти кластеры (см. Рис. 5б и 6а). Следует подчеркнуть, что эти два рисунка (Рис. 5б и 6а) имеют одинаковую схему окраски при идентификации кластеров.

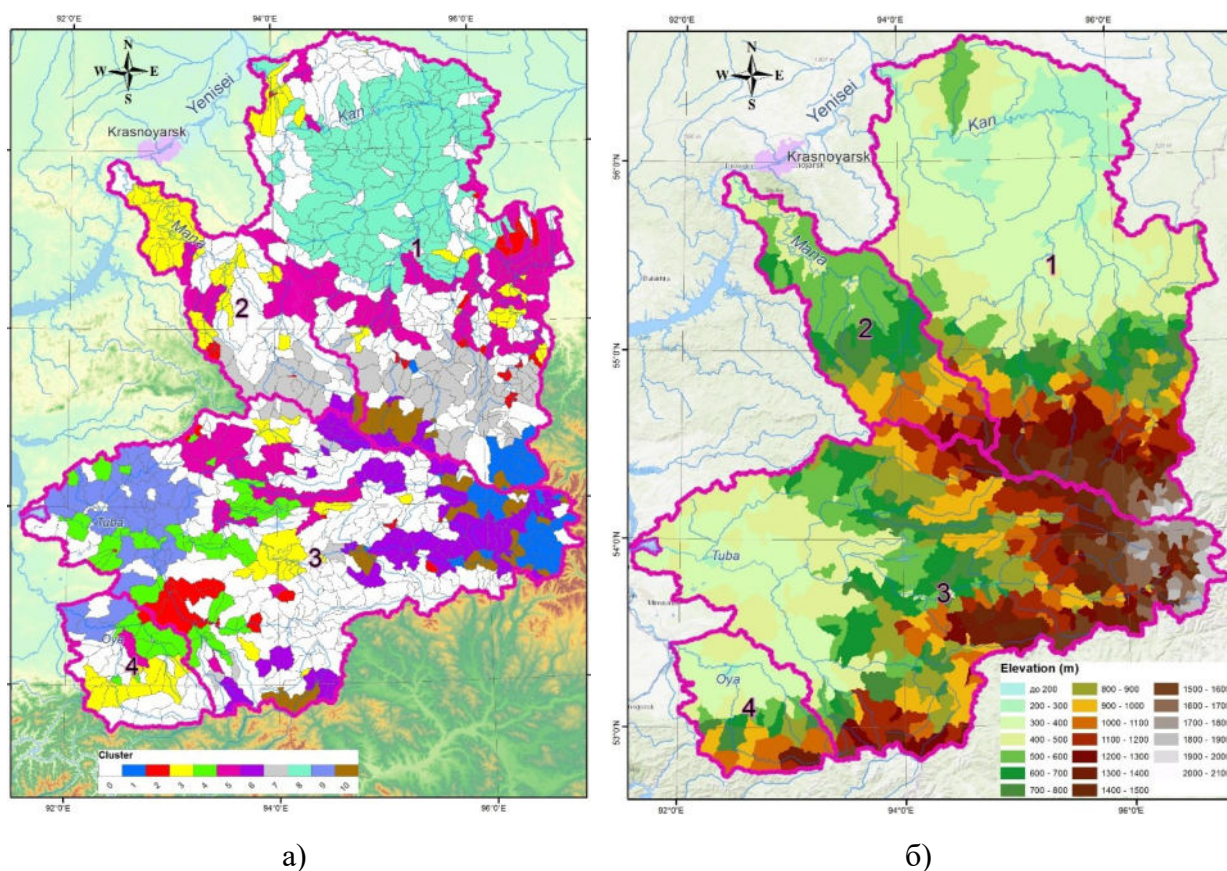


Рисунок 6 – а) Тематическая карта распределения кластеров, идентифицированных по локальной плотности (1, 2). б) Тематическая карта рельефа.

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. 5а). Восьмой и девятый кластер, напротив, включает водоразделы, расположенные на равнинной территории сельскохозяйственного землепользования (Рис. 6а). 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. 6), 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.

Рассмотренные выше 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 ниже на этих результатах подробнее.

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 чрезнащеводная 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 7 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. 8), можно выделить 3 кластера с высокой плотностью (кластер здоровых пациентов и 2 кластера пациентов с ДМПП).

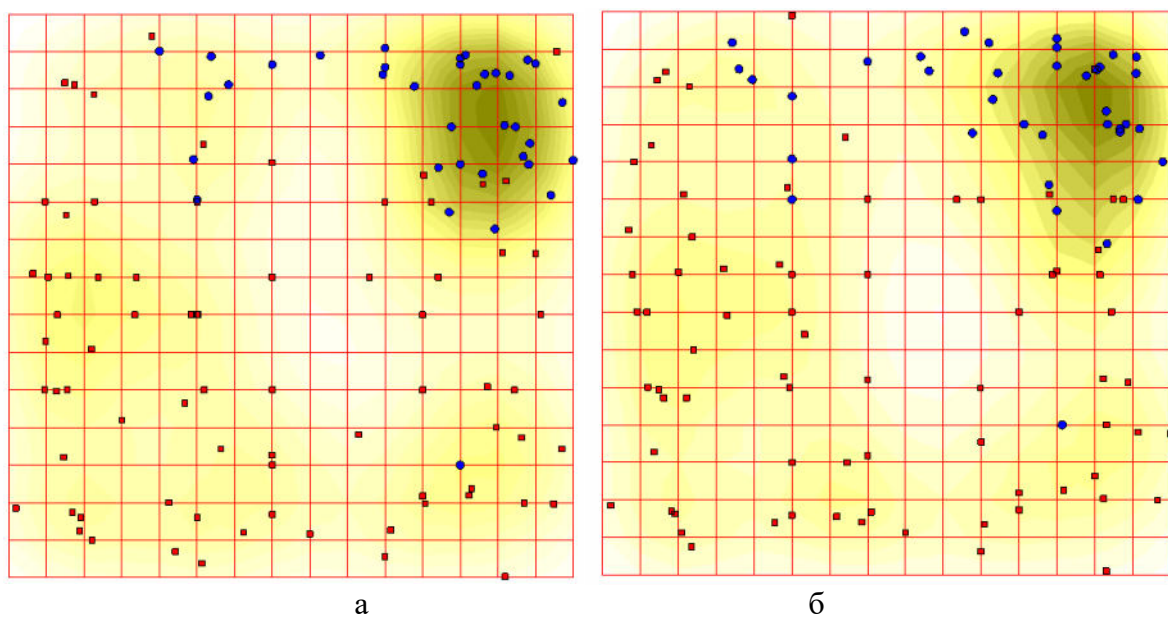


Рисунок 7 – Упругие карты, построенные по всем переменным (а) и с исключением антропометрических данных (б).

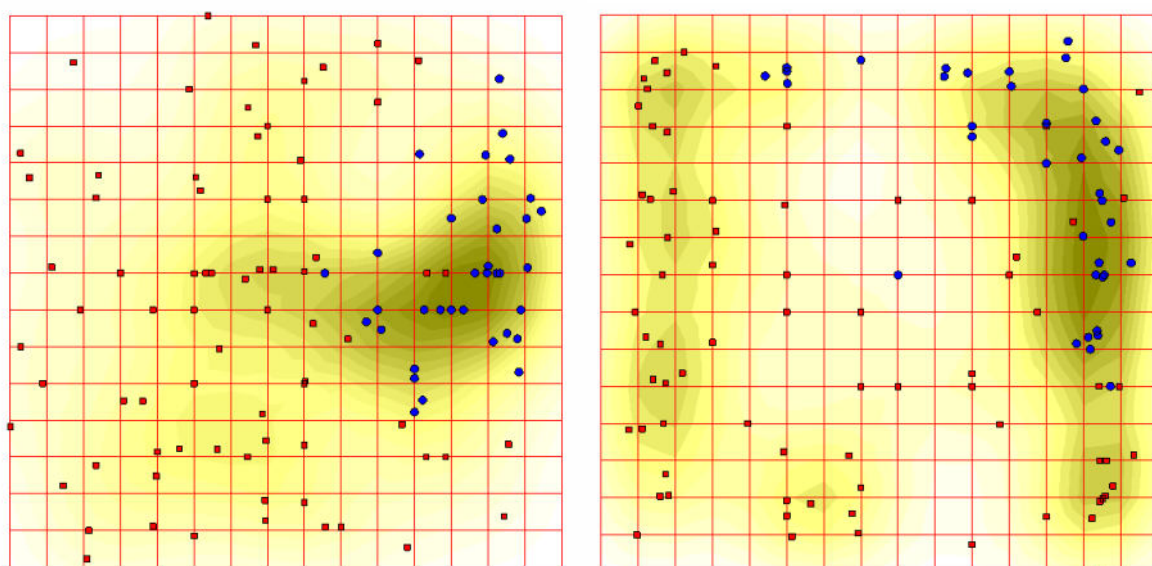


Рисунок 8 – Упругие карты, построенные с учетом коррелирующих переменных.

Основные публикации по разделу:

- 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. DOI: 10.1371/journal.pone.0264640. [Q1 Web of Science]
- Pokhabov D.D., Abramov V., Tunik M., Sadovsky M., Pokhabov D.V. Connection between olfactory dysfunction and severity of tremor // Journal of the Neurological Sciences, 2021, V. 429, 119590. DOI: 10.1016/j.jns.2021.119590 [Q2 Web of Science]

1.3. 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.

Образование, существование и распад тумана являются результатом сложных взаимодействий между микрофизическими, термодинамическими и динамическими процессами [1]. Наиболее изучены туманы, связанные с радиационным охлаждением суши. Их можно разделить на: радиационный туман, туман с высокой инверсией и адвективно-радиационный туман [2, 3]. Суть явления состоит в том, что в ясные ночи земная поверхность значительно охлаждается за счет излучения тепловой инфракрасной радиации. В последующем нижние влажные слои атмосферы при взаимодействии с этой охлажденной поверхностью уменьшают свою температуру и переходят в туман.

Другой тип тумана – туманы парения, обычно наблюдаются в Арктике и возникает в результате адвекции холодного воздуха с низким давлением пара над относительно теплой поверхностью воды [4, 5].

Численному моделированию образования и развития туманов с учетом синоптической обстановки посвящена работа [6], а в работе [7] выполнено сравнение нескольких численным методов прогноза туманов.

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 настоящем проекте 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. 9).

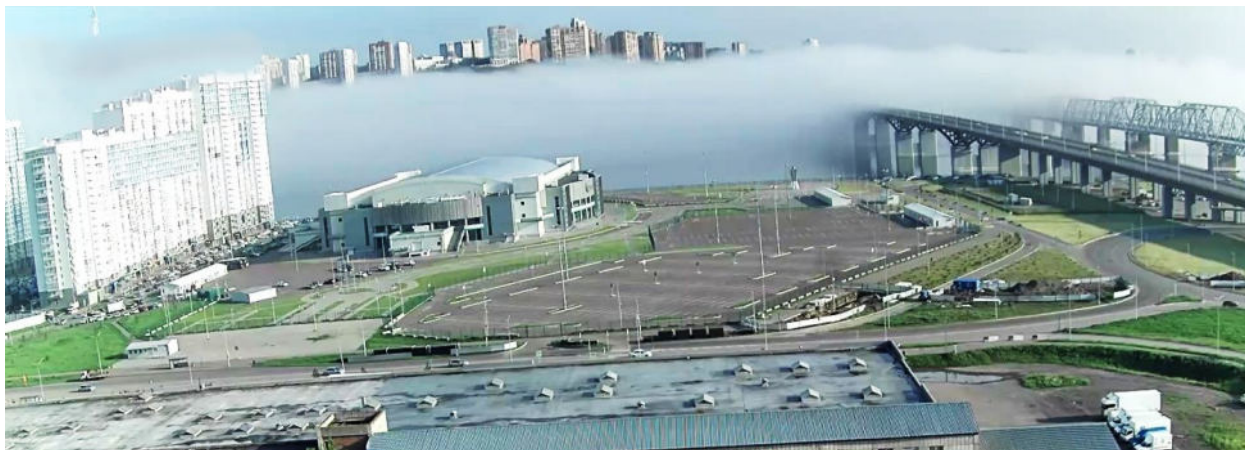


Рисунок 9 – Туман охлаждения над р. Енисей (правый берег, 1 августа 2020 г., 07:30)

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

Таблица 1. Число зарегистрированных туманов ежемесячно 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 прикрит 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. 10) 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.

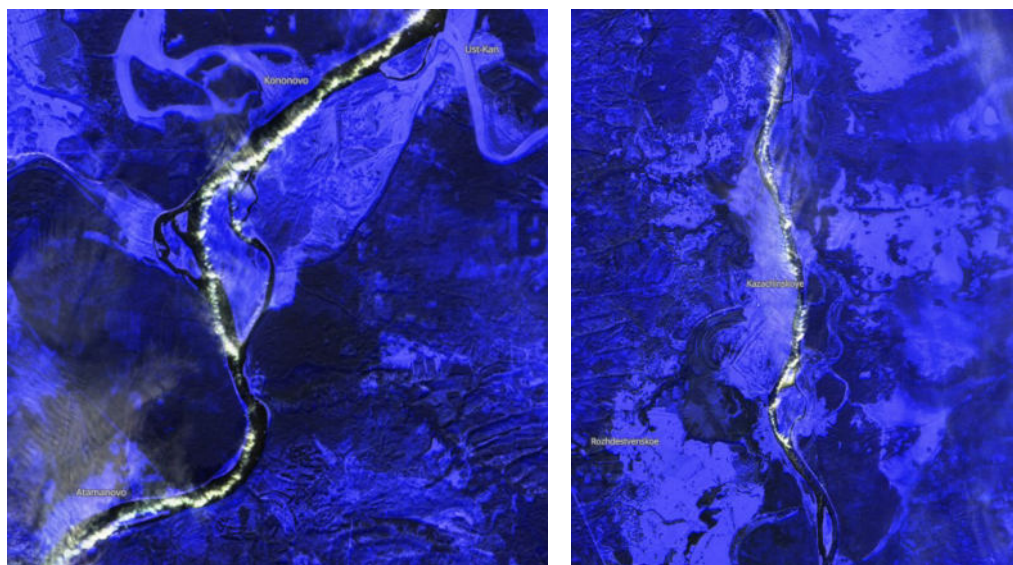


Рисунок 10 – Туманы парения на р. Енисей в районе деревни Кононово (140 км от плотины ГЭС), села Казачинское (300 км) на спутниковом снимке Sentinel-2 (2020-01-11, 12:02 местного времени), представленном в формате False Color (Urban) composite.

На фрагменте снимка Landsat-8 за 28 ноября 2020 г. (Рис. 11), как и в предыдущем случае, видно, что туман в г. Красноярске неоднородный, имеет форму страт. Время съемки соответствует рассеянию тумана.

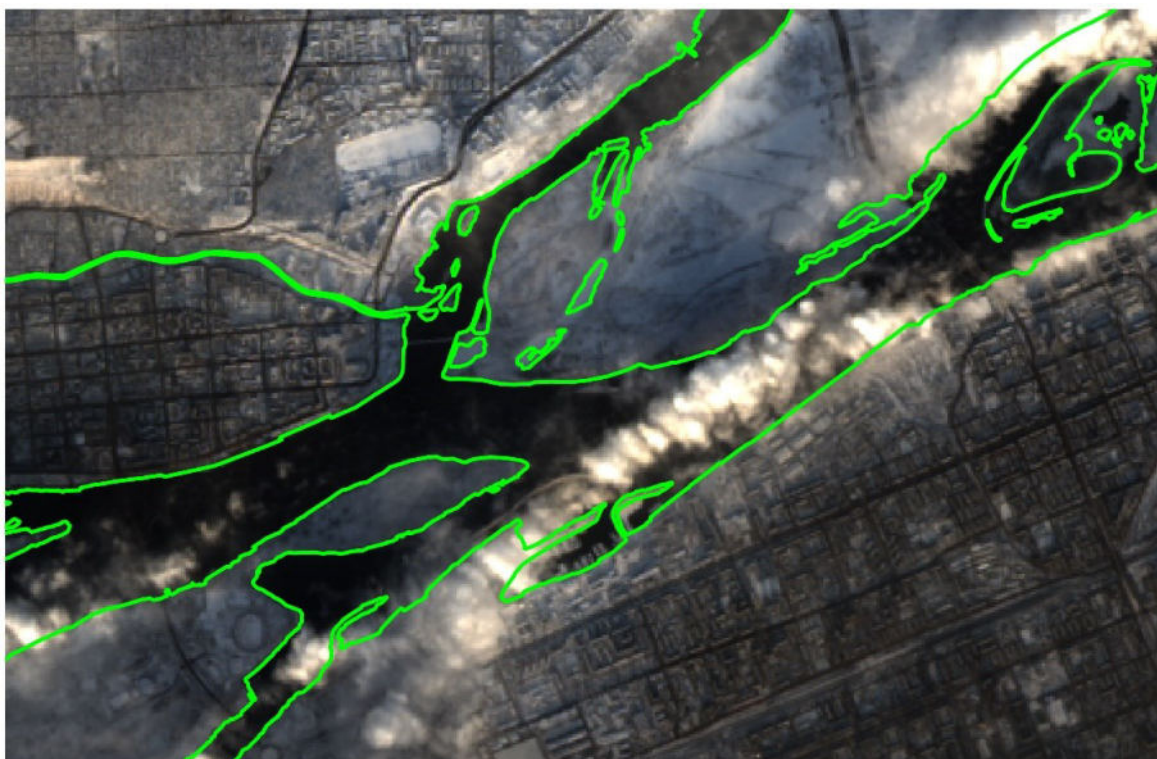


Рисунок 11 – Фрагмент центральной части г. Красноярска на снимке Landsat-8 (2020-11-28, 11:47 местного времени), изображение в естественных цветах.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Duynkerke P.G. Radiation Fog: A Comparison of Model Simulation with Detailed Observations // Mon. Weather Rev. 1991. Vol. 119, № 2. P. 324–341.
2. Gultepe I. et al. Fog research: A review of achievements and future perspectives // Pure Appl. Geophys. 2007. Vol. 164, № 6–7. P. 1121–1159.
3. Bergot T., Guedalia D. Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part I: Numerical Model and
4. Okland H., Gotaas Y. Modelling and prediction of steam fog. 1995. Vol. 68. P. 121–131.
5. Gultepe I. et al. Turbulent heat fluxes over leads and polynyas, and their effects on arctic clouds during FIRE.ACE: Aircraft observations for April 1998 // Atmosphere-Ocean. 2003. Vol. 41, № 1. P. 15–34.
6. Гудошникова О.А., Матвеев Л.Т. Образование и развитие туманов с учетом синоптической обстановки // Оптика атмосферы и океана. 2001. Vol. 14, № 4. P. 303–307.
7. Зароченцев Г.А. et al. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Vol. 31, № 12. P. 981–987.

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.

1.4. Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске в августе 2021 г.

Лесные пожары являются экстремальным явлением, нарушающим экологическое равновесие и приводящим к изменению погодных условий. Крутцен и Биркс [1] впервые отметили, что после ядерного обмена возможно сильное похолодание окружающей природной среды, которое может быть вызвано блокированием солнечного излучения смогом лесных, городских и промышленных пожаров, что было позже названо «ядерной зимой» [2]. Первые результаты анализа массовых природных и «ядерных» пожаров были представлены в [3, 4]. Образующиеся при сжигании биомассы дымовые аэрозоли поглощают и рассеивают солнечное излучение, тем самым уменьшая величину солнечной радиации достигающей подстилающей поверхности Земли [5, 6]. Следует отметить, что атмосферный аэрозоль является одним из основных факторов, определяющих характеристики климата [7, 8].

В 2021 г. в Якутии возникли масштабные лесные пожары, дым от которых достиг Красноярска 7 августа и сохранялся несколько суток. Объектом исследования являлось поведение окружающей природной среды в Красноярске и его пригороде (в районе д. Минино) в это период (Рис. 12).

Анализ метеословий выполнялся на основе данных с 9 постов наблюдения (Рис. 12, точки 1–9). Данные с постов (атмосферное давление, относительная влажность, температура воздуха, скорость и направление ветра, концентрация PM_{2.5}) с периодом в 20 минут передаются в Краевую ведомственную информационно-аналитическую систему о состоянии окружающей среды Красноярского края и далее в реальном режиме времени обрабатываются на геопортале ИВМ СО РАН. Температура воздуха в д. Минино получалась с метеостанции государственной сети ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (Рис. 12, Метеостанция) с периодичностью в 3 часа. Температура почвы измерялась на пробной площади (Рис. 12, д. Минино), которая находилась под «парами». Данные измерений фиксировались с помощью автономного регистратора iButton DS1922L-F5, закопанного в почву на глубину 0,5 см, с периодичностью в один час. Для визуальной оценки состояния атмосферы в городе использовались изображения с веб-камер наружного наблюдения (Рис. 12, Камеры 1–3).

Для анализа пространственно-временной динамики дымов якутских пожаров был использован ультрафиолетовый аэрозольный индекс UVAI, получаемый на основе данных ДЗЗ.

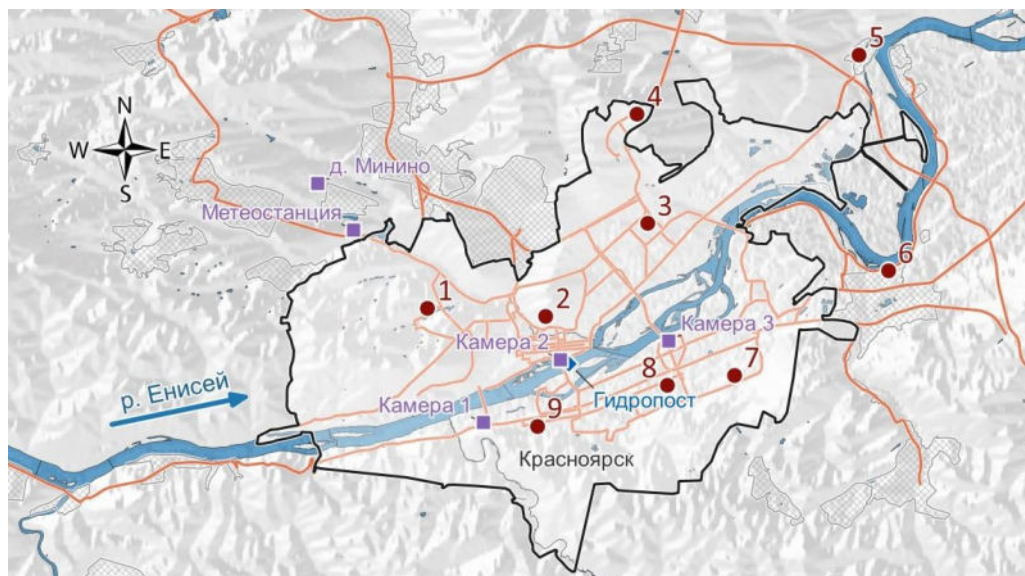


Рисунок 12 – Карта области исследования.

Серия масштабных лесных пожаров в Якутии в 2021 году началась в мае и закончилась в августе. По данным информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства России «ИСДМ-Рослесхоз» площадь лесных пожаров в 2021 году побила рекорды с начала XXI века – в России сгорело около 18,8 млн. гектаров леса, из них почти 9,5 – в Якутии. Год стал самым катастрофическим в пожарном отношении для российских лесов за весь период, по которому есть достаточно надежные и сравнимые спутниковые данные (с 2001 года).

В нашем исследовании данные UVAI были получены с помощью прибора OMPS (Ozone Mapping Profiler Suite), установленного на метеорологическом спутнике Suomi-NPP. Данные имеют пространственное разрешение 50 км, генерируются один раз в день. Стоит отметить, что трудно проводить наземные наблюдения за распространением дыма от лесных пожаров, который распространяется на большие расстояния. Однако данные прибора OMPS позволяют нам строить тематические карты аэрозольного индекса на каждый день. А пространственное разрешение устройства позволяет отслеживать динамику распространения дымовых шлейфов от пожаров в глобальном и региональном масштабе.

Дымы якутских пожаров, согласно данным ДЗЗ по индексу UVAI, достигли г. Красноярска 7 августа 2021 г. Динамика процесса в г. Красноярске по этому индексу представлена на рисунке 13, а сами значения индекса приведено на рисунке 14.

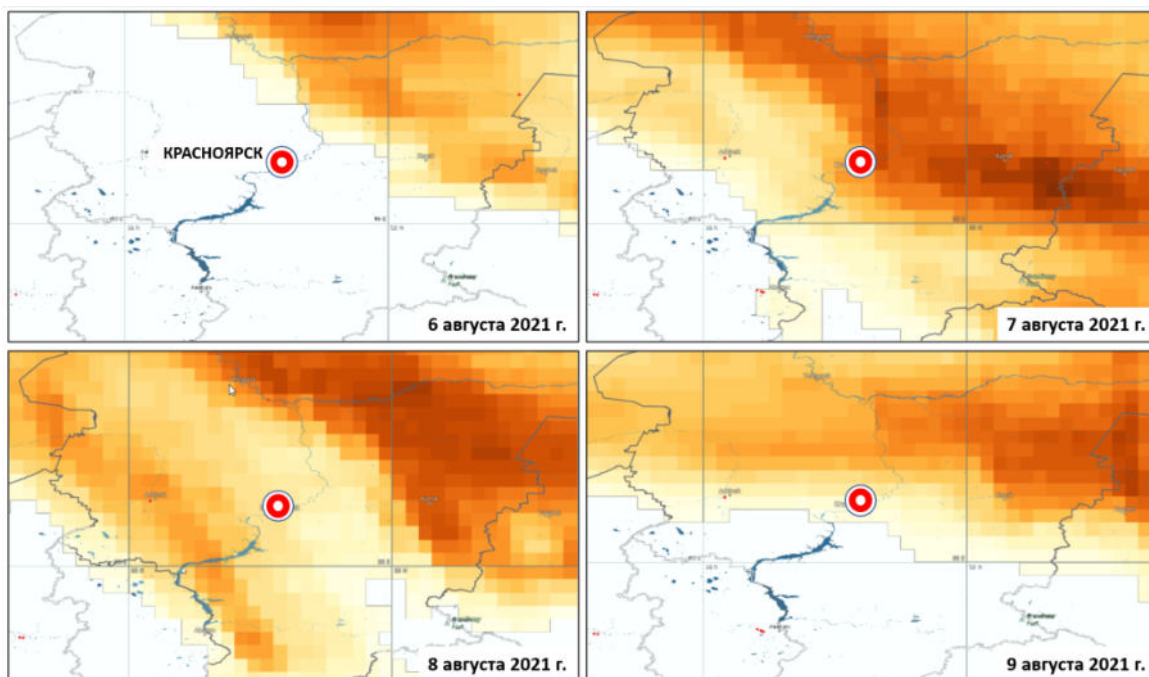


Рисунок 13 – Динамика индекса UVAI за 6-9 августа 2021 г.

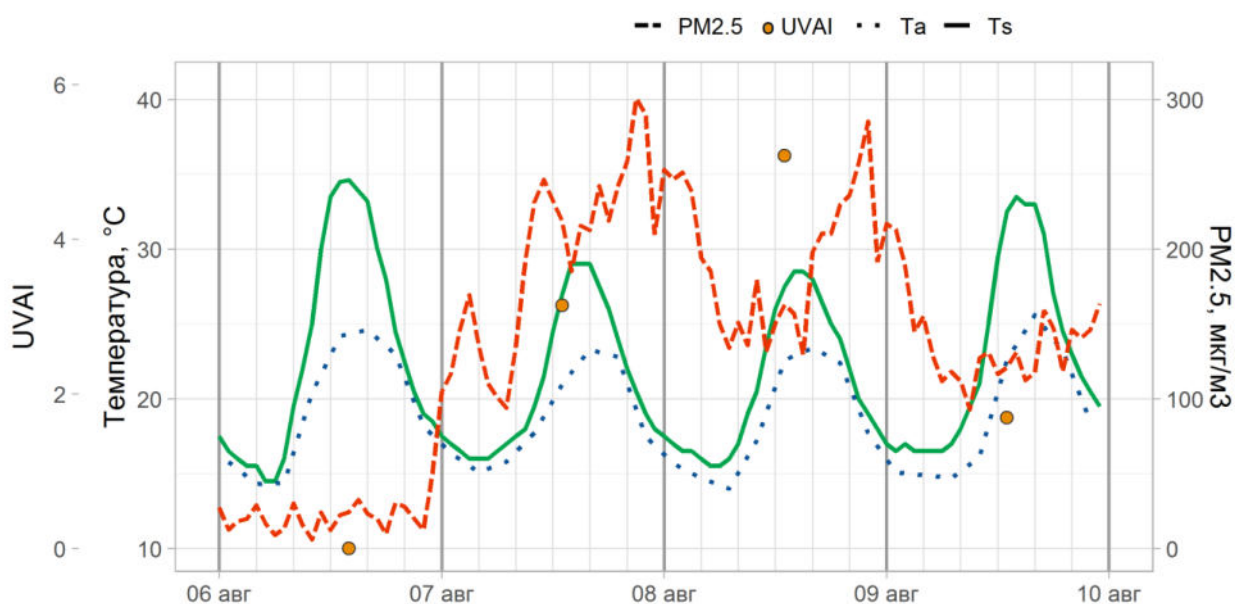


Рисунок 14 – Температура деятельного слоя почвы T_s (на глубине 0.5 см), температура воздуха T_a , концентрация $PM_{2.5}$ (на высоте 2 м) и значение индекса UVAI в д. Монино.

На рисунке 14 представлено поведение температуры деятельного слоя почвы, температуры воздуха и концентрации частиц $PM_{2.5}$ (пост № 1, Рис. 12) в приземном слое атмосферы в д. Монино с 6 по 9 августа 2021 г., а также значение индекса UVAI. Фоновые и максимальные значения концентрации $PM_{2.5}$ составляли соответственно 30 и 300 мкг/м³. В отсутствии дымов 6 августа значение индекса UVAI меньше единицы, что соответствует

оптически тонкой атмосфере. Повышение концентрации частиц $PM_{2.5}$ от дымов пожаров увеличивает оптическую толщину атмосферы, соответственно, уменьшает поток падающей солнечной радиации. Это приводит к уменьшению температуры деятельного слоя почвы. Теплообмен между верхним деятельным слоем почвы и атмосферой осуществляется за счёт турбулентного процесса, и изменения температуры в нижнем приземном слое атмосферы в значительной степени определяются изменениями температур земной поверхности.

На рисунке 15 представлен суточный ход температуры деятельного слоя почвы (T_s) и температуры воздуха (T_a) 6 августа без дымов и 7 августа с дымами пожаров.

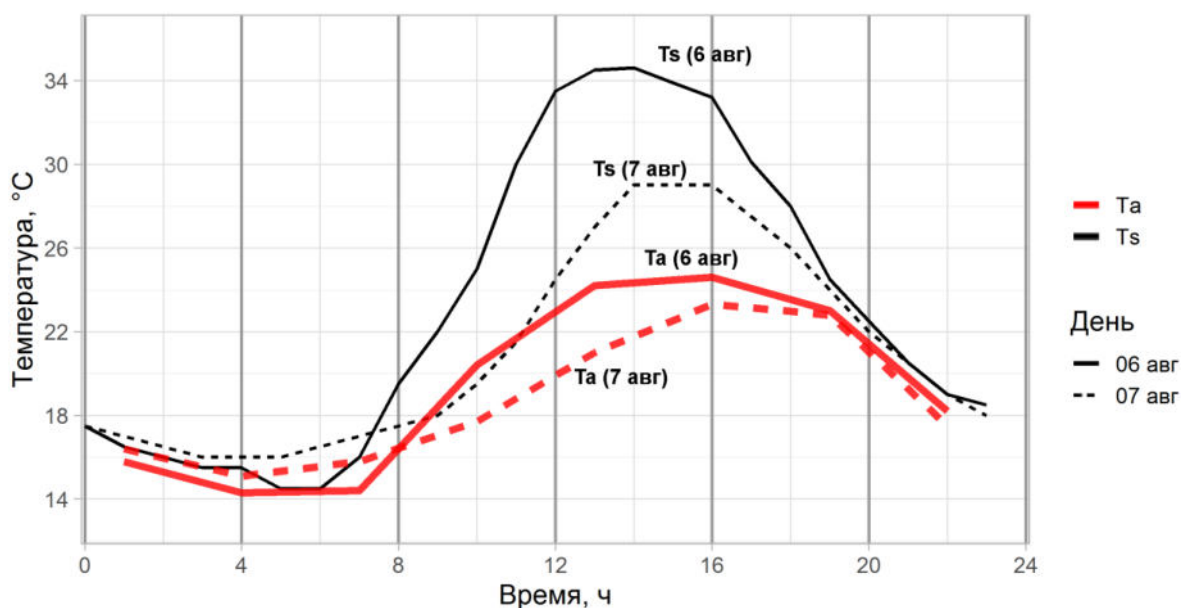


Рисунок 15 – Суточный ход температуры почвы и атмосферы 6, 7 августа 2021 г. В окрестностях Красноярска (д. Манино).

В начале суток 6 августа идет охлаждение почвы, обусловленное тепловым ИК-излучением и температура почвы достигает минимума. Положение минимума обусловлено равенством прихода и ухода энергии в деятельном слое почвы. В последующем за счет увеличения поглощаемого солнечного излучения температура почвы достигает максимума в полдень. После 13:00 интенсивность солнечного излучения падает, температура почвы уменьшается и после заката вновь определяющей является ИК-излучение.

Результаты показали, что при больших концентрациях $PM_{2.5}$ температура почвы и атмосферы в дневное время понижаются. Температура атмосферы в обоих случаях «следит» за ходом температуры почвы за счет турбулентного теплообмена. Изменение температуры почвы, вызванное дымами, гораздо сильнее, чем изменение температуры атмосферы. Снижение максимальной дневной температуры T_s составляет 5,6 °C, а T_a – 1,9 °C.

Согласно современным модельным представлениям [9], происходящие климатические изменения могут привести к удвоению числа пожаров в бореальных лесах к концу нынешнего века, которые будут создавать особое состояние атмосферы и сезонной погоды на огромных площадях и расстояниях в несколько тысяч километров. Поэтому влияние дымов от пожаров будет увеличиваться и изменение температурных режимов окружающей природной среды будет проявляться сильнее.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Crutzen P., Birks J. Twilight at noon: The atmosphere after a nuclear war // *Ambio*. 1982. Т. 11, № 2–3. С. 114–125.
2. Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C. Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions // *Science*. 1983. Т. 222, № 4630. С. 1283–1292.
3. Seitz R. Siberian fire as “nuclear winter” guide // *Nature*. 1986. Т. 323, № 6084. С. 116–117.
4. Вельтищев Н.Н., Гинзбург А.С., Голицын Г.С. Климатические эффекты массовых пожаров // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1988. Т. 24, № 3. С. 296–305.
5. Ackerman A.S., Toon O.B., Stevens D.E., Heysmsfield A.J., Ramanathan V., Welton E.J. Reduction of tropical cloudiness by soot // *Science*. 2000. Т. 288, № 5468. С. 1042–1047.
6. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов, И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 45–54.
7. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19, № 7. С. 565–575.
8. Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nat. Geosci.* 2008. Т. 1, № 4. С. 221–227.
9. Yefremov D.F., Shvidenko A.Z. Long-term environmental impact of catastrophic forest fires in Russia’s Far East and their contribution to global processes // *Int. For. fire news*. 2004. Т. 32. С. 43–49.

Основные публикации по разделу:

- Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске в августе 2021 г. // *Оптика атмосферы и океана*, 2023, т. 36, № 6, с. 487-493. DOI: 10.15372/AOO20230609.

1.5. Гидротермический режим р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Река Енисей занимает по водостоку первое место в России (около 600 км³/год) и шестое место в мире. Территория Красноярского края в основном расположена в бассейне этой реки, что играет важную роль для экономики региона. В 1960-е годы на Енисее была построена Красноярская ГЭС и город Красноярск оказался в нижнем бьефе. Зарегулирование реки привело к нарушению естественного гидротермического и гидрологического режимов, которые в свою очередь вызвали изменение гидрофизических, гидрологических, гидробиологических, гидрохимических процессов и рекреационных возможностей [1]. Определяющим фактором является изменение температуры воды, которая влияет на многие экономические и экологические аспекты [2, 3].

Контроль температуры воды в реке Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС и далее по течению осуществляется на гидропостах, расстояние между которыми достигает нескольких десятков, а иногда и сотен километров. Это является явно недостаточным при современном освоении минерально-сырьевой базы и арктических зон Красноярского края. Поэтому необходимо увеличение возможностей пространственно-временного контроля температуры воды. В данной работе предлагается для этого использование методов физико-математического моделирования гидротермических процессов и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе спутников Landsat 8.

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.

Объектом исследования является температурный режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (Рис. 16). Определение температуры воды выполняется в следующих пунктах: 1 – г. Дивногорск (2 км от плотины); 2 – г. Красноярск (40 км); 3 – с. Есаулово (77 км); 4 – с. Атаманово (124 км). В пунктах 1, 2, 4 находятся гидропосты, измеряющие температуру воды в 8:00 и 20:00.

Для физико-математического моделирования было использовано уравнение теплопроводности, метод решения которого был предложен в работе [4]. 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.

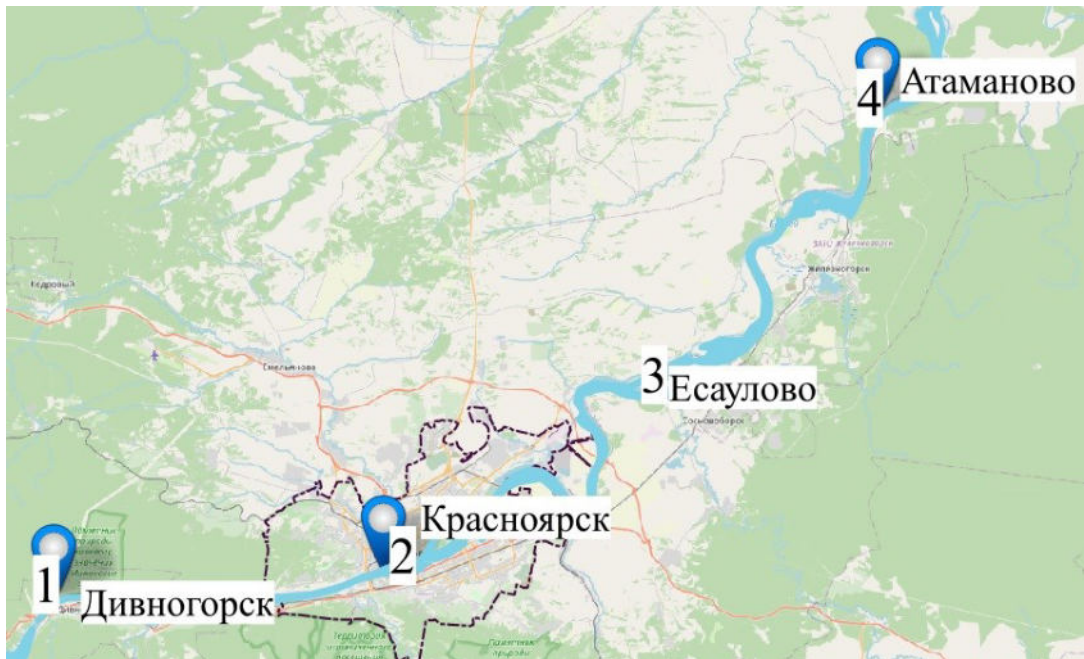


Рисунок. 16 – Контрольных пункты в нижнем бьефе Красноярской ГЭС.

Температура воды измеряется в 8:00 и 20:00 на гидропостах 1, 2, 4. Для 2-й, 3-й и 4-й контрольных точек выполнено математическое моделирование гидротермического режима. Начальные данные для расчетов в первой точке определяются эксплуатацией ГЭС.

Морфометрические данные необходимые для решения уравнения (поперечное сечение (S) и ширина (B) реки) в пунктах контроля 1-4 были получены по детальным спутниковым данным (спутник QuickBird с разрешением 0.6 м) и цифровой 3d-модели рельефа дна (батиметрии), сформированной на основе карты-лоции реки Енисей.

Измерение температуры воды в ИК-диапазоне выполнялось на основе данных со спутника Landsat 8 в 11:52, 3 июля 2016 г., набор данных Collection 2 Level 2. Отличительной особенностью этой коллекции данных, доступной с 2021 года, являются основанные на данных радиометра ASTER новые алгоритмы атмосферной коррекции, вычисления температуры поверхности. По сравнению с измерениями на гидропостах метод ДЗЗ в ИК-диапазоне представляет привлекательную альтернативу для количественной оценки пространственных характеристик температуры воды в различных пространственных масштабах [5]. Например, спутниковые изображения среднего пространственного разрешения, такие как тепловое инфракрасное изображение Landsat, использовались для получения качественных тепловых продольных и временных моделей рек [6].

Результаты расчетов по физико-математической модели, данные натурных наблюдений на гидропостах и определение температуры по данным ДЗЗ представлены ниже на рисунках 17, 18. В целом, наблюдается хорошее соответствие между всеми этими данными.

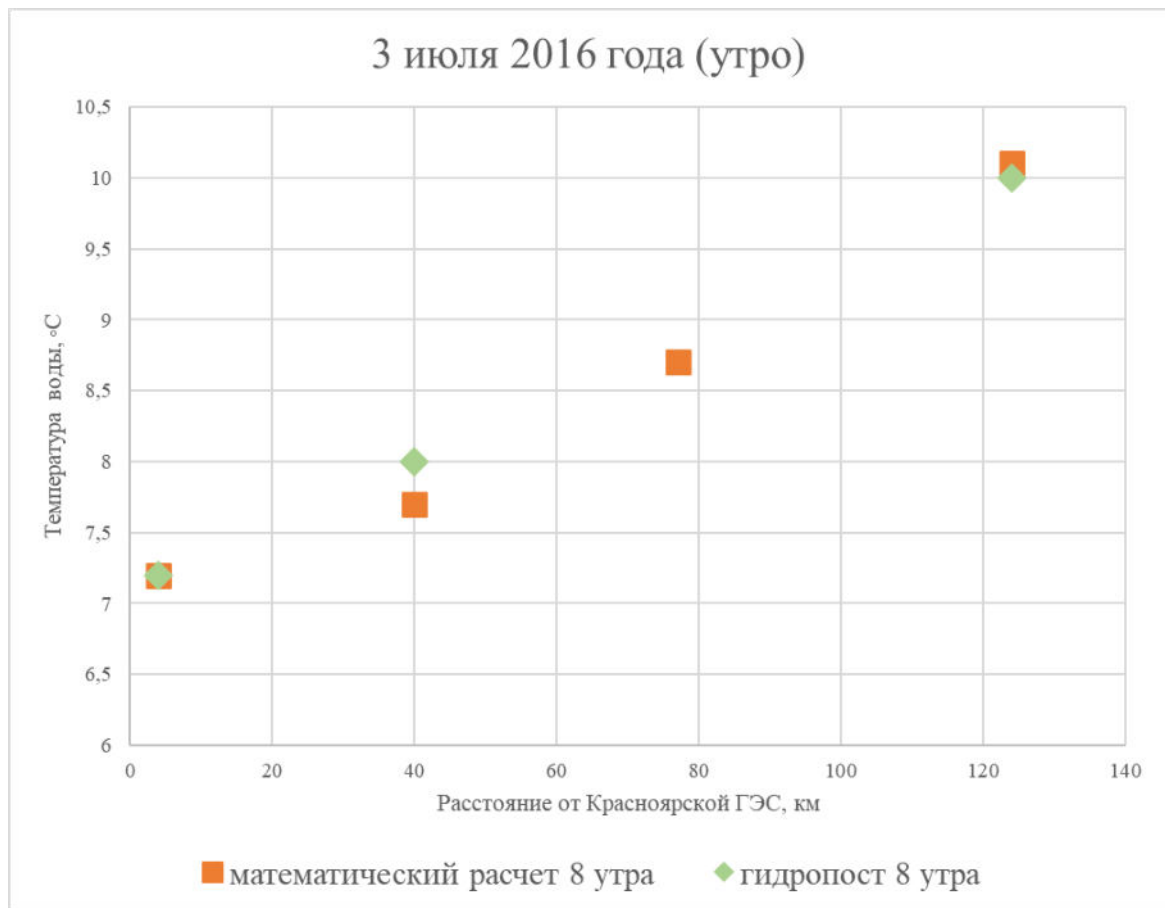


Рисунок 17 – Температура воды, определяемая по модели (математический расчет) и с помощью измерений на гидропостах.

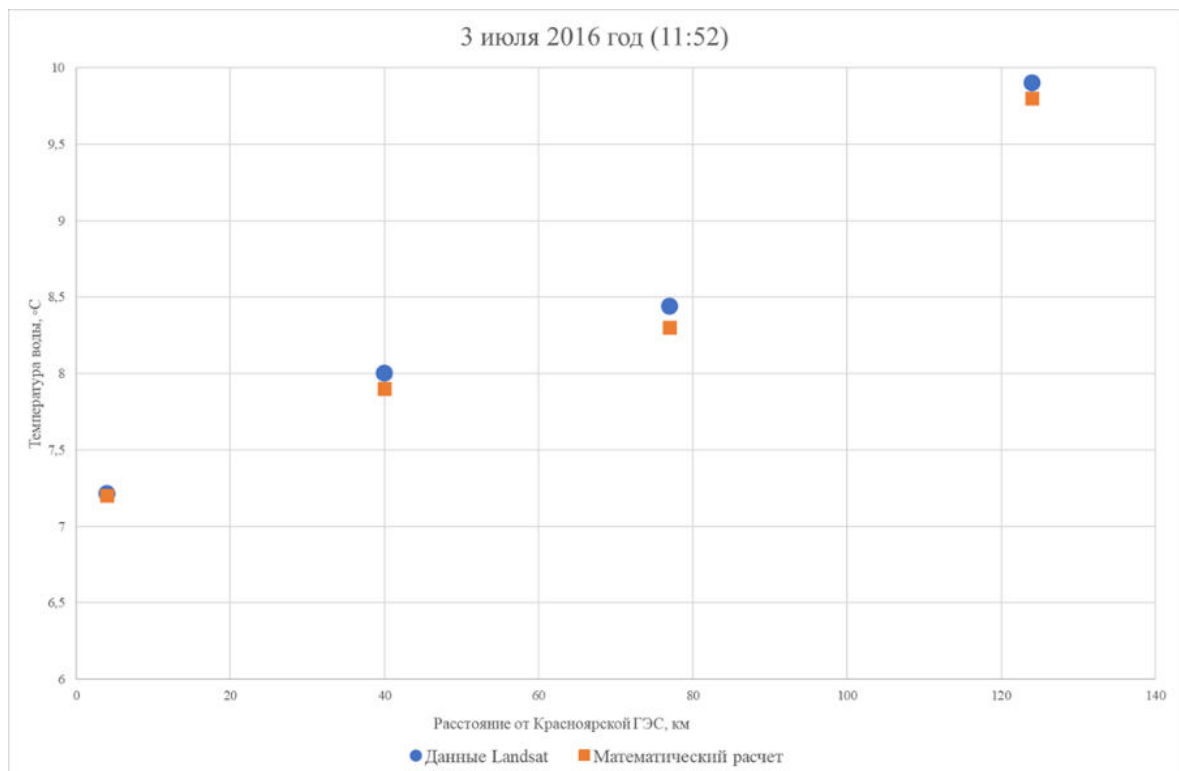


Рисунок 18 – Температура воды, определяемая численным экспериментом и методом ДЗЗ.

Таким образом, данные, полученные в результате численного моделирования близки к результатам, полученным по ДЗЗ и показаниям гидропостов. Внедрение этих методов пространственно-временного определения температуры воды в реке Енисей является перспективным. Стоит обратить внимание на следующие ограничения: 1) Спутниковые данные ограничены частотой пролета спутника и безоблачными погодными условиями, имеют невысокое пространственное разрешение (тепловой диапазон – 100 метров); 2) Гидропосты ограничены удаленностью друг от друга и частотой измерений.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Шапарев Н.Я., Андрианова А.В. Показатели устойчивого водопользования р. Енисей // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 47-56.
2. Caissie D. The thermal regime of rivers: A review. *Freshw. Biol.* 2006, 51, 1389–1406.
3. Yang D.Q., Liu B.Z., Ye B.S. Stream temperature changes over Lena River basin in Siberia. *Geophys. Res. Lett.* 2005, 32, L05401, doi:10.1029/2004GL021568.
4. Шапарев Н.Я., Шокин Ю.И. Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23. № 6. С. 107-114.
5. [9] Handcock, R.N.; Gillespie, A.R.; Cherkauer, K.A.; Kay, J.E.; Burges, S.J.; Kampf, S.K. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sens. Environ.* 2006, 100, 427–440.
6. Wawrzyniak V., Piégay H., Poirel A. Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using landsat ETM+ thermal infrared images. *Aquat. Sci.* 2012, 74, 405–414.

Основные публикации по разделу:

- Матушко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 279-281.
- 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. Красноярск, 2022. С. 265-268.

1.6. Анализ пространственного распределения загрязнения атмосферы Красноярска по спутниковым данным

С увеличением численности населения города, как правило, возрастает аэрозольная нагрузка на его атмосферу. Большое количество автотранспорта, промышленных предприятий негативно влияют на качество окружающего воздуха [1]. В работе [2] авторы после 20 лет эпидемиологических исследований обнаружили корреляцию между уровнем загрязнения мелкодисперсными частицами и количеством респираторных заболеваний. Авторами работы [3] было установлено, что повышенные концентрации PM_{2.5} (твердые частицы размером менее 2.5 мкм) в странах европейского союза привели к сокращению средней продолжительности жизни на 8,6 месяцев. Так же в ряде работ [4, 5] сообщалось, что повышение концентрации PM_{2.5} на 10 мкг/м³ привело к увеличению уровня респираторных заболеваний на 2,07%. Все эти исследования говорят о необходимости мониторинга качества окружающего воздуха на наличие концентраций PM_{2.5}.

Объектом исследования в настоящей работе – г. Красноярск. Город имеет население около 1,2 млн. человек и активно развивается, расположен вдоль обоих берегов реки Енисей на протяжении 20-25 км, а его площадь – около 350 км². Красноярск с юга и запада окружают леса и холмистая местность, с северной и восточной части города рельеф в основном равнинный. Эти особенности рельефа, формирующие экологическую среду города, определяют циркуляцию воздушных масс и низкую рассеивающую способность атмосферы, что приводит к накоплению загрязнителей в городе и пригородной зоне.

Для получения информации о загрязнении атмосферы методом ДЗЗ в работе использовалась аэрозольная оптическая толщина (AOD) – параметр, который чаще всего используется в качестве основы для оценки PM_{2.5} [6]. Этот параметр пропорционален количеству частиц в воздухе и, зависит от их массовой концентрации. Данный параметр предоставляет продукт MODIS MCD19A2. Он имеет пространственное разрешение в 1 км² и содержит в себе ежедневные значения аэрозольной оптической толщины.

Принцип измерения значений AOD основан на регистрации отражённых сигналов от поверхности Земли в различных спектральных диапазонах. Существенным недостатком данного принципа является невозможность получить данные над поверхностью с высоким коэффициентом отражения (вода, снег, лед, облачность). Ввиду данного ограничения в работе были использованы данные AOD за период, когда отсутствовал снежный период, с апреля по октябрь начиная с 2015 года.

Данные продукта MCD19A2 предоставляются для всей планеты, однако с целью минимизации веса конечного файла вся территория разбита на гранулы размером 1200 км² (всего 476 ячеек). Территория Красноярска находится в ячейке с номером h23v03.

Для пересчёта данных AOD в PM_{2.5} дополнительно использовались метеорологические данные из набора модели Global Forecast System (GFS). Пространственное разрешение модели составляет 0,25 на 0,25 градуса, что для Красноярска приблизительно соответствует 625 км². На рисунке 19 показана территория Красноярска с областью ячеек модели GFS, обозначенных красным цветом. В данной работе использовались данные о высоте пограничного слоя атмосферы (PBLH) и относительной влажности воздуха на приземном уровне (RH) по данным модели GFS на всю площадь ячейки данных h23v03. Это позволяет охватить большую площадь, что способствует более обширному анализу влияние города на окрестные территории, а также позволить оценить влияние природных факторов, таких как пожары, на экологическую обстановку в городе.

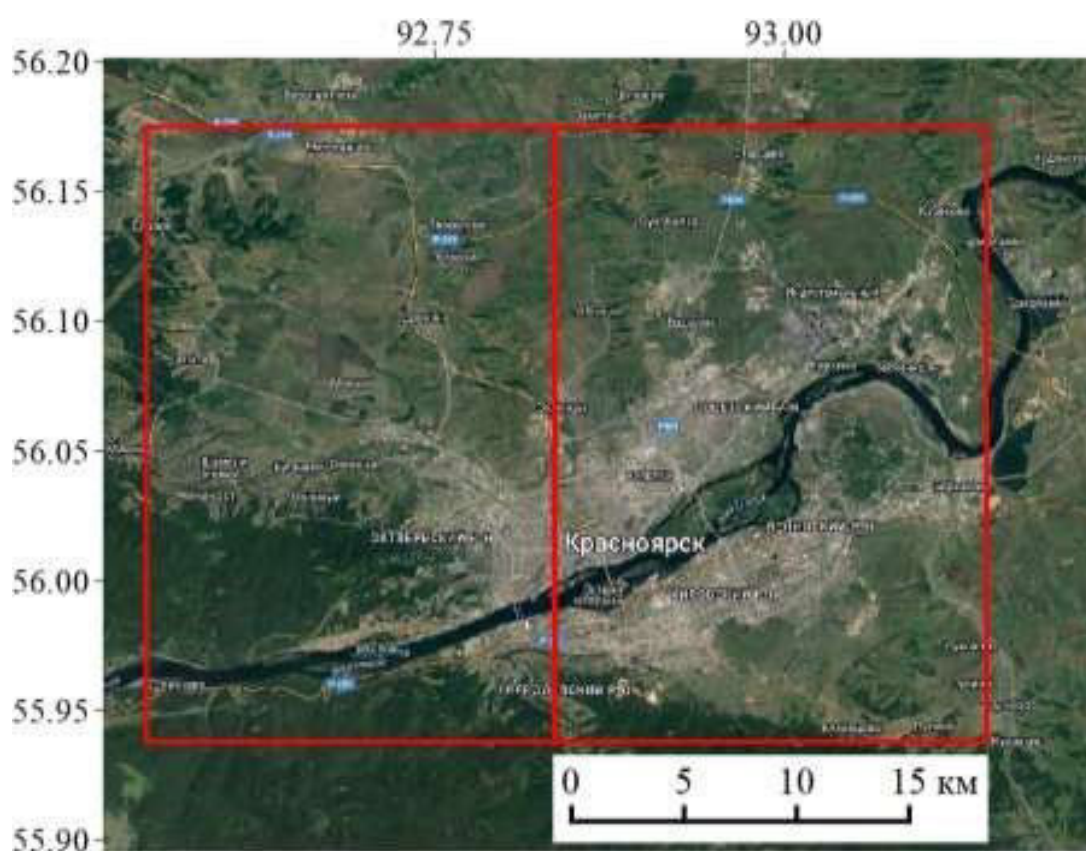


Рисунок 19 – Район исследования. Красным выделены границы двух используемых ячеек модели GFS.

Верификация спутниковых данных. В работе [7] показано, что рассчитанные данные по концентрациям PM_{calc} с использованием спутниковой информации имеют высокую корреляцию с данными наземного мониторинга. Концентрация PM_{2.5} вычислялась по формуле

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

где AOD – значения аэрозольной оптической толщины, полученной по данным продукта MCD19A2, $PBLH$ – величина пограничного слоя атмосферы, RH – относительная влажность воздуха, RHo – среднее значение влажности воздуха, для исследуемой области, коэффициенты K и γ отвечают за свойства аэрозоля, характерных для данной территории.

Пространственное распределение $PM_{2.5}$. Для расчёта данных о пространственном распределении концентраций $PM_{2.5}$ над Красноярском использовались данные спутникового мониторинга совместно со значениями, взятыми из модели GFS. Расчёт значений концентраций $PM_{2.5}$ за одни сутки по формуле (1) показан на рисунке 20.

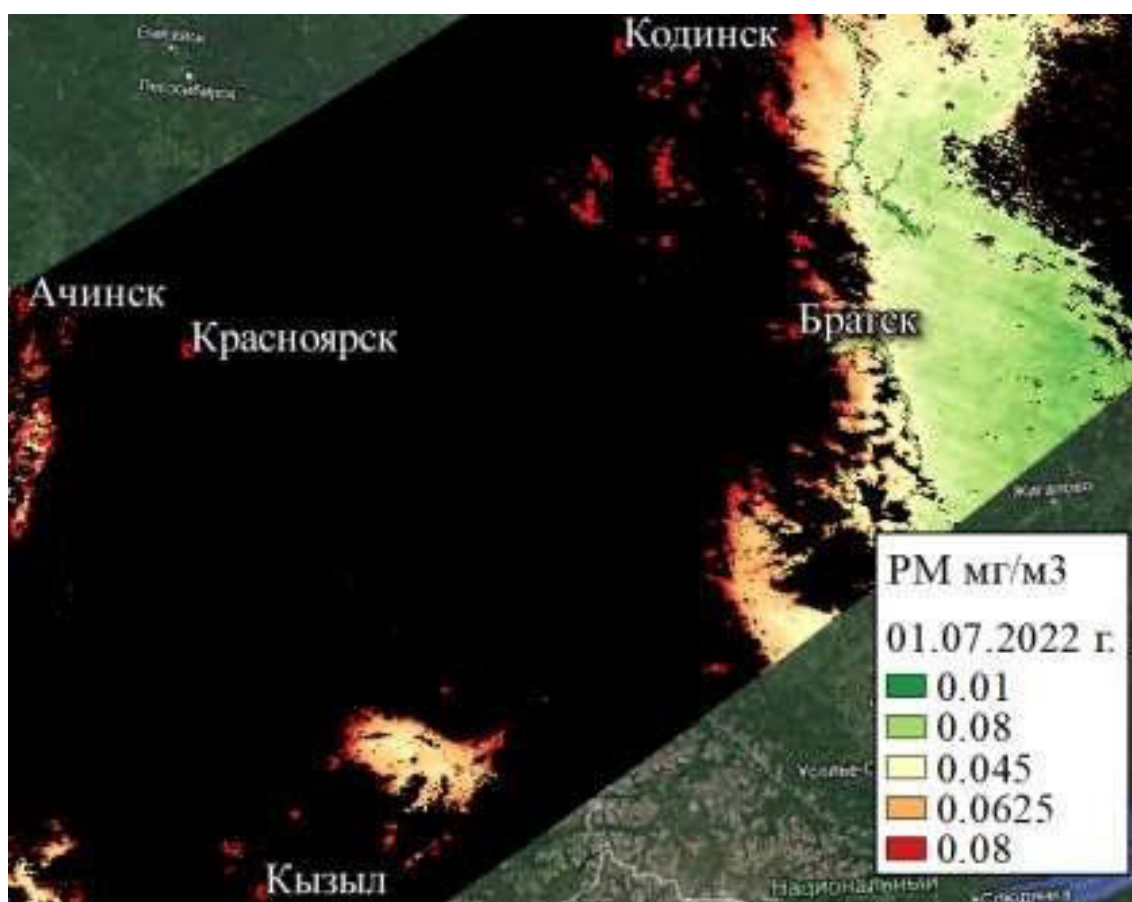


Рисунок 20 – Концентрация $PM_{2.5}$ для гранулы h23v03 за 1 июля 2022 г.

Из-за облачности, а также дымовых шлейфов от лесных пожаров, большая часть данных отсутствует. Так же по краям областей с низким и умеренным загрязнением, которым соответствует зелёный и жёлтый цвет, наблюдаются значения с повышенной концентрацией $PM_{2.5}$. Для устранения большого количества пропущенных значений ежедневные данные усреднялись с интервалом в 1 месяц. В результате были получены среднемесячные значения концентрации $PM_{2.5}$. Повышенные показатели концентрации $PM_{2.5}$ по краям областей

с низким и умеренным загрязнением связано с тем, что продукт MCD19A2 над поверхностями с высоким коэффициентом отражательной способности может некорректно рассчитывать значения AOD, увеличивая их [8].

Усреднение данных за один месяц устраняет большое количество пропущенных данных. Но остается проблема с ошибочными, повышенными значениями, которая при усреднении данных не пропадает. Для их устранения был использован метод с применением стандартного отклонения. Данный подход заключается в определении максимального и минимального значения, за пределами которых значения считаются некорректными. На рисунке 21 показана гистограмма распределения значений $PM_{2.5}$ за июль 2022 г. Среднее значение равняется $M=0,0194$, среднеквадратичное отклонение $\sigma =0,006$. Синей рамкой ограничены используемые значения, остальные значения удаляются.

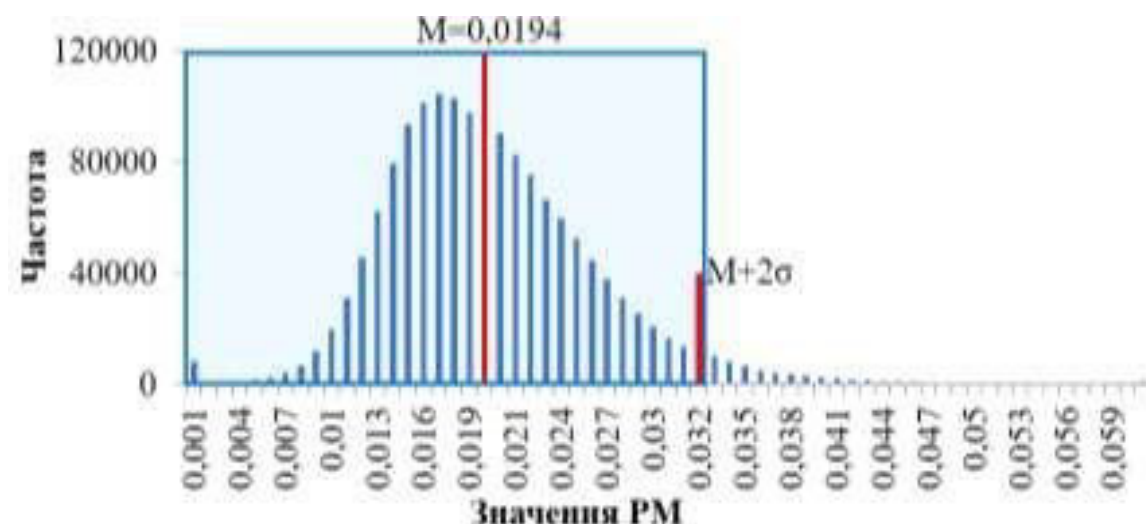


Рисунок 21 – Гистограмма распределения значений $PM_{2.5}$.

После удаления значений, превосходящих величину $M+2\sigma$ была проведена интерполяция. В результате описанных выше преобразований получается распределение среднемесячных значений $PM_{2.5}$ на территорию всей ячейки h23v03, рисунок 22.

Данные преобразования были выполнены для каждого летнего месяца начиная с 2015 года, рассчитывались среднее значение, среднеквадратичное отклонение и проводилась интерполяция.

На рисунке 23а видно, как повышенные концентрации внутри территории города переносятся на восток от города, влияя на экологическую обстановку таких крупных населённых пунктов как Березовка и Сосновоборск. На рисунке 23б отображена обратная ситуация. Дым от крупных лесных пожаров на севере Красноярского края в августе 2020 года переносится воздушным потоком на территории городов, располагаемых южнее. Под дымовое загрязнение попали такие крупные города как Красноярск, Канск и Братск.

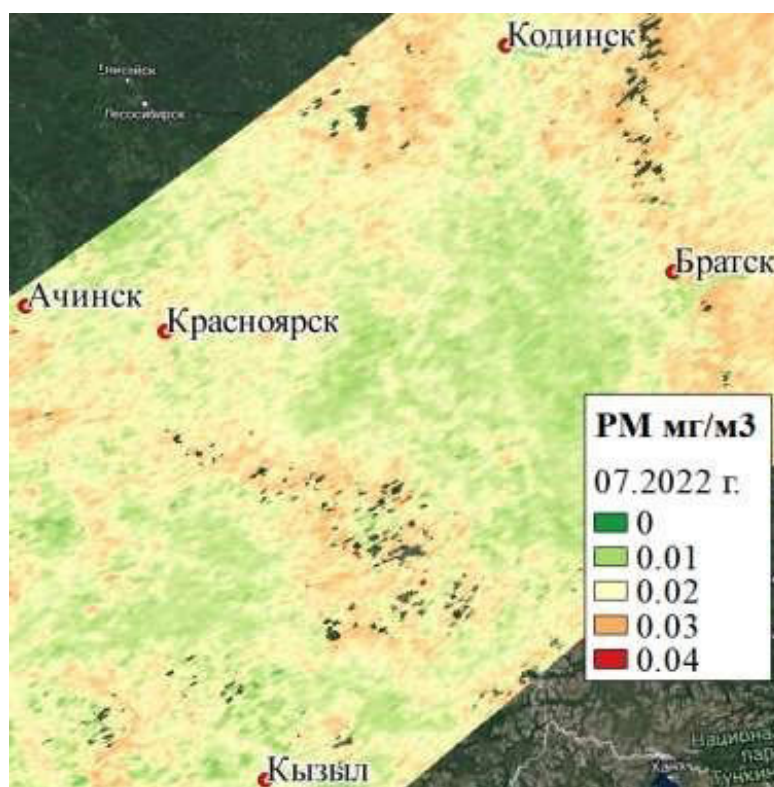


Рисунок 22 – Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за июль 2022 г.

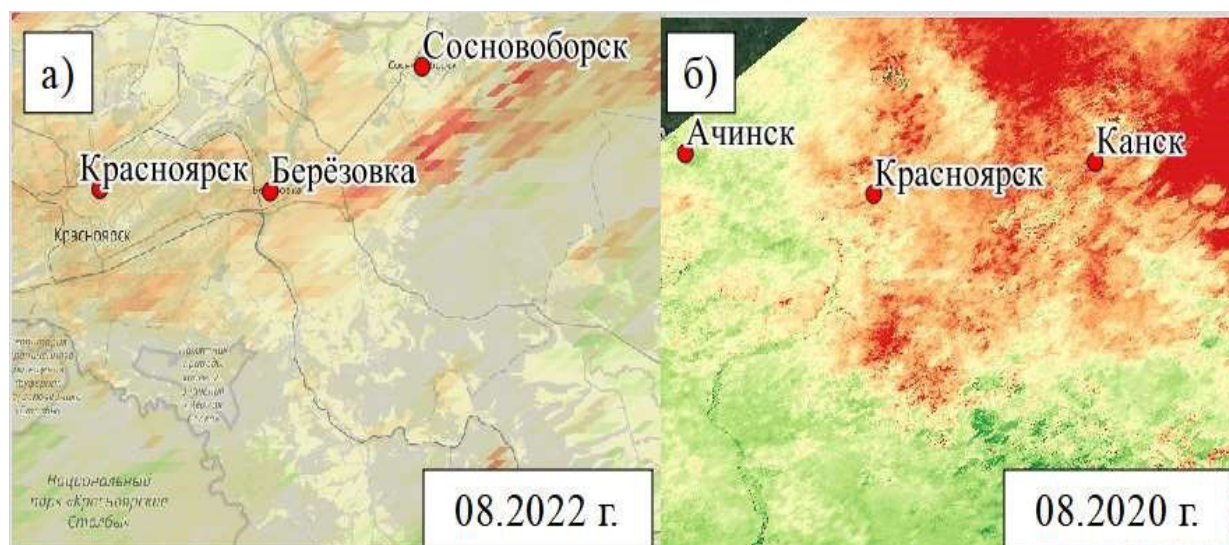


Рисунок 23 – Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за разные периоды времени.

С использованием данных о среднемесячных концентрациях $PM_{2.5}$ появляется возможность увидеть пространственное распределение $PM_{2.5}$, оценить наиболее загрязненные и наиболее чистые районы города, с точки зрения аэрозольной нагрузки. Полученные данные позволяют оценить влияние городского аэрозольного загрязнения на окрестные территории.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Гигиена города // Казанский медицинский журнал. М., Медицина. 1987. Т. 26, №2. С. 148-149.
2. Brunekreef B., Holgate S.T. Air pollution and health // The Lancet. 2002. Т. 360. №. 9341. С. 1233-1242.
3. Orru, H. et al. Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences // Air quality, atmosphere & health. 2011. Т. 4. №. 3. С. 247-258.
4. Zanobetti A. et al. Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions // Environmental Health. 2009. Т. 8. №. 1. С. 1-12.
5. Dominici F. et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases // Jama. 2006. Т. 295. №. 10. С. 1127-1134.
6. Koelemeijer R.B.A., Homan C.D., Matthijsen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe // Atmospheric Environment. 2006. Т. 40. №. 27. С. 5304-5315.
7. Lin C. et al. Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // Atmospheric Environment. 2020. Т. 227. 117410.
8. Lyapustin A., Wang Y. MODIS Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) data user's guide // NASA: Greenbelt, MD, USA. 2018. Т. 6. №. June. С. 1-19.

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. Оценка качества воздуха Красноярска по среднемесячным значениям PM_{2.5} // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 268-272. DOI:10.25743/sdm.2023.95.53.045.
- Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э. Построение пространственного распределения PM_{2.5} над центральными и южными районами Красноярского края // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы X Международной научной конференции. Красноярск, 2023. С. 206-209.

1.7. Мониторинговые исследования биологических ресурсов в водных объектах. Оценка экологического статуса водоемов с разной степенью антропогенной нагрузки методами биоиндикации

Усиление антропогенного влияния на водные объекты на протяжении последних пятидесяти лет привело к необходимости усиленного мониторинга качества поверхностных вод, развитию методов оценки качества, поисков объективных критериев, комплексных показателей качества вод. В системе Росгидромета контроль качества водной среды осуществляется в основном посредством химических и физико-химических методов, не позволяющих дать полную характеристику вредного воздействия антропогенных факторов на биологические сообщества. Во многих зарубежных странах химический контроль качества воды уступает место биологическому, поскольку приоритет оценки состояния экосистем по биологическим показателям стал очевидным [1, 2].

Для оценки качества воды по донным сообществам рекомендован комплексный подход, включающий анализ нескольких биоиндикационных показателей [3, 4]. Однако отсутствие единой общепринятой системы ранжирования по классам качества вод снижает чувствительность использованных показателей в градиенте загрязнения, что приводит к искажению полученных значений категорий качества воды. Каждый из индексов, выделяя ту или иную особенность биотического сообщества, недоучитывает другие, в результате чего возникает несовпадение в оценке качества экосистем по различным показателям. Поэтому для определения качества воды в разнотипных водных объектах, имеющих участки с различными гидроморфологическими условиями, как вариант решения проблемы возможно применение разнообразных статистических методов, в частности кластеризации данных по совокупности нескольких биоиндикационных показателей.

В отчетный период 2021–2023 гг. был осуществлен ряд полевых гидробиологических исследований (Богучанское водохранилище, р. Ангара) и обобщены собственные материалы биосъемок, проведенных в предыдущие годы (бассейн р. Енисей, р. Чулым). Конечной целью являлась оценка экологического статуса водных объектов методами биоиндикации по структуре донных сообществ с привлечением методов статистической обработки данных и геоинформационной визуализации.

Исследования бассейна р. Енисей

Материалом для анализа послужили пробы зообентоса, собранные в Енисее и его притоках (рр. Абакан, Мана, Кан, Агул, Кунгус) в ходе маршрутных экспедиций, начиная с 2015 года в реке Енисей мониторинг проводили на нескольких участках от истока до дельты включительно.

Для оценки качества воды по донным сообществам использовали комплексный подход, включающий анализ нескольких биоиндикационных показателей, которые традиционно используются в отечественных гидробиологических исследованиях (индексы Шеннона, Балускиной и Гуднайта) или рекомендованы Европейской Рамочной Водной Директивой (*EPT*, *BMWP*, *ASPT*, *FBI*) [3]. Все биоиндикационные показатели по каждому водотоку и каждой станции отбора проб зообентоса были сведены в единую базу данных и соотнесены с официально принятыми в России градациями по пяти классам качества вод согласно Государственному стандарту, при этом каждому классу качества присвоен соответствующий цвет.

Таким образом выявлено, что в притоках Енисея качество вод соответствует II классу (вода “слабо загрязненная”), однако реки Абакан и Агул имеют тенденцию перехода к III классу качества (вода “загрязненная”). Непосредственно в Енисее качество воды существенно хуже – IV и V класса (грязная и экстремально грязная), за исключением самого верховья реки, где выявлен III класс качества (вода загрязненная).

На основе сформированной базы данных и анализа полученных результатов была построена многослойная экологическая карта Енисея и его притоков, в которой каждый биоиндикационный показатель вынесен на отдельный слой. Карта демонстрирует оценку экологического состояния водотоков в бассейне Енисея. Каждая исследованная станция в реках на карте отмечена цветом соответствующего класса качества воды. Результаты экологической оценки представлены в геоинформационной системе на платформе “Енисейская Арктика” (<http://nilgis.sibsau.ru/client/catalog/2/15>) (Рис. 24).

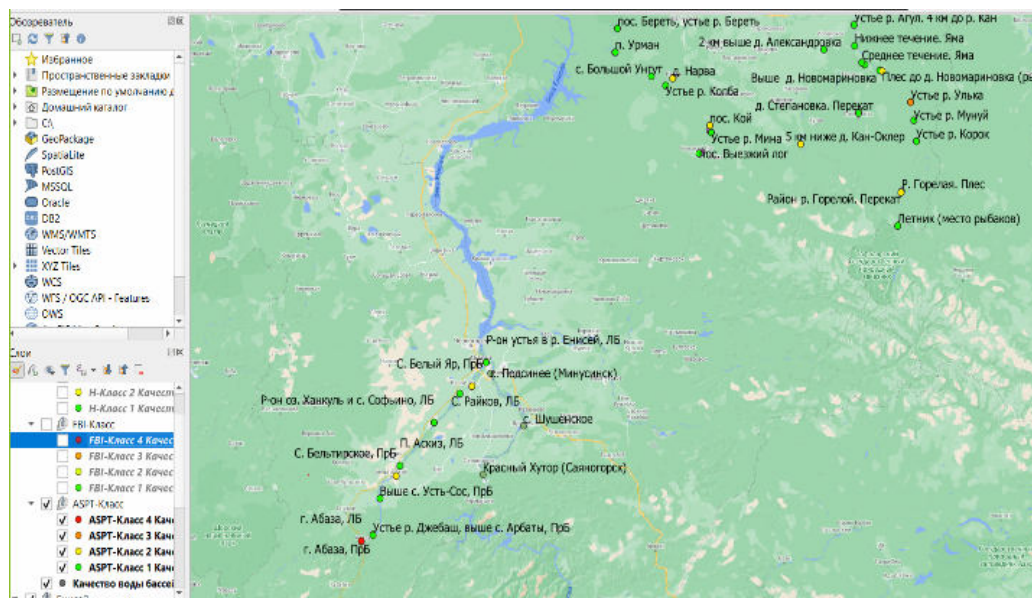


Рисунок 24 – Многослойная экологическая карта качества воды гидросети в бассейне реки Енисей.

Материалом для исследования послужили пробы зообентоса, собранные в р. Чулым весной и осенью 2016 г. на участке протяженностью 800 км от истока реки в пределах Республики Хакасия и Красноярского края до границы с Томской областью. Для оценки качества воды по донным сообществам использовали комплексный подход, включающий анализ 11 биоиндикационных показателей. Статистический анализ данных проводили с использованием программы “R”. Для построения интегрального показателя и разбиения станций на группы по качеству воды применяли метод k-средних (k-means), при котором минимизируется сумма квадратов расстояний от точек кластеров до центров этих кластеров, и метод главных компонент, предназначенный для выявления скрытых факторов, влияющих на данные. Удовлетворительные результаты кластеризации получаются при разбиении всех станций на четыре кластера (Рис. 25). В результате получается, что чем правее центр кластера расположен на рисунке, тем лучше на соответствующих станциях качество воды. Таким образом наилучшее качество воды (“условно чистая”) выявлено в среднем течении, где река имеет полугорный характер, и при переходе от полугорного к равнинному типу. Ухудшение качества воды (“грязная”) зафиксировано в условиях равнинного течения в низовье исследованного участка.

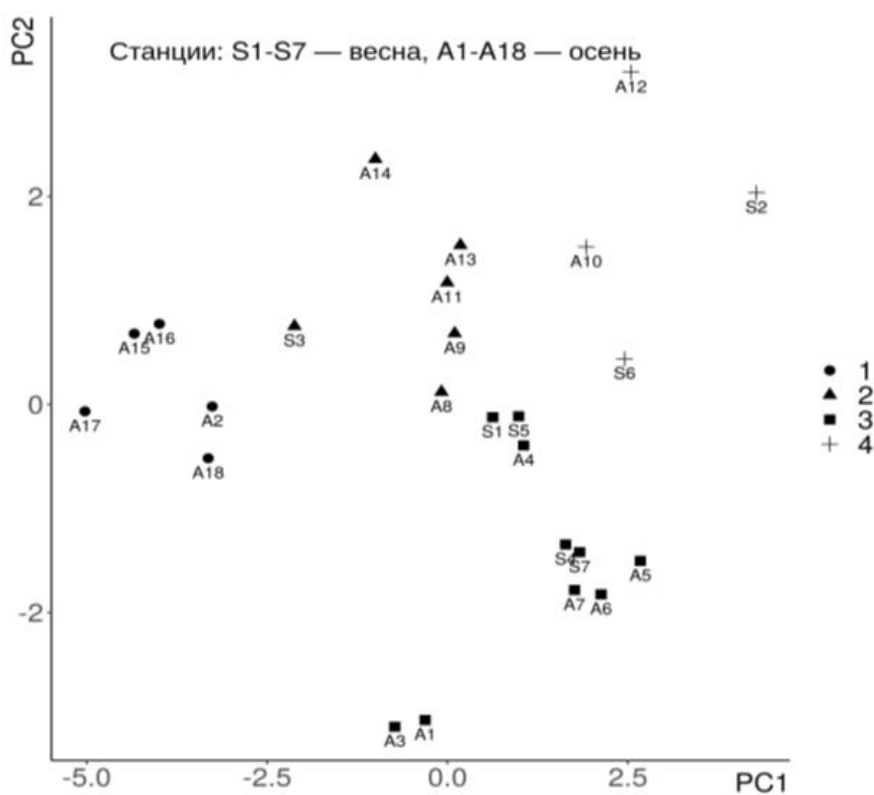


Рисунок 25 – Распределение исследованных станций в р. Чулым по качеству воды методом k-средних: 1 – грязная, 2 – загрязненная, 3 – слабозагрязненная, 4 – условно чистая.

Одним из естественных факторов окружающей среды, влияющим на оценку экологического состояния водотока, является тип донных отложений [5, 6]. В р. Чулым наблюдалось снижение качества воды при смене биотопов Песчано-галечные–Макрофиты–Ил–Песок. При этом для некоторых биоиндикационных метрик типом грунта объяснялось до 60 % вариации данных согласно дисперсионному анализу.

Исследования Богучанского водохранилища

Отбор проб зообентоса осуществляли в вегетационный сезон в течении пяти лет (2014-2015, 2017-2019 гг.) 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.

Количественное преимущество в водоеме принадлежало хирономидам как на мелководье, так и в глубинных зонах (Рис. 26). 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 – мелкоразмерные виды, но в большом количестве.

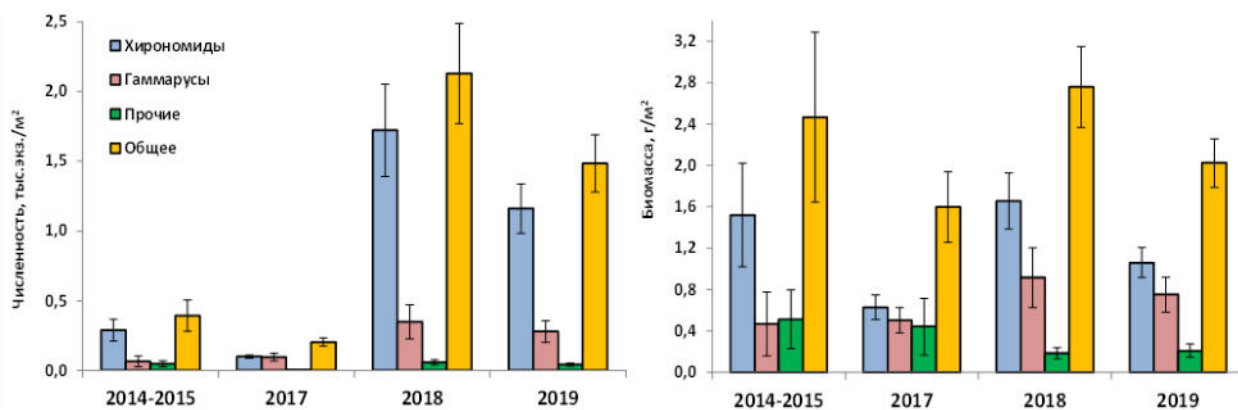


Рисунок 26 – Зообентос Богучанского водохранилища.

Оценку экологического состояния Богучанского водохранилища проводили дифференцировано 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±0,02) литоральная зона водохранилища относится к III классу качества вод, β-мезоса-пробная зона.

Индекс видового разнообразия Шеннона использовался для оценки качества воды в обеих зонах. В профундали средние значения индекса Шеннона (табл. 1) соответствуют V классу в 2015 г. и IV классу в 2017 г. В литоральной зоне видовое разнообразие зообентоса существенно выше, 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.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Балущкина Е.В., Голубков С.М. Биоразнообразие сообществ донных животных и качество вод эстуария р. Невы в условиях антропогенного стресса // Труды Зоологического института РАН. 2015. Том 319. № 2. С. 229–243.
2. Banagar G., Riazi B., Rahmani H., Jolodar M.N. Monitoring and assessment of water quality in the Haraz River of Iran, using benthic macroinvertebrates indices // *Biologia*. 2018. V. 73. P. 965–975. <https://doi.org/10.2478/s11756-018-0107-5>
3. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. Экологическое качество пресных вод. 2-е изд., исправленное. Минск: Беларуская навука, 2011. 328 с.
4. Безматерных Д.М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири: аналитический обзор / Гос. публич. науч.-техн. б-ка СО РАН, Ин-т вод. и экол. проблем. Сер. Экология. Новосибирск, 2007. Вып. 85. 87 с.
5. Яныгина Л.В. Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревой // *Изв. АО РГО*. 2017. № 4 (47). С. 93–100.
6. Damanik-Ambarita M.N., Lock K., Boets P., Everaert G. et al. Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices // *Limnologica*. 2016. V. 57. P. 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>

1.8. Анализ взаимосвязей гидробиологических характеристик с абиотическими факторами среды

Представленные в этом разделе результаты работ 2023 года были посвящены изучению состояния гидробиологических сообществ в низовье реки Ангары.

Введение. В настоящее время во всем мире растет интерес к биометрии и увеличивается потребность в биометрическом анализе результатов биологических работ. Анализ взаимоотношений видов в сообществах; выявление факторов окружающей среды, которые влияют на формирование сообществ и жизнеспособность отдельных видов; поиск закономерностей пространственно-временного распределения видов и сообществ – все эти вопросы относятся к фундаментальным задачам экологии [1, 2] и не могут быть решены без привлечения статистического анализа данных [3].

Зообентос (беспозвоночные животные, обитающие на дне водоемов) – один из важнейших элементов водных экосистем. Донные беспозвоночные способствуют естественному самоочищению вод и хорошо отражают происходящие изменения внешней среды, в том числе и антропогенного характера. Кроме того, зообентос – важнейшая составляющая кормовой базы большинства видов сибирских рыб (осетровых, сиговых, хариусовых, карповых и др.).

Реконструкция гидростроительством и интенсивное комплексное использование крупной водной артерии Сибири – реки Ангара, привели к необходимости планирования мероприятий по рациональной эксплуатации и сохранению экологического равновесия реки. Для достижения этого необходимо определять реакцию основных звеньев пищевой цепи гидробионтов на влияние разнообразных факторов окружающей среды. Факторы, влияющие на характер распределения гидробионтов в речной системе, еще недостаточно изучены и, по-видимому, могут существенно отличаться в различных речных бассейнах. Однако общепризнано, что на распределение зообентоса в водотоке оказывают влияние такие абиотические факторы как скорость течения, температура воды, глубина водотока, размер частиц субстрата.

Начало активного изучения Ангары в прошлом веке было обусловлено именно перспективами строительства на ней крупных гидроэлектростанций. На основании результатов работ иркутских и красноярских гидробиологов были подготовлены прогнозы состояния разных компонентов экосистемы планируемых ангарских водохранилищ в период их формирования и стабилизации [4, 5]. Однако в настоящее время в гидробиологических исследованиях нижнего участка Ангары наблюдается существенный пробел, так за последние 20 лет донным сообществам посвящена лишь единственная публикация [6]. Цель данного исследования – выявить особенности распределения зообентоса в нижнем течении р. Ангары в зависимости от ряда факторов (глубина, тип субстрата, берега реки).

Методы исследования.

Материалом для исследования послужили пробы зообентоса, отобранные в августе 2022 г. на 11 створах реки на участке 445–9 км выше устья. Пробы отбирали у обоих берегов

на глубине до 1,5 м. Всего собрано и обработано 44 количественных пробы зообентоса. Сбор и камеральную обработку материала проводили согласно общепринятым методическим рекомендациям. Все полученные результаты статистически обработаны с использованием пакета программ Excel и SPSS. В связи с отклонением данных от нормального распределения во всех анализируемых выборках применены непараметрические методы статистики. При сравнении выборок использовали U-критерий Манна-Уитни и критерий Вилкоксона. Нулевую гипотезу о тождественности законов распределения выборок случайных величин отвергали при $p < 0,05$. В табличном материале и на рисунках совокупные данные представлены в виде средних арифметических со стандартной ошибкой.

Результаты исследования.

Бентофауна носила гаммаридно-хирономидный характер (Рис. 27) с преобладанием гаммарид байкальского происхождения. В период исследования выявлено 87 таксонов беспозвоночных, широко распространённых в Палеарктике и Голарктике. Наибольшее видовое разнообразие (37 таксонов) отмечено среди личинок хиروномид подсемейств Orthoclaadiinae и Chironominae. Средняя численность зообентоса на исследованном участке р. Ангары составила $2,9 \pm 0,3$ тыс. экз./м², биомасса – $14,6 \pm 1,6$ г/м². Количественное преимущество (более 60% численности и биомассы) принадлежало амфиподам; хирономиды обеспечили 24 % численности и 10 % биомассы донных сообществ. Низовье реки (створы 10, 11) характеризовалось наименьшим уровнем развития донных беспозвоночных (Рис. 27).

Пробы донной фауны собирали на двух уровнях глубин: до 0,5 м и свыше 0,5 м, что и послужило обоснованием для формирования двух типов статистических выборок. В результате выявлена тенденция увеличения численности и биомассы хирономид, а также общей численности зообентоса на малой глубине (таблица 1). Однако достоверность различий статистически подтверждена (по критерию Вилкоксона для связанных выборок) лишь для биомассы хирономид. В остальных случаях различия недостоверны в связи с недостаточностью собранного материала и малыми объемами выборок.

Русло Ангары выложено преимущественно песчано-галечным и валунным грунтом, но с разной степенью заиливания в прибрежье, что неизбежно вносит особенности в формирование сообществ бентонтов. Для статистической обработки целесообразно было сформировать для сравнения две выборки из проб, собранных на грунтах с иловыми отложениями и без таковых (“чистые” грунты). В результате выявлено, что на заиленных грунтах численность и биомасса хирономид выше, чем на “чистых” (таблица 1). Достоверность данного факта подтверждена критерием Манна-Уитни.

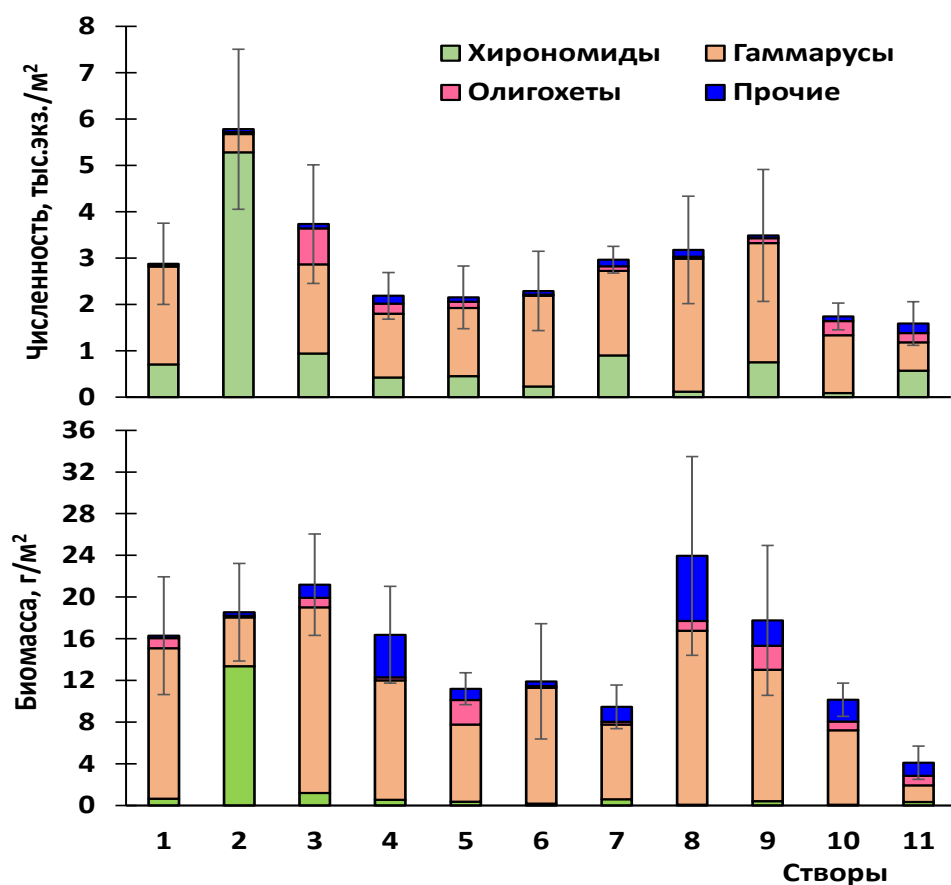


Рисунок 27 – Структурная организация, численность и биомасса донных сообществ нижнего участка р. Ангары.

Таблица 1. Численность (тыс. экз./м², в числителе) и биомасса (в знаменателе, г/м²) основных групп зообентоса в р. Ангара в зависимости от глубины (h), типа грунта и берега реки.

Факторы	Амфиподы	Хирономиды	Олигохеты	Прочие	Общее
$h < 0,5$ м	$1,8 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,04$	$0,1 \pm 0,02$	$3,2 \pm 0,4$
	$9,3 \pm 1,9$	$2,0 \pm 1,0$	$1,4 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,6$	$14,7 \pm 2,4$
$h > 0,5$ м	$1,6 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,1$	$0,09 \pm 0,02$	$2,6 \pm 0,5$
	$11,1 \pm 1,9$	$1,2 \pm 0,9$	$0,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,5$	$14,6 \pm 2,1$
Ил присут- ствует	$1,6 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,6$	$0,1 \pm 0,03$	$0,1 \pm 0,03$	$3,4 \pm 0,5$
	$10,5 \pm 2,1$	$3,3 \pm 1,6$	$0,5 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,6$	$16,0 \pm 2,2$
Ил отсутствует	$1,8 \pm 0,3$	$0,5 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,01$	$2,6 \pm 0,4$
	$10,0 \pm 1,8$	$0,4 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,5$	$13,1 \pm 2,2$
Берег левый	$1,7 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,02$	$3,0 \pm 0,5$
	$8,3 \pm 1,4$	$1,2 \pm 0,6$	$0,6 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,5$	$11,8 \pm 1,7$
Берег правый	$1,7 \pm 0,3$	$0,9 \pm 0,4$	$0,1 \pm 0,04$	$0,1 \pm 0,02$	$2,9 \pm 0,4$
	$12,1 \pm 2,2$	$2,0 \pm 1,2$	$1,2 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,6$	$17,5 \pm 2,6$

При более детальном анализе распределения хирономид, а именно двух основных подсемейств Chironominae и Orthoclaadiinae, которые массово представлены в Ангаре, была выявлена следующая тенденция. Численность Chironominae оказалась выше у правого берега, а численность Orthoclaadiinae напротив у левого берега (таблица 2). Данный факт может косвенно свидетельствовать о более благоприятном качестве воды вдоль левого берега Ангары. Известно, что личинки хирономид подсемейства Orthoclaadiinae требовательны к кислороду и слабо устойчивы к загрязнению, тогда как личинки подсемейства Chironominae более толерантны к условиям среды обитания [7, 8].

Таблица 2. Численность (тыс. экз./м²) хирономид подсемейств Chironominae и Orthoclaadiinae на разных берегах р. Ангара.

Берег	Chironominae	Orthoclaadiinae
Левый	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,2
Правый	0,8 ± 0,4	0,1 ± 0,04

Следует отметить, что представленное исследование является начальной стадией биометрического анализа по распределению донной фауны в р. Ангаре в зависимости от факторов окружающей среды. В дальнейшем планируется применение разнообразных приемов для статистической обработки биологических данных. В частности, будет проведен анализ биотических взаимодействий внутри бентосных сообществ по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена; оценена степень влияния гидрологических и гидрохимических факторов на численность зообентоса при помощи многофакторного линейного регрессионного анализа; исследована пространственная организация донных сообществ с использованием кластеризации методом иерархической агломерации; выполнена оценка экологического статуса водотока с использованием интегрального биоиндикационного показателя и статистического анализа данных.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Guisan A., Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models // Ecology Letters. 2005. V. 8. P. 993–1009. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x.
2. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Шитиков В.К. Особенности пространственного распределения донных сообществ равнинной реки бассейна Средней Волги // Вестник ТГУ. Биология. 2017. № 40. С. 163–180. <https://doi.org/10.17223/19988591/40/10>.

3. Zinchenko T. D., Shitikov V. K. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2019. № 1. С. 5–11. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011.
4. Воробьева С.С., Стрижова Т.А., Земская Т.И. Современное состояние и прогноз формирования ангарских водохранилищ // Прогнозирование экологических процессов. Новосибирск: Наука, 1986. С. 159–164.
5. Boulion V.V., Sirotskii S.E. Biological productivity of the Boguchanskoe reservoir: modeling and prediction // Biol. Bull. 2015. Vol. 42 (4). P. 361–370. DOI: 10.1134/S1062359015040020.
6. Бажина Л.В., Клеуш В.О. Макрозообентос Красноярской акватории реки Ангара до наполнения водохранилища Богучанской ГЭС // Чтения памяти В.Я. Леванидова. 2014. Вып. 6. С. 66–77.
7. Безматерных Д.М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири: аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН. Сер. Экология. Вып. 85. Новосибирск, 2007. 87 с.
8. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. Экологическое качество пресных вод. 2-е изд., исправленное. Минск: Беларуская навука, 2011. 328 с.

Основные публикации по разделу:

- Андрианова А.В. Донная фауна и оценка экологического состояния нижнего участка р. Ангары // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2023. Т. 43. С. 39–58. DOI: 10.26516/2073-3372.2023.43.39.
- Андрианова А.В., Спицына Т.П., Пономарёва Ю.А., Ануфриева Т.Н. Современное состояние гидробиологических сообществ в низовье реки Ангары // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2023. № 08. С. 7–13. DOI: 10.37882/2223-2982.2023.08.01

1.9. Выявление зон цветения реки Енисей в городской черте города Красноярска

Введение.

Высшие водные растения являются неотъемлемой частью и имеют огромное значение в функционировании водных экосистем [1, 2]. Однако макрофиты играют как положительную, так и отрицательную роль в формировании качества воды. Их обильное развитие снижает скорость течения реки, что приводит к заилению и заболачиванию [1], увеличению продуктивности фитопланктона и эвтрофикация водоема. Разлагаясь в осенне-зимний пе-

риод, макрофиты служат источником дополнительного загрязнения реки. Массовое зарастание водоемов макрофитами, «цветение» воды цианопрокариотами, «зеленые приливы» нитчатых водорослей снижают рекреационные свойства водных объектов [3] и создает проблемы для судоходства. Интенсивное «цветение» воды и массовое развитие макрофитов наблюдается в р. Енисей в черте г. Красноярск, где русло имеет сложную гидроморфологию, изобилует островами, протоками и заводями. Погруженные макрофиты составляют основу водной растительности среднего участка р. Енисей от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары [2]. Снижение проточности и многогранная антропогенная нагрузка от деятельности промышленного мегаполиса создают благоприятные условия для эвтрофирования, зарастаемости и увеличения продуктивности реки. После строительства Красноярской ГЭС поток биогенов увеличился более, чем в 2 раза [4], что стимулировало развитие фитопланктона, фитоперифитона и зообентоса [5]. В городе наблюдается острая нехватка мест пляжного отдыха, в связи с чем региональные власти, предпринимают меры по ликвидации данной проблемы. После разностороннего исследования [3] выполнены работы по очистке Абаканской протоки, расположенной в центре г. Красноярск и имеющей рекреационное значение.

Наряду с классическими методами мониторинга природной среды широко применяется дистанционное зондирование при помощи различных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутниковой информации. Для выявления зон произрастания растительности существует нормализованный разностный индекс хлорофилла NDCI, который позволяет определить наличие хлорофилла в мутной, проточной воде при помощи мультиспектральной съемки с использованием ДЗЗ [6]. Способ определения «цветения» водоёмов при помощи данных, полученных со спутников, широко описаны в многочисленных работах [например, 7, 8]. Авторы делают вывод, что данные спутников Landsat и Sentinel 2 лучше всего подходят для выявления областей «цветения».

Цель данной работы – выявление зон «цветения» и массового произрастания макрофитов в реке Енисей в пределах г. Красноярск на основе междисциплинарных исследований по данным мультиспектральной аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата и наземного гидробиологического мониторинга.

Методы исследования.

Работы проводили в летне-осенний период 2022 г. в акватории р. Енисей в черте Красноярск в трех зонах (от верховья к низовью): 1 – протока Удачная, 2 – основное русло р. Енисей в районе Успенского монастыря, 3 – протока Татышева. Зона 1 характеризуется слабой проточностью, наибольшим прогревом и заиленным грунтом; здесь наблюдается

наибольшая степень зарастания водной растительностью. Зона 2 выбрана в качестве фоновой, поскольку характеризуется отсутствием макрофитов; имеет пологое песчано-галечное дно и средний скоростной режим. В зоне 3 р. Енисей имеет сложный разветвленный рельеф, по берегам произрастает высокая кустарниковая растительность, что снижает освещенность протоки; при этом ширина протоки меньше, а скорость течения выше, чем в зоне 1.

Для дифференцирования водной и земной поверхности использовался нормализованный разностный водный индекс NDWI [9]. Для расчёта вегетации использовался нормализованный разностный индекс хлорофилла NDCI [6]. Мониторинг реки Енисей осуществлялся при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) типа квадрокоптер, модель Matrice 210 v2. Съёмка осуществлялась при помощи мультиспектральной камеры MicaSense RedEdge-MX. Для расчёта индекса NDCI также использовали данные со спутников Sentinel 2a и Sentinel 2b.

Наземный гидробиологический мониторинг заключался в исследовании сообществ фитопланктона и зообентоса. В ходе четырёх биосъёмок собрано и обработано 12 и 36 проб соответственно.

Результаты исследования.

По данным с БПЛА оценена динамика распределения средних значений NDCI для исследованных зон (Рис. 28). Наиболее высокие значения наблюдаются при сниженном скоростном режиме в протоке Удачная, что отражает активные вегетативные процессы водной растительности. Наименьшие значения параметра NDCI зарегистрированы в протоке Татышева. В течение исследованного периода наблюдалась равномерная динамика индекса NDCI и его низкая дисперсия, что объясняется отсутствием сброса воды через плотину Красноярской ГЭС из водохранилища, и соответственно блокировкой проникновения водохранилищного фитопланктона в нижний бьеф. К осени наблюдалось снижение значений индекса NDCI, что является отражением естественных причин – спад уровня вегетации и отмирание растений.

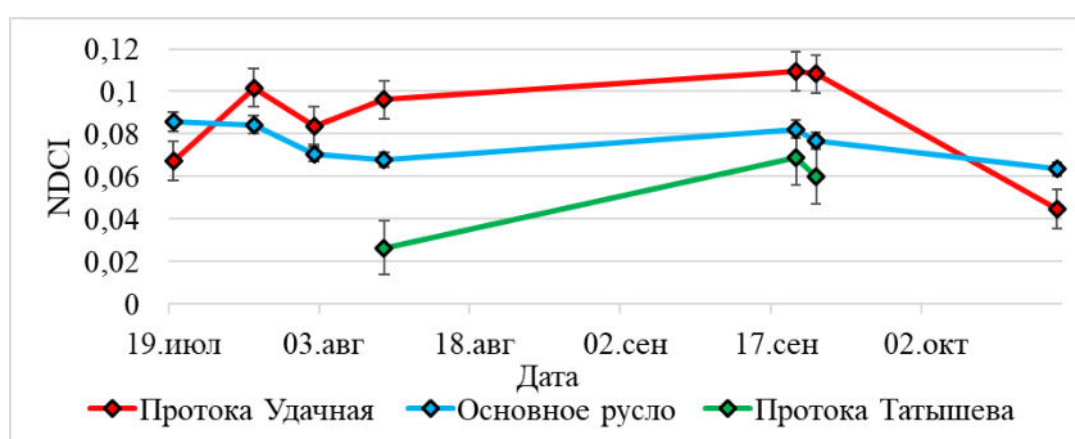


Рисунок 28 – Средние значения *NDCI* в исследованных зонах р. Енисей.

На рисунке 29 предоставлен фрагмент спутникового снимка с посчитанным индексом NDCI для акватории р. Енисей в черте г. Красноярск. Зелёным и жёлтым цветом отображены области фотосинтезирующей активности, большинство повышенных значений располагается вдоль островов и в протоках.



Рисунок 29 – Значения NDCI в р. Енисей по спутниковым данным (18.08.2021).

Межгодовые вариации индекса NDCI (Рис. 30) вполне согласуются с особенностями гидрологического режима Енисея в исследованные годы и влиянием гидроузла Красноярской ГЭС.

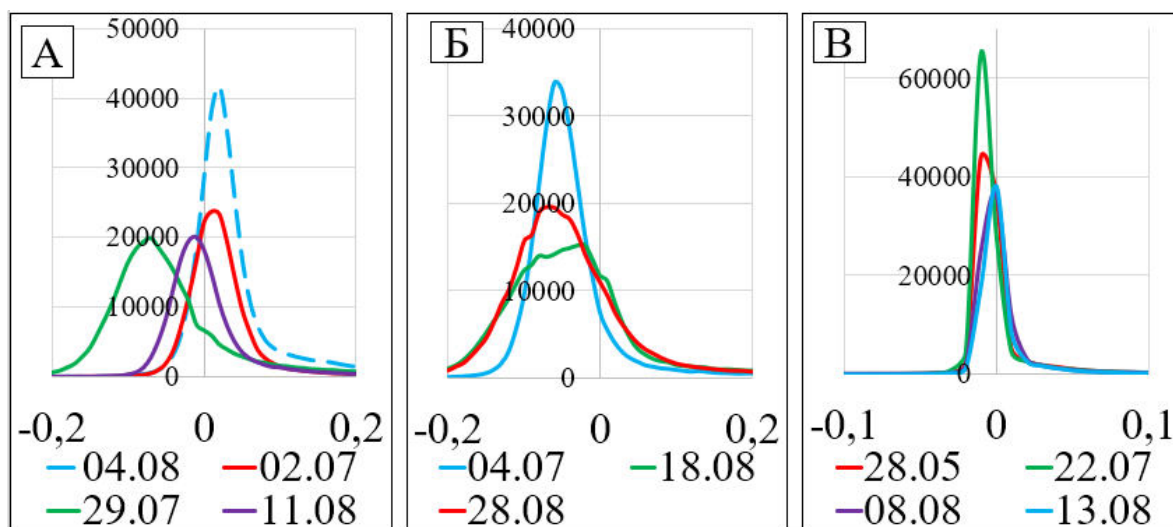


Рисунок 30 – Диаграммы распределения значений NDCI (по оси X) в акватории реки Енисей в черте г. Красноярска в различные годы исследований по данным дистанционного зондирования (А – 2019-2020 гг., Б – 2021 г., В – 2022 г.).

В 2019 и 2020 гг. уровень воды в реке соответствовал средне многолетним значениям, и график смещения значений NDCI отражает небольшие колебания в сторону повышенного или пониженного среднего значения вегетации по всей исследуемой площади реки

(Рис. 30А). В 2021 г. из-за климатических условий и переполненности Красноярского водохранилища пропускная способность Красноярской ГЭС была увеличена посредством поверхностного сброса, что привело к аномальному повышению уровня воды в нижнем бьефе, подтоплению прибрежных территорий и уменьшению количества водной растительности. Данная особенность проявляется смещением диаграммы распределения значений NDCI в левую отрицательную зону (Рис. 30Б). В 2022 г. произошла обратная ситуация – регулирование водного режима со стороны Красноярской ГЭС полностью отсутствовало, что привело к аномальному снижению уровня воды, обмелению береговой линии и блокировке притока фитопланктона из Красноярского водохранилища. В данных условиях динамика значений NDCI характеризовалась очень низким значением дисперсии (Рис. 30В). Вероятно, такая картина отражает совокупную фотосинтетическую активность высшей водной растительности и микрофитобентоса в прибрежье реки в отсутствие водохранилищных форм фитопланктона из верхнего бьефа. Однородная динамика значений NDCI в течении вегетационного периода в 2022 г. так же подтверждается данными с БПЛА (Рис. 28).

Наземный гидробиологический мониторинг показал, что в протоках р. Енисей в условиях снижения скоростного режима, заиливания грунтов и распространения высшей водной растительности наблюдалась смена структурообразующих комплексов фитопланктона и зообентоса по сравнению с основным руслом реки. В протоке Удачная (зона 1) в фитопланктоне увеличилась роль зеленых и сине-зелёных водорослей (Рис. 31), что обусловило слабое «цветение» воды.

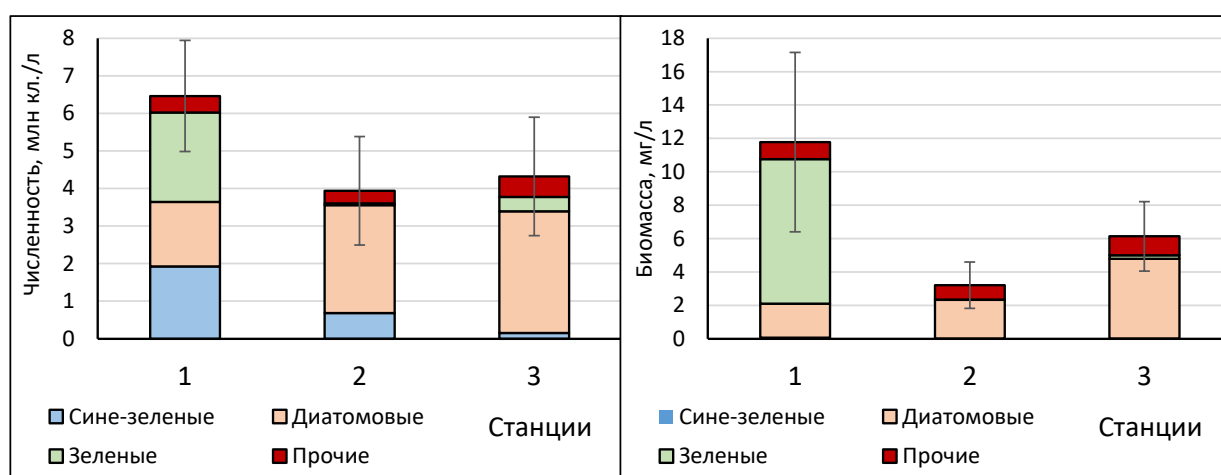


Рисунок 31 – Структурообразующие таксоны фитопланктона р. Енисей.

В зообентосе в обоих протоках наблюдалось массовое развитие олигохет, а в протоке Удачная (зон 1) – еще и хирономид (Рис. 32).

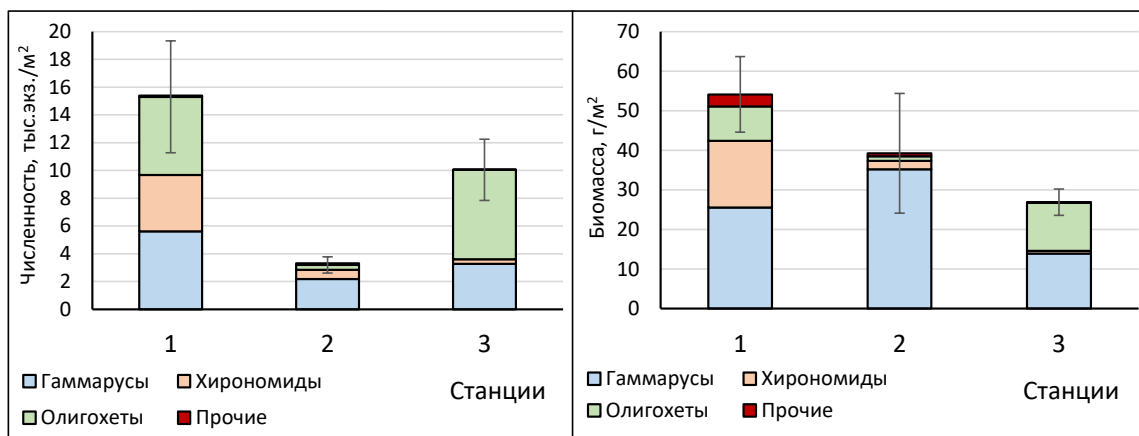


Рисунок 32 – Структурообразующие таксоны зообентоса р. Енисей.

Качество воды, рассчитанное по видовой структуре фитопланктона, соответствует II классу категории «слабо загрязнённая». По таксономическому составу зообентоса качество воды в протоках оценивается как «загрязнённая» III класса, в основном русле – «слабо загрязнённая» II класса.

Список цитируемой в разделе литературы:

- Капитонова О.А., Каргапольцева И.А., Мельников Д.Г. Особенности формирования растительного покрова и пространственная структура макрозообентоса в условиях нарушения гидрологического режима водоема (на примере Березовского залива Воткинского пруда) // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, № 1. С. 167–173.
- Зотина Т.А. Фитомасса и видовое разнообразие макрофитной растительности в среднем течении р. Енисей // Журнал Сибирского Федерального университета. Биология. 2014. Т. 7, № 1. С. 73-86.
- Кравчук Е.С., Дубовская О.П., Шулепина и др. Влияние антропогенных факторов на экосистему протоки р. Енисей в черте города Красноярск // Журнал Сибирского Федерального университета. Биология. 2021. Т. 14, № 2. С. 208–237.
- Сороковикова Л.М, Башенхаева Н.В. Евтрофирование и качество воды Енисея // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 4. С. 498–503.
- Андрианова А. В. Динамика развития енисейского зообентоса в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 1 (21). С. 74-88.

6. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters //Remote Sensing of Environment. 2012. Т. 117. С. 394–406.
7. Лаврова О. Ю. и др. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – №. 3. – С. 54.
8. Лагута А. А., Погорелов А. В. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – №. 4. – С. 67-84.
9. Катаев М. Ю., Бекеров А. А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, №. 4. С. 105–108.

Основные публикации по разделу:

- Андрианова А.В., Пономарева Ю.А. Гидробиологические сообщества в экотопах прибрежно-водной растительности в р. Енисей // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96–7. С. 86–89. DOI: 10.18411/trnio-04-2023-359.
- Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э., Андрианова А.В., Дергунов А.В. «Цветение» реки Енисей в черте г. Красноярска по данным дистанционного зондирования // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97–11. С. 78–83. DOI: 10.18411/trnio-05-2023-601.

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. 33).

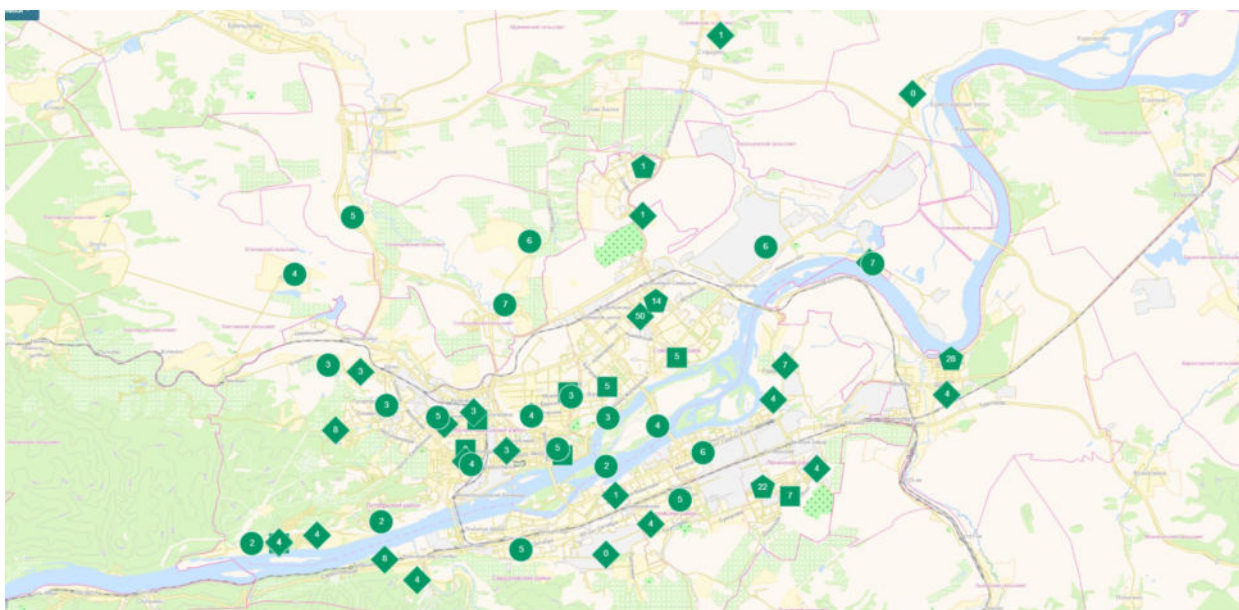


Рисунок 33 – Станции мониторинга воздуха объединенной городской системы мониторинга воздуха г. Красноярска.

В отчетный период выполнялись работы по настройке, развитию пользовательских и программных интерфейсов объединенной системы мониторинга (Рис. 34).

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» в 2022 году 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 34 – 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:

- Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик Т.В., Заворуев В.В. Информационно-вычислительное обеспечение мониторинга атмосферы г. Красноярска // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 26-32. DOI: 10.25743/sdm.2023.76.63.005.
- Tokarev A., Zavoruev V., Kadochnikov A., Yakubailik O., Malimonov M. Development of software for creating an archive of images of fogging processes over the Yenisei River // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803N. DOI: 10.1117/12.2691008 [Scopus]

2.2. Информационно-вычислительное обеспечение системы мониторинга воздуха

Красноярска

Основа представленной выше «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» является разработанный аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния и оценки загрязнения атмосферы города.

Для объективной оценки ситуации, анализа и обоснования различных проектных предложений по улучшению экологии города, необходимо сформировать детальное представление о процессах, протекающих в приземном слое атмосферы города. Общепринятым подходом здесь является разработка и внедрение соответствующих методов физико-математического моделирования, создания «цифровых двойников» атмосферы Красноярска на основе современных вычислительных технологий с применением высокопроизводительных вычислительных комплексов новых поколений. Важнейшим элементом, неотъемлемой составной частью комплексных исследований по данной теме должно стать решение задачи по формированию и развитию приборной базы, аппаратного обеспечения системы мониторинга приземного слоя атмосферы в Красноярске и его окрестностях. Система натурных наблюдений должна обеспечить верификацию разрабатываемых математических моделей, формирование типовых наборов начальных данных для моделирования, генерацию и проверку сценарных условий. В данной работе представлены промежуточные результаты по созданию аппаратно-программного комплекса для мониторинга состояния и оценки загрязнения атмосферы г. Красноярска.

Формирование измерительного аппаратно-программного комплекса для мониторинга атмосферы г. Красноярска выполнялось поэтапно, на протяжении нескольких лет выполнения настоящего проекта. Стоит отметить, что подобные решения внедряются о многих городах и странах мира [1, 2]. В их основе – современные сервис-ориентированные технологии [3, 4], широко применяется беспилотные летательные аппараты [5]. Предметом исследований выступает поиск и установление взаимосвязей между особенностями местности, метеорологическими характеристиками и загрязнением [6, 7].

Работы авторов по данной теме ведутся уже несколько лет [8]. В настоящее время в его состав входит следующее оборудование и соответствующее программное обеспечение:

- Станции мониторинга «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН», которые измеряют концентрации взвешенных частиц (PM_{2.5}), метеорологические характеристики атмосферы (температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление). Создан и постоянно дорабатывается комплекс программных средств для работы с регистрируемой информацией.

- *Сеть датчиков, метеостанций и анемометров*, созданных в ИВМ СО РАН и размещенных в разных точках города, включающая регистраторы скорости/направления ветра в нескольких точках вдоль русла р. Енисей, приборы для измерения концентрации PM2.5, цифровые датчики температуры воды в р. Енисей. Перечисленное оборудование реализовано в виде самодостаточных устройств на основе микроконтроллеров с соответствующими датчиками, с передачей данных в реальном времени через сотовую сеть на геопортал ИВМ СО РАН. Корпуса приборов напечатаны на 3D-принтере.
- *Термокосы над поверхностью р. Енисей для измерений температуры и влажности воздуха*, предназначенные для изучения процесса теплообмена между водой и воздухом в приповерхностном слое атмосферы над водой (от 10 см до нескольких метров):

- «Термокоса плавающая» – это «поплавок» (буй) с установленным на нем стержнем длиной около 1 м, на котором на разной высоте закреплены датчики-регистраторы температуры (дата-логгеры), установленные на высотах 10, 30, 50, 70, 90 см над уровнем воды. Дата-логгеры ведут запись данных в свою память с периодичностью 1 час.
- «Термокоса навесная» расположена над поверхностью воды, закреплена на прибрежном сооружении вертикальным стальным тросом, обеспечивает измерение температуры и влажности воздуха на высоте до 8 метров от поверхности воды. Ориентировочное местоположение дата-логгеров на термокосе: 2, 3, 5, 7 метров от поверхности воды; периодичность записи – также 1 раз в час.

Регистрируемая термокосами информация периодически считывается с дата-логгеров и также загружается на геопортал ИВМ СО РАН для дальнейшей обработки и анализа.

- *Измерительный комплекс на основе БПЛА (квадрокоптера)*, которые обеспечивает измерение характеристик атмосферы (метеоданные и концентрации взвешенных частиц PM2.5) на вертикальных профилях до высоты в 500 метров над уровнем земли. Используемый БПЛА промышленного типа обладает повышенной стойкостью к условиям эксплуатации (сильный ветер, отрицательные температуры). Для обеспечения измерений в зимних условиях для квадрокоптера был напечатан на 3D-принтере теплоизоляционный кожух. Все регистрируемые навесным оборудованием квадрокоптера данные поступают в специализированную подсистему геопортала ИВМ СО РАН в процессе постобработки.
- *Метеорологический температурный профилемер МТР-5*, который позволяет измерять вертикальный профиль температуры атмосферы до высоты 1000 метров с шагом 50

метров. Эта информация необходима для выявления периодов температурных инверсий. Разработан набор программных средств для передачи регистрируемых данных профилемера на сервер в ИВМ СО РАН. Созданы база данных и веб-интерфейсы для визуализации получаемых данных в различных представлениях.

- Система видеонаблюдения с помощью IP-видеокамер, предназначенная для регистрации образования туманов над рекой Енисей. В разных точках города размещены видеокамеры, передающие данные на геопортал ИВМ СО РАН через Интернет в реальном режиме времени, в том числе цилиндрического и купольного типов. Съемка выполняется в интервальном фоторежиме – один фотоснимок за 10 минут. Поворотная камера купольного типа обеспечивает съемку в нескольких ракурсах по заданному сценарию. Разработан блок визуального мониторинга геопортала ИВМ СО РАН, который обеспечивает сбор, обработку изображений, загрузку в структурированный файловый архив и организацию доступа через веб-приложения и сервисы.

Результаты

Избранные результаты измерений характеристик природной среды, полученных с помощью созданного аппаратно-программного комплекса представлены ниже.

На рис. 35 показаны полученные с помощью оборудования БПЛА типичные вертикальные профили распределения концентрации PM_{2.5} и соответствующие вертикальные профили температуры. На основе многократных измерений экспериментально установлено, что наличие температурной инверсии препятствует вертикальному распространению аэрозольных частиц, их концентрация вблизи земной поверхности заметно выше по сравнению с ситуацией, когда инверсия отсутствует.

Рис. 36 иллюстрирует динамику изменений температуры воды в летние месяцы в нижнем бьефе Красноярской ГЭС. Обнаружены значительные колебания температуры воды (> 8°C) в летние месяцы с периодом порядка недели, связанные с текущими погодными условиями (температура, облачность) и режимом сброса воды через плотину ГЭС.

На рис. 37 представлены данные о повторяемости температурных инверсий в Красноярске. В зимние месяцы она превышает 60%, в летнее составляет не более 25%.

Рис. 38 иллюстрирует данные о повторяемости туманов над Енисеем. В подавляющем большинстве случаев в момент образования туманов наблюдалась температурная инверсия. В те моменты времени, когда наблюдались туманы, доля периодов с отсутствием инверсии составила 3%, приземной инверсии – 24%, приподнятой – 73%.

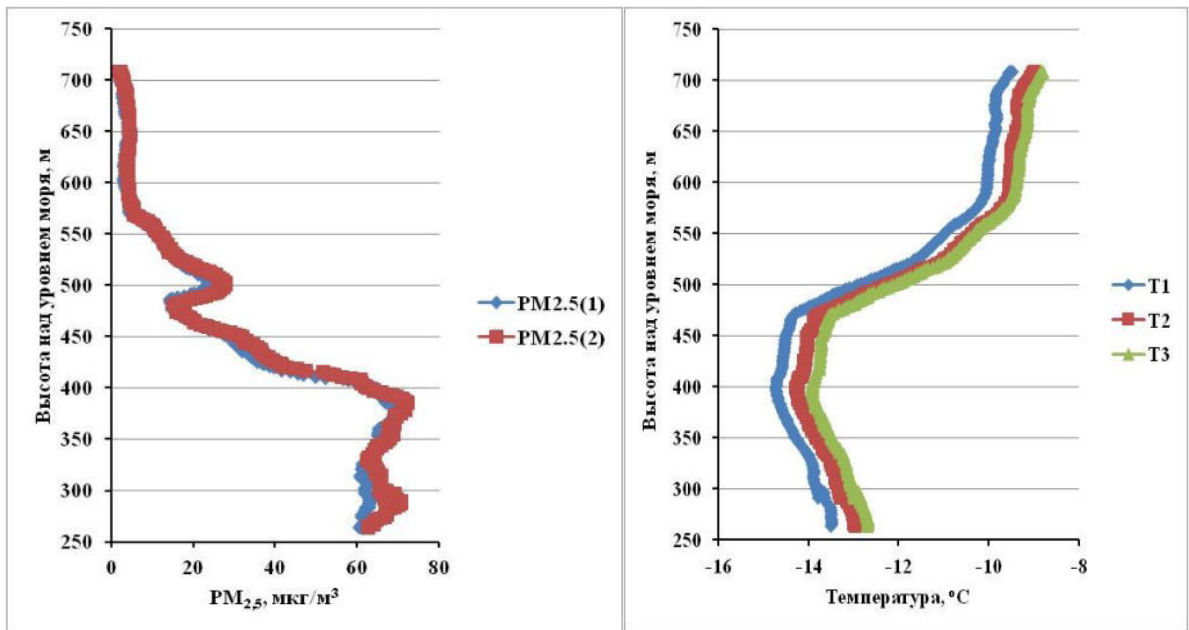


Рисунок 35 – Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц PM2.5 и температуры воздуха с нескольких датчиков навесного оборудования БПЛА.

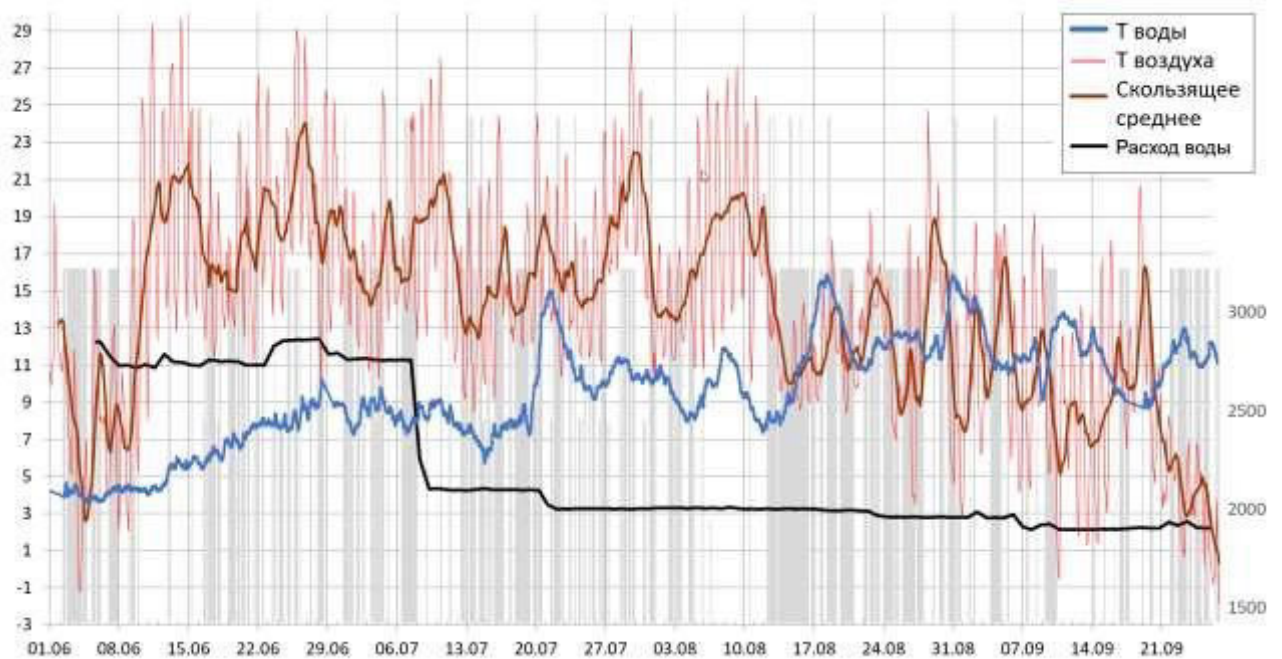


Рисунок 36 – Анализ взаимосвязи колебаний температуры воды в районе нижнего бьефа Красноярской ГЭС в летний период 2022 года от температуры воздуха (на рисунке также приведена скользящее среднее), облачности (периоды облачного неба обозначены серым цветом) и расхода воды через плотину Красноярской ГЭС (значения расхода воды через плотину в м³/сек – на оси Y справа). Данные по температуре воздуха и облачности – по измерениям метеостанции Росгидромета в г. Дивногорске.

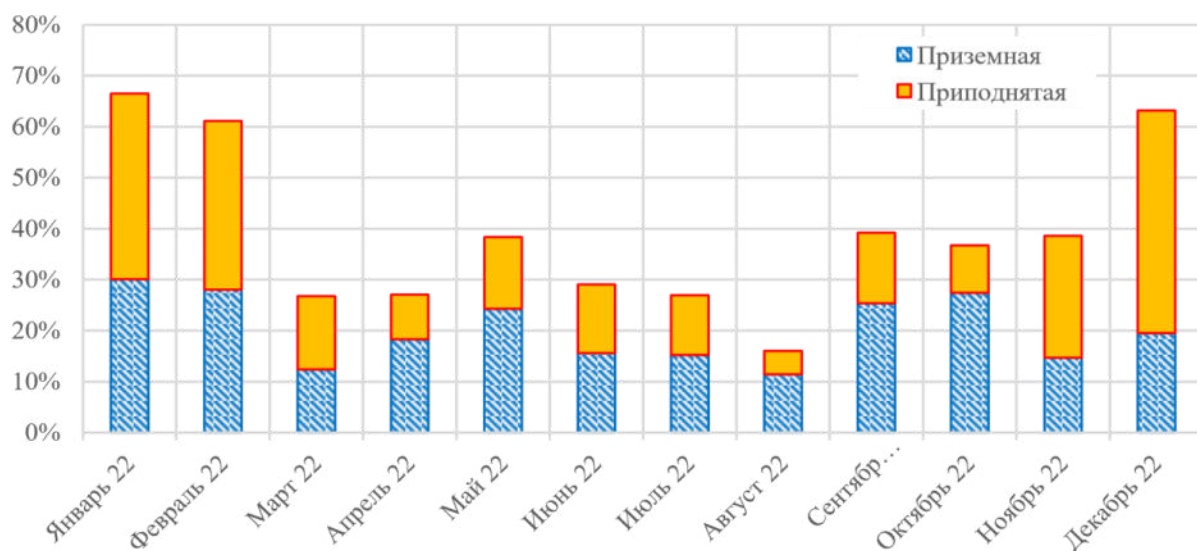


Рисунок 37 – Повторяемость температурных инверсий (доля количества часов с инверсиями) и их типы по данным наблюдений в 2022 году с помощью температурного профилера МТР-5.

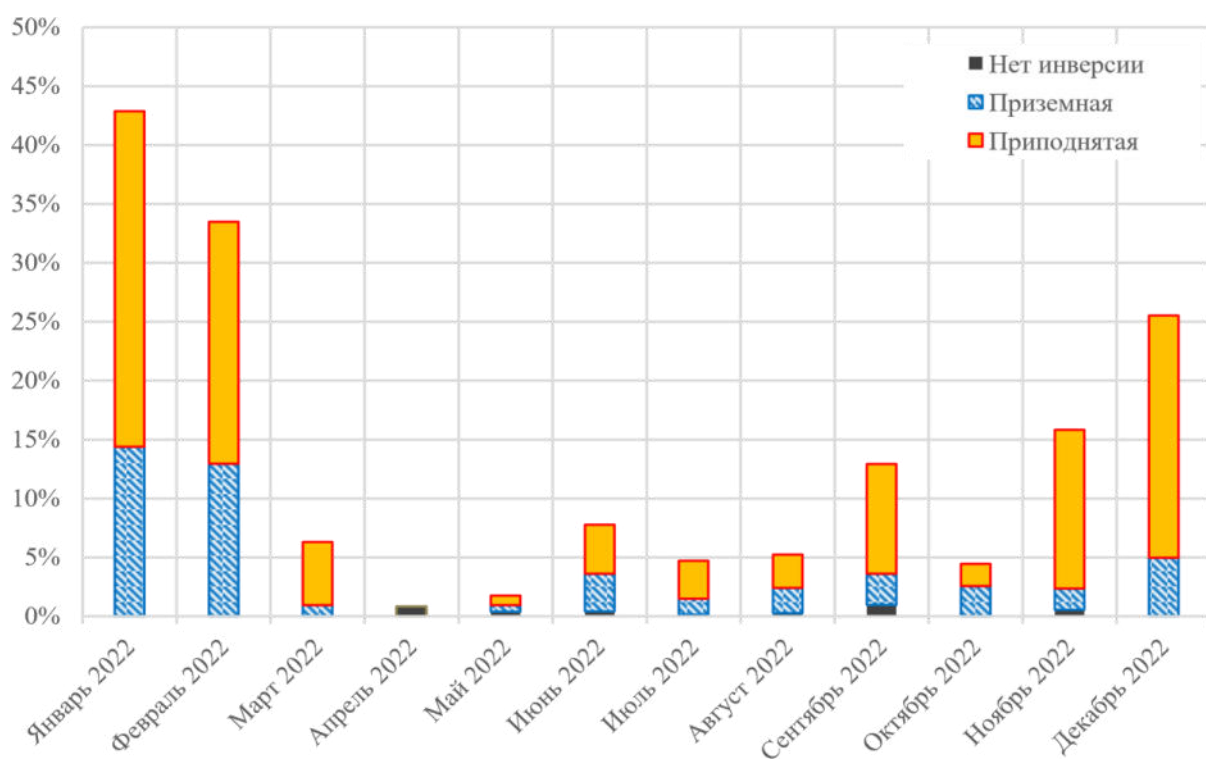


Рисунок 38 – Повторяемость туманов в 2022 году по данным мониторинга с помощью IP-видеокамер и температурная инверсия при наличии туманов.

Взаимосвязь относительной влажности в периоды туманообразования от разницы температур вода/воздух показана на рис. 39. Туманы парения в зимнее время возникают при разнице температур порядка 20°C. Среднегодовое значение относительной влажности, при которой возникают туманы, составило 77%.

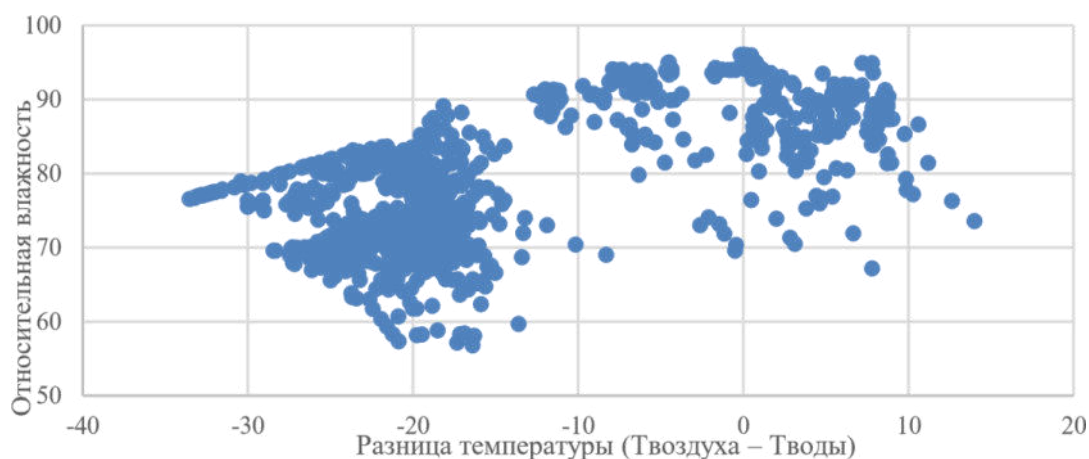


Рисунок 39 – Характеристики метеоусловий в периоды образования туманов: относительная влажность в зависимости от разности температур ($T_{\text{воздуха}} - T_{\text{воды}}$) в 2022 году.

Реализуемый комплекс измерительного оборудования и связанного с ним программно-технологического обеспечения рассматривается как системная основа для формирования репрезентативных наборов данных, необходимых для моделирования и оценки экологического состояния Красноярска. Создается интегрированная геопространственная база данных, основа информационно-аналитической системы городского экологического мониторинга. Перспективы использования этой информации связаны с выработкой рекомендаций по принятию оптимальных управленческих решений по улучшению качества воздуха на основе обобщения данных и вычислительных расчетов, сценарного моделирования.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Gulia S., Shiva Nagendra S.M., Khare M., Khanna I. Urban air quality management – a review // Atmospheric Pollution Research. 2015. 6(3). 286-304.
2. Wiemann S., Brauner J., Karrasch P., Henzen D., Bernard L. Design and prototype of an interoperable online air quality information system // Environmental Modelling & Software. 2016. 79. 354-66.
3. Schmitt R.H. and Voigtmann C. Sensor information as a service – component of networked production // Journal of Sensors and Sensor Systems. 2018. 7. 389-402.
4. Singh D., Dahiya M., Kumar R., Nanda C. Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review // Journal of Environmental Management. 2021. 289, 112510.
5. Li X., Wang D., Lua Q., Peng Z., Wang Z. Investigating vertical distribution patterns of lower tropospheric PM_{2.5} using unmanned aerial vehicle measurements // Atmospheric Environment. 2018. 173. 62-71.

6. Li X., Song H., Zhai S., Lu S., Kong Y., Xia H., Zhao H. Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017) // *Environmental Pollution*. 2019. 246. 11-18.
7. Jian L., Yinkun L. Research on the correlation between meteorological factors and pollutants based on Pearson coefficient // *Journal of North China Institute of Science and Technology*. 2019. 16(04). 93-97.
8. Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A., Tokarev A.V. Web Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. 54(3). 243-249.

Основные публикации по разделу:

- Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Измерительный комплекс для определения теплофизических характеристик реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // *Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием*. Красноярск, 2023. С. 270-272.
- Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик Т.В., Заворуев В.В. Информационно-вычислительное обеспечение мониторинга атмосферы г. Красноярска // *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023)*. Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 26-32.
DOI: 10.25743/sdm.2023.76.63.005.
- Zavoruev V., Yakubailik O., Tokarev A., Dergunov A., Krasnoshchekov K., Sokolova O. Vertical distribution of aerosol particle concentration in the atmosphere at temperature inversion // *Proceedings of SPIE*, 2023, 12780, 127803P. DOI: 10.1117/12.2691013. [Scopus]
- Tokarev A., Zavoruev V., Kadochnikov A., Yakubailik O., Malimonov M. Development of software for creating an archive of images of fogging processes over the Yenisei River // *Proceedings of SPIE*, 2023, 12780, 127803N. DOI: 10.1117/12.2691008 [Scopus]

2.3. 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 климатиче-

ской 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 40.

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 40 – 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. 41).

Для визуализации и оперативного анализа сформированного набора данных реанализа NCEP GFS был создан специализированный веб-интерфейс (Рис. 42).

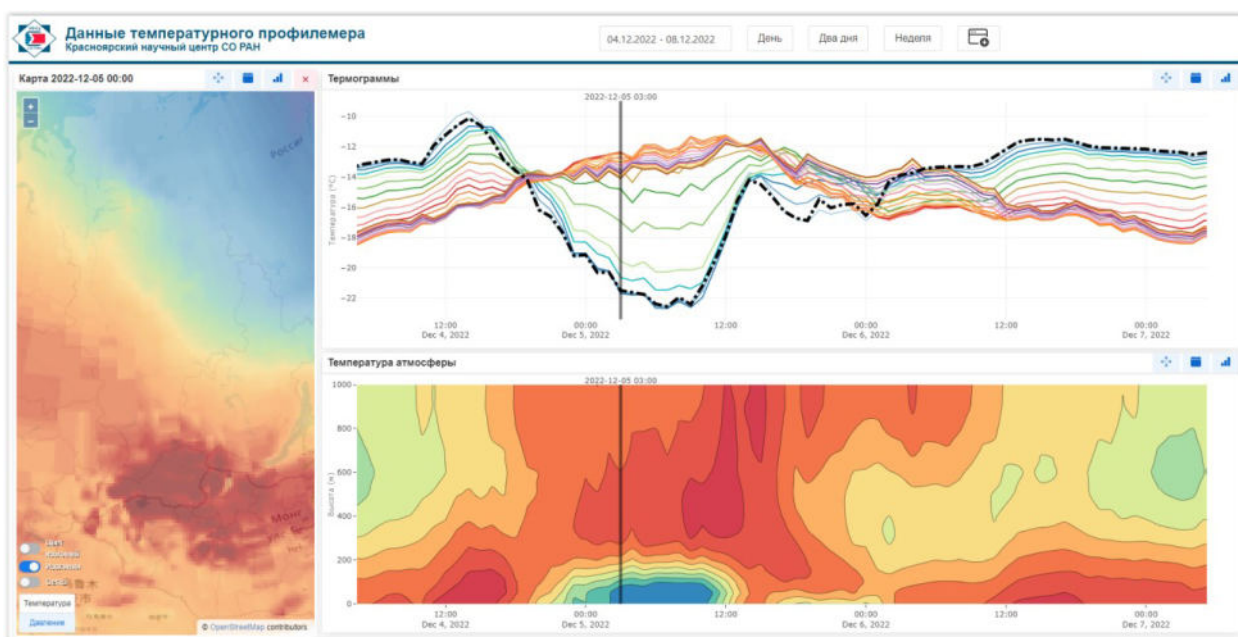


Рисунок 41 – Веб-интерфейс системы экологического мониторинга отображает картографические данные NCEP GFS по температуре и давлению на разных высотах совместно с данными измерений метеорологического температурного профилера МТР-5.

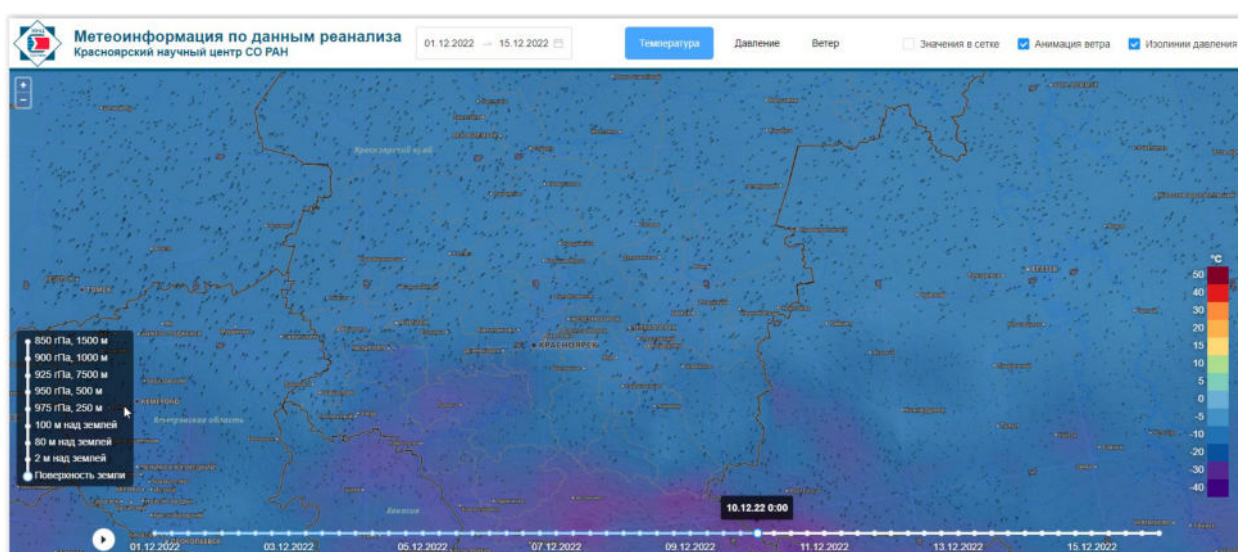


Рисунок 42 – Веб-интерфейс к данным реанализа NCEP GFS на геопортале ИВМ СО РАН.

2.4. Подсистема обработки и визуализации оперативной метеорологической информации

Для обеспечения безопасности выполнения регулярных экспериментальных исследований атмосферы г. Красноярска с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимо владеть актуальной информацией по прогнозу погоды, в том числе – о скорости ветра и температуре воздуха.

Существуют ограничения по использованию БПЛА при сильном ветре и низких температурах в соответствии с рекомендациями производителей. В случае возникновения чрезвычайной ситуации (падении, выходе из строя БПЛА) информация о погоде может быть крайне значимой.

Регламент выполнения полетов БПЛА в рамках проведения научных исследований в ИВМ СО РАН предусматривает обязательный контроль погодных условий – текущее состояние и прогноз. Вся необходимая для этого информация собрана в одном месте – тематическом веб-сайте с метеоданными.

В качестве источников информации по прогнозу погоды были выбраны официальные поставщики данных: Росгидромет и его территориальное подразделение в Красноярске – Среднесибирское УГМС.

Поставщиком оперативной метеоинформации являлась метеостанция ИВМ СО РАН, оборудование которой – DAVIS Instruments Vantage Pro2 – внесено Госреестр средств измерений и прекрасно себя зарекомендовало; именно такое оборудование используется на сертифицированных постах экологического мониторинга Минэкологии края в Красноярске. Местоположение здания ИВМ СО РАН, на крыше которого установлена эта метеостанция, по экспертным оценкам позволяет рассматривать ее данные по скорости и направлению ветра в качестве характерных фоновых значений для города в целом. Данные по температуре и ветру на метеостанции ИВМ СО РАН с хорошей точностью соответствуют станции государственной сети метеонаблюдений «Красноярск, Опытное поле» (WMOID = 29570), которая является базовой для Красноярска.

Разработанный веб-сайт с метеоинформацией публикует данные по температуре воздуха, ветре (скорость, порывы и направление ветра), влажности и давлению. Также представлены прогнозы Росгидромета (Москва) и Среднесибирское УГМС (Красноярск) на ближайшие три дня. На рисунке 43 представлена карточка с данными поста мониторинга.

Данные с поста мониторинга сохраняются в базе данных и представляются на сайте в виде архивной информации за три дня. В интерфейсе пользователя представлены данные о температуре, давлении и влажности, скорости, направлении и порывах ветра. Отдельно вычисляются проценты штиля (Рис. 44).

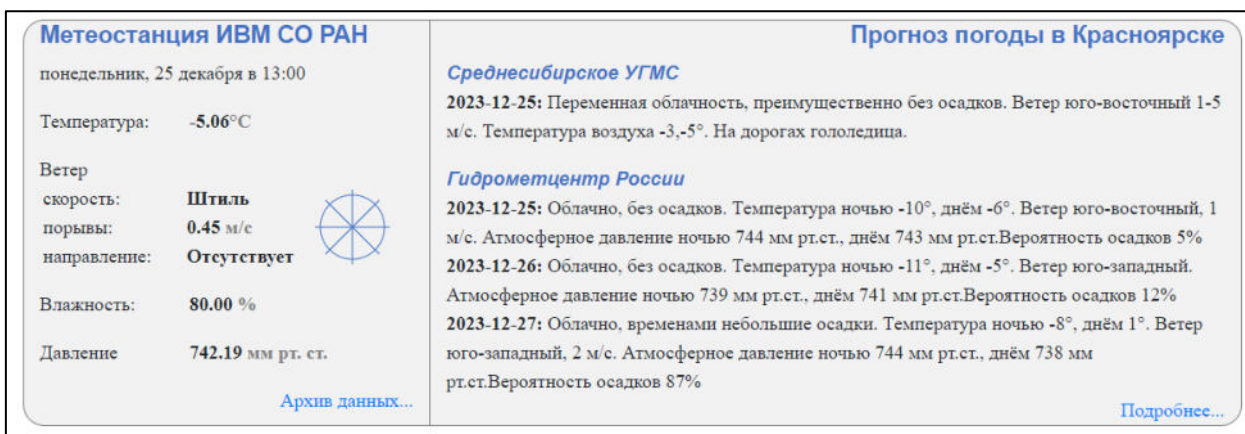


Рисунок 43 – Карточка с данными поста мониторинга и текстовые прогнозы погоды.

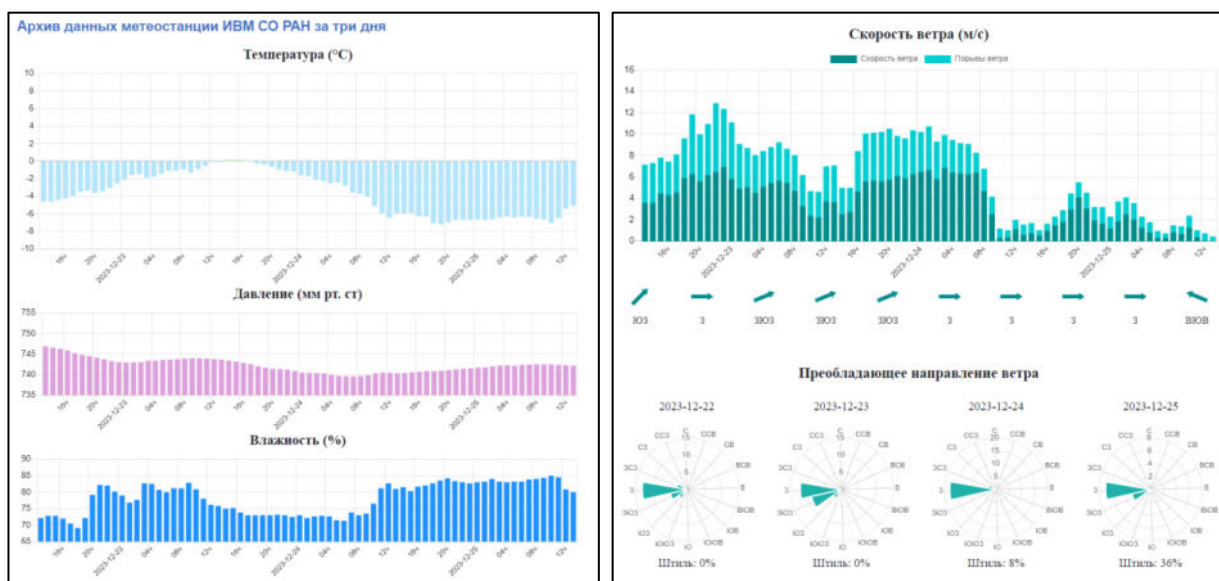


Рисунок 44 – Архив данных по температуре, давлению и относительной влажности (слева), скорости и направлению ветра (справа).

Для создания этого веб-сайта с метеоинформацией использовались следующие технологии веб-программирования: фреймворк vue, bootstrap и chart.js.

2.5. Программное обеспечение для визуализации данных метеорологического температурного профилера

Одной из задач в рамках реализации настоящего проекта стало создание программно-технологического обеспечения визуализации данных метеорологического температурного профилера МТР-5.

Для работы с данными температурного профилера было разработано программное обеспечение, которое позволило динамически загружать данные за определённые промежутки времени и просматривать их в различных графических представлениях.

Разработка выполнена на основе библиотек vue.js, plotly.js, element-plus и node.js.

В системе есть несколько различных типов графиков: термограммы – отображает температуру атмосферы по разным высотам, температура атмосферы – отображает температуру атмосферы по разным высотам в виде изолиний, температурные инверсии – отображает температурные инверсии в виде сетки, профиль – отображает температуру атмосферы по высотам за выбранную точку на термограмме, загрязнение и ветер – отображает скорость ветра и показывает концентрацию PM2.5 в воздухе. Веб-приложение поделено на две основные части: шапка веб-приложения с элементами управления и блок отображения. Блок отображения представляет собой сетку из карточек с графиками. Каждая карточка является независимой и в каждой можно отобразить разные типы графиков.

Веб-приложение работает с базой данных через специальное API, где хранятся все данные температурного профилемера с минимальным шагом пять минут. На рисунке 45 ниже представлена схема обмена данными между сервисами.

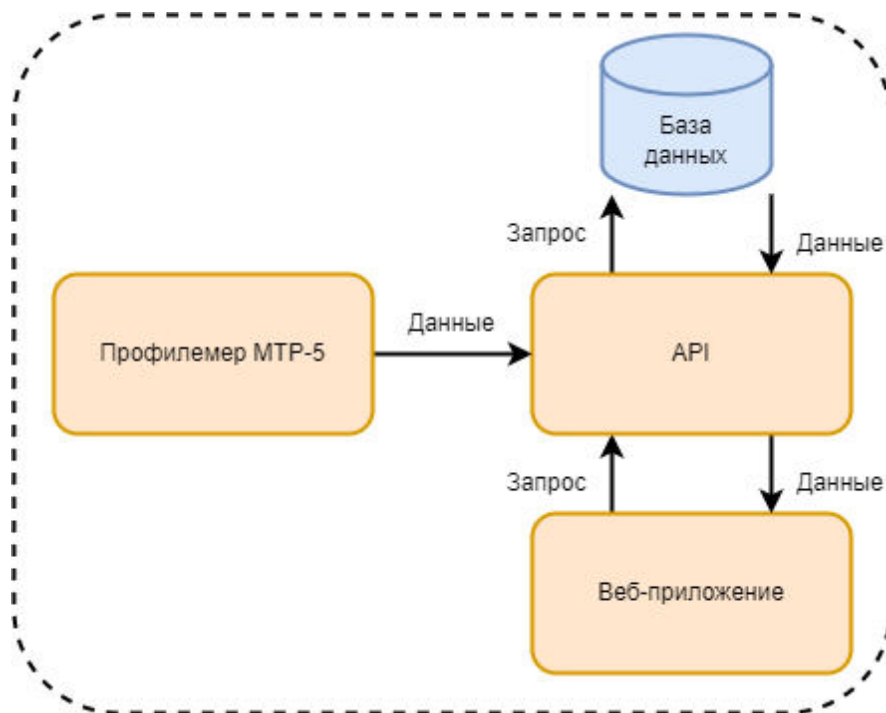


Рисунок 45 – Схема обмена данными.

Обмен между API и веб-приложением осуществляется по технологии REST API. Все данные приходят в формате XML. API может агрегировать данные и выдавать их с различным шагом (5 минут, 20 минут, 1 час, 1 день и т.д.).

Веб-приложение имеет меню управление, которое позволяет менять параметры и получать данные, исходя из этих параметров. Например, выбирая разные диапазоны отображения данных (день, двое суток, неделя или месяц), веб-приложение автоматически запросит данные с необходимым шагом (5 минут, 20 минут, 1 час, 1 день соответственно).

Каждая запись из базы данных содержит: Координаты размещения устройства, Значение, Уникальный идентификатор, Время регистрации значения.

После получения данных их необходимо обработать и представить в графическом виде. На рисунке 46 ниже представлена схема обработки и формирования данных для отображения.

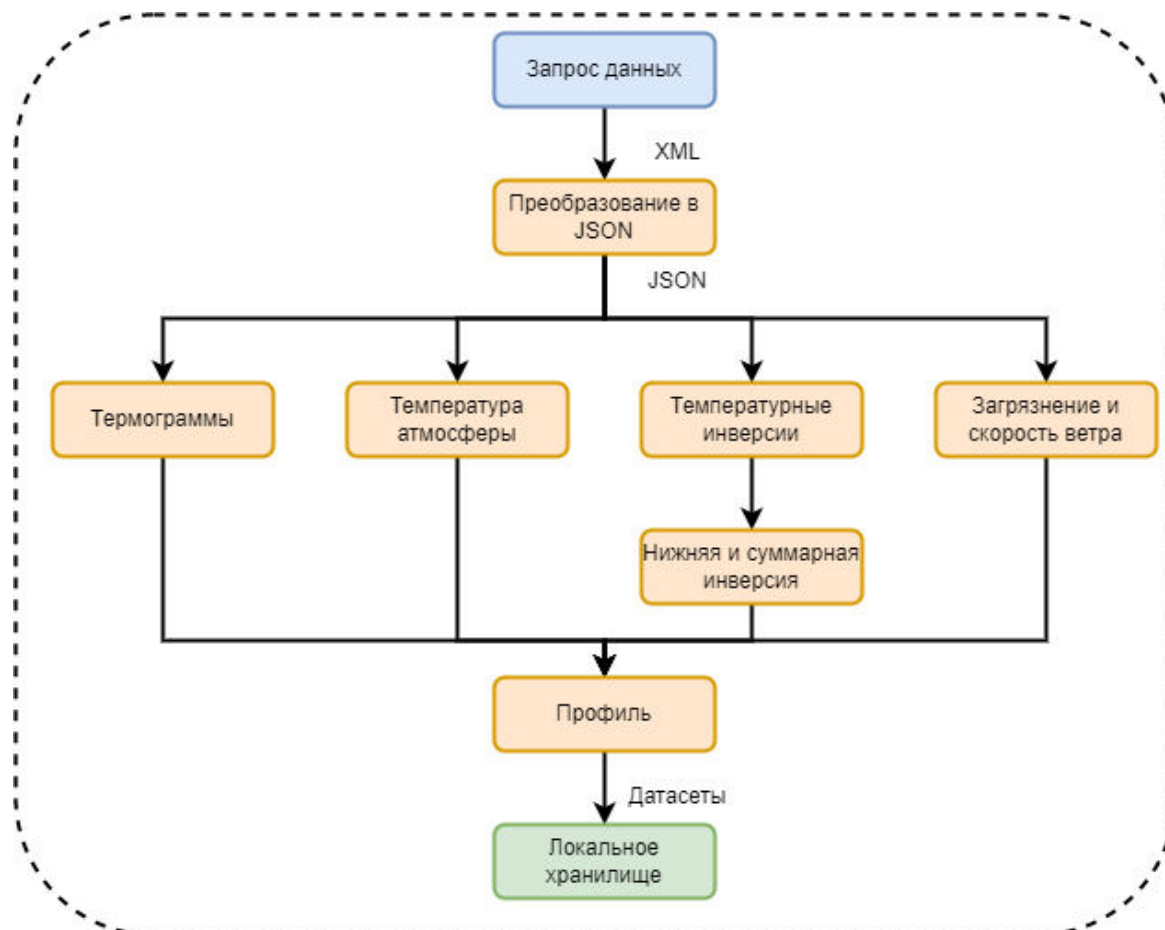


Рисунок 46 – Схема формирования данных внутри приложения.

Ниже описаны модули формирования данных для разных графических представлений. После обработки XML и преобразования в JSON необходимо рассчитать и сформировать «датасеты» для графической библиотеки.

Модуль «Термограммы» формирует линейный график всех доступных высот с температурного профилемера и каждую высоту помечает своим цветом. По оси x – время, по y – температура.

Модуль «Температуры атмосферы» формирует контурный график для всех доступных высот и показывает распределение температуры. Для этого типа графика формируется отдельная палитра, которая высчитывается от минимальных и максимальных значений температуры за выбранный период. По оси x – время, по y – высота, z – значение температуры.

Модуль «Температурные инверсии» формирует график «Тепловая карта». Такой тип графика представляет собой сетку значений. В каждой ячейке записывается значение температурной инверсии и в зависимости от мощности инверсии красится в соответствующий цвет. По оси x – время, по y – высота, z – значение температурной инверсии. Также на данном графике отображается сумма инверсии.

Модуль «Загрязнение и скорость ветра» формирует гистограмму, которая показывает загрязнение в городе Красноярск, и линейный график, отображающий скорость ветра. По оси x – время, по y – концентрация частиц PM2.5, по y2 – скорость ветра

Модуль «Профиль» формирует линейный график и показывает значениями температур по всем возможным высотам за конкретную выбранную точку. По оси x – значение температуры, по y – высоты.

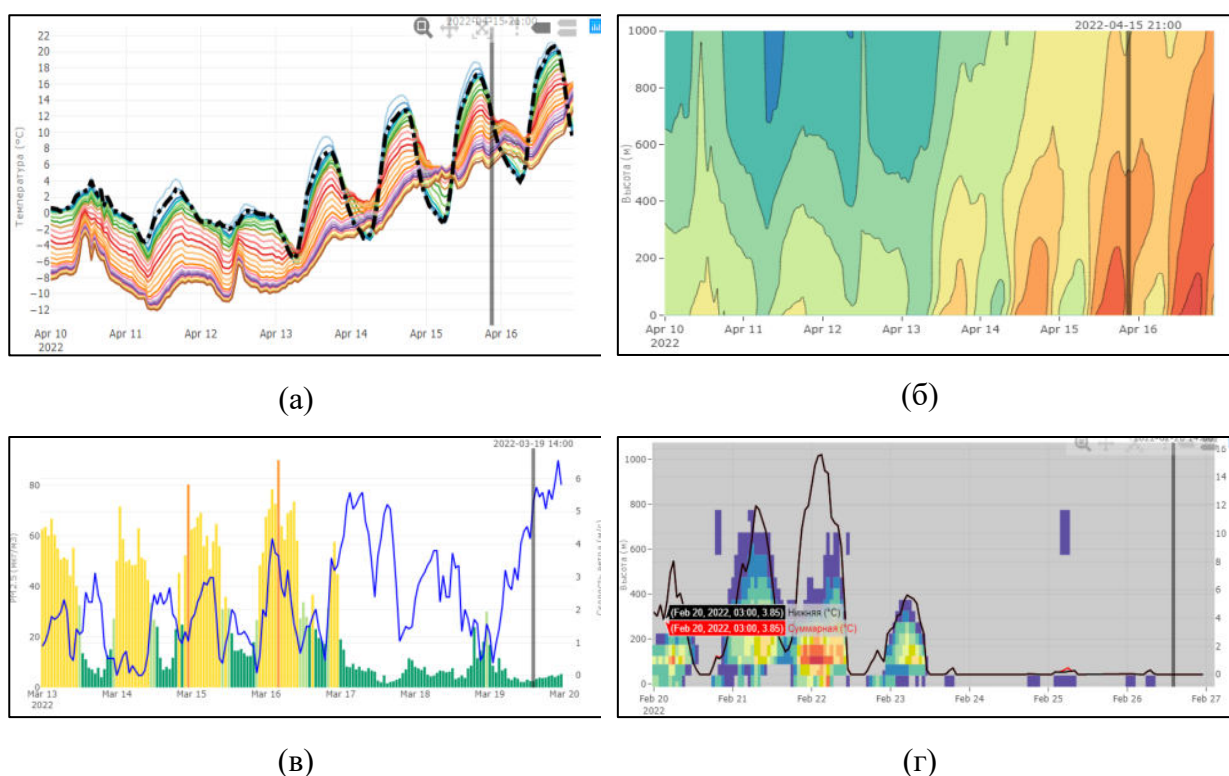


Рисунок 47 – Сформированные графики с данными профилера: термограммы (а), температура атмосферы (б), загрязнение и скорость ветра (в), температурные инверсии (г).

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 синего прямоугольника. Сверху него отображается сумма температурных инверсий за этот промежуток. На рисунке 48 показан пример профиля и температурной инверсии.

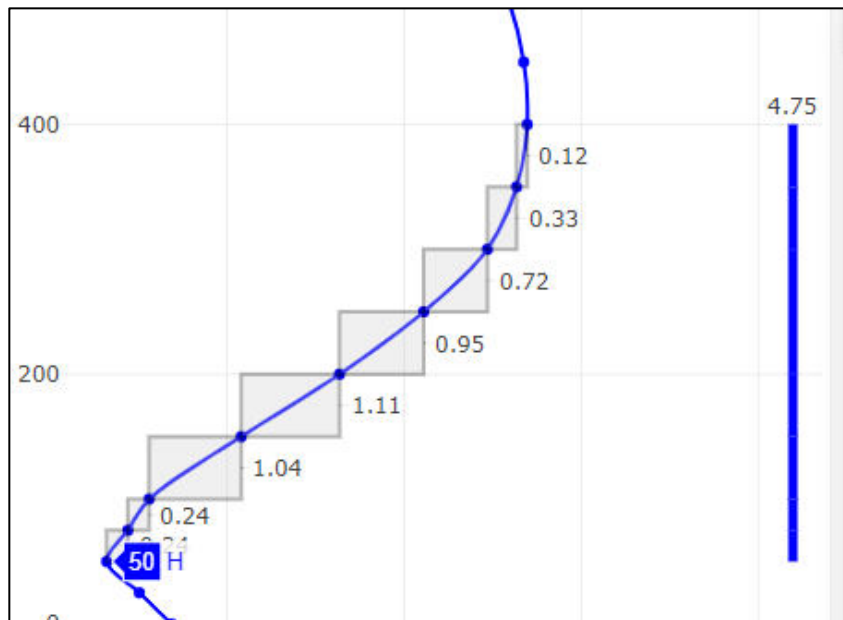


Рисунок 48 – Отображение температурной инверсии на профиле. Серыми прямоугольниками выделены температурные инверсии между высотами. Синий прямоугольник справа показывает сумму инверсий за этот промежуток.

На рисунке 49 показана аномальная температурная инверсия, которая была зафиксирована с 19 декабря 2021 г. по 30 декабря 2021 г. На данном графике можно увидеть мощность инверсии в 25 градусов, также показана приподнятая и приземная инверсия.

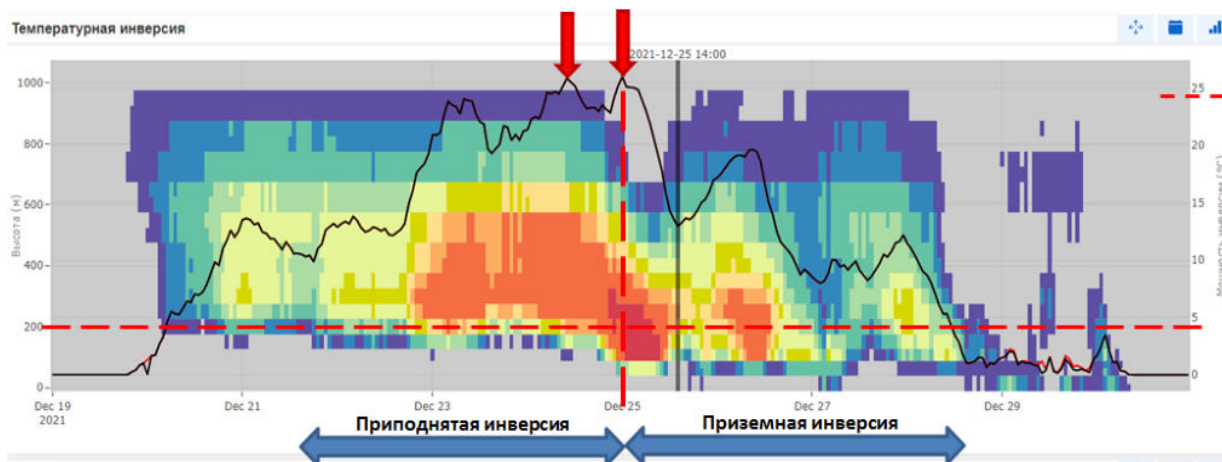


Рисунок 49 – Отображение приподнятой и приземной инверсии. Красные стрелки указывают на температурную инверсию в 25 градусов.

В результате этой работы было создано веб-приложение для отображения и анализа данных температурного профилемера. Данное веб-приложение позволяет определить типы термической устойчивости, продолжительность температурной инверсии, прохождение холодных и теплых атмосферных фронтов, и т.д. Приведены схемы работы приложения и программные модули, отвечающие за формирования данных.

Основные публикации по разделу:

- Малимонов М.И., Якубайлик О.Э. Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилемера // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 3 (31). С. 41-49. DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.004. [ВАК]
- Кадочников А.А., Малимонов М.И., Токарев А.В., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Программа аналитической обработки данных температурных профилемеров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023664585 от 05.07.2023.

2.6. Навесное оборудование и программное обеспечение для сбора и анализа данных о параметрах атмосферы с помощью БПЛА

Развитие технологий мониторинга воздуха с помощью 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 был создан прибор для измерения температуры, относительной влажности воздуха и оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью PM2.5 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 эксплуатации 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.

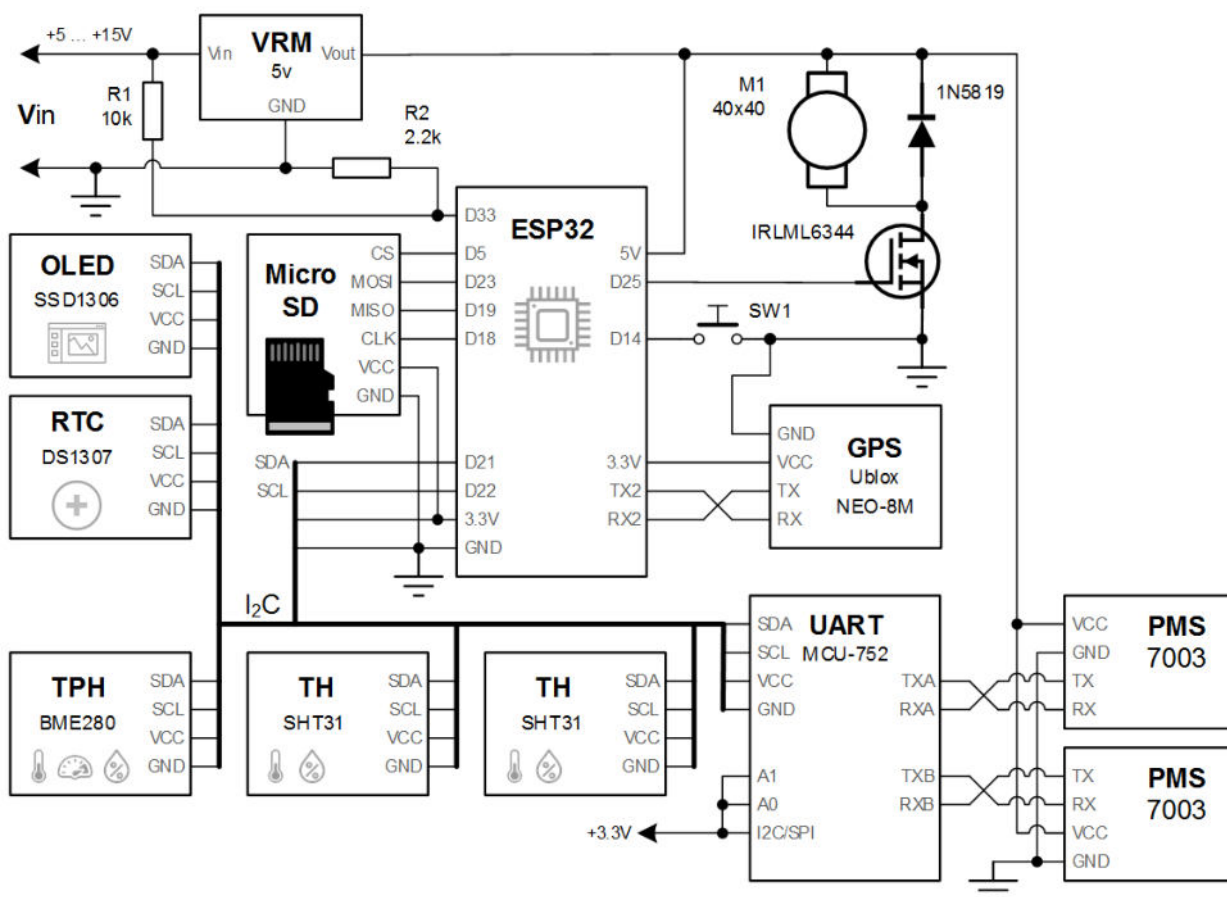


Рисунок 50 – Принципиальная схема измерительного прибора.

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 50: 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: $-40...85^{\circ}C$, давления: $300...1100 hPa$.
2. Sensirion SHT31 – высокоточный цифровой датчик температуры и влажности, чип хорошо откалиброван и линеаризован. Точность этого модуля составляет $\pm 2\% RH$ для

относительной влажности и ± 0.3 °C для температуры. Диапазон рабочих температур: -40...125°C.

3. Plantower PMS7003 – универсальный цифровой датчик для измерения концентрации взвешенных частиц PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ компании Plantower. Точность сенсора находится в пределах ± 10 мкг/м³ при концентрациях до 100 мкг/м³ и $\pm 10\%$ при концентрациях более 100 мкг/м³. Диапазон рабочих температур: -10...60°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.

Прибор собран в пластиковом корпусе размером 150×80×70 мм (Рис. 51). Для его соединения с БПЛА через стандартный разъем DGC2.0 был спроектирован и распечатан на 3D-принтере узел крепления с возможностью поворота в горизонтальной плоскости.



Рисунок 51 – Размещение прибора на квадрокоптере DJI Matrice 210.

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.

Программное обеспечение информационно-аналитической системы

Данные мониторинга, получаемые с 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 подвешенного оборудования и вспомогательной стационарной станции разработана концептуальная модель базы данных (Рис. 52). *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.

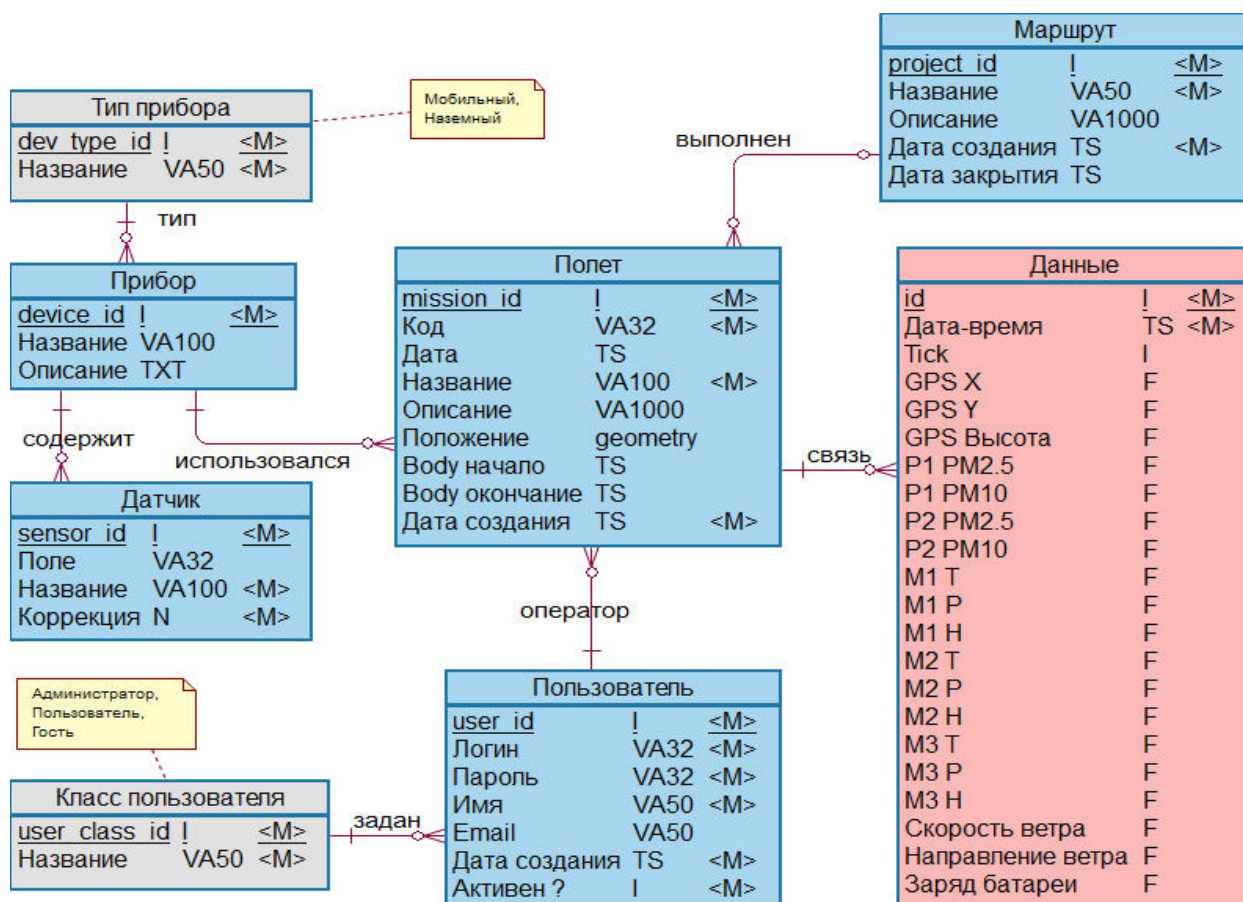
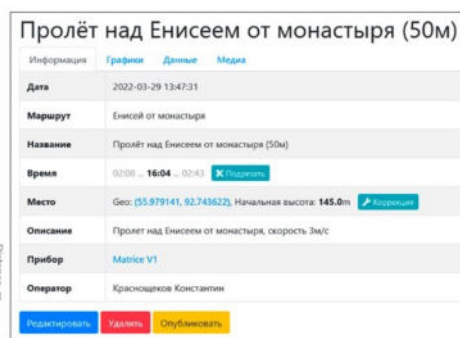
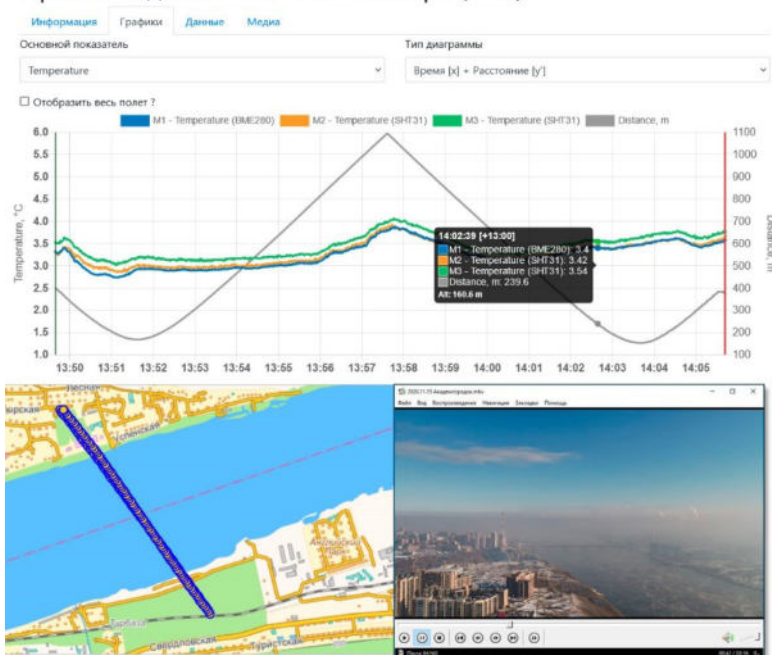


Рисунок 52 – Концептуальная модель базы данных полетов.

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*.

Информационно-аналитическая система построена в виде веб-приложения (Рис. 53) 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.

Пролёт над Енисеем от монастыря (50м)



#	Date	Calc Alt	Grn Alt	M1 H	M1 P	M1 T	M2 H	M2 P	M3 H	M3 P
1	2020-11-15 10:19:23	182,1	79,79	1008,63	-9,45	85,87	-9,08	78,99	-8,81	
2	2020-11-15 10:19:24	182,7	79,79	1008,59	-9,45	85,83	-9,07	78,98	-8,83	
4	2020-11-15 10:19:25	181,7	79,76	1008,62	-9,44	85,81	-9,07	78,98	-8,81	
5	2020-11-15 10:19:26	181,6	79,77	1008,67	-9,43	85,85	-9,06	78,98	-8,8	
6	2020-11-15 10:19:27	181,6	79,77	1008,63	-9,44	85,83	-9,04	78,99	-8,8	
7	2020-11-15 10:19:28	181,5	79,75	1008,63	-9,45	85,85	-9,08	78,99	-8,81	
8	2020-11-15 10:19:29	181,4	79,76	1008,64	-9,44	85,8	-9,03	79	-8,78	
9	2020-11-15 10:19:30	181,4	79,77	1008,61	-9,44	85,83	-9,03	78,96	-8,81	
10	2020-11-15 10:19:31	181,4	79,77	1008,64	-9,44	85,82	-9,03	78,96	-8,78	

Рисунок 53 – Элементы пользовательского интерфейса программного обеспечения для сбора и анализа данных о параметрах атмосферы с помощью БПЛА.

Основные публикации по разделу:

- Кадочников А.А. Разработка системы сбора данных для мониторинга состояния атмосферного воздуха в Красноярском крае // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2021, т. 27, № 2, с. 205-217. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-205-217.
- Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Информационно-аналитическая система "Характеристики атмосферы над акваторией р. Енисей" // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU № 2021667052 от 25.10.2021.
- Yakubailik O.E., Tokarev A.V., Kadochnikov A.A., Zavoruev V.V., Krasnoshchekov K.V., Dergunov A.V. Monitoring and assessment of the state of the atmosphere over the Yenisei riverbed using drone // CEUR Workshop Proceedings, v. 3006, 2021. pp. 384-391. DOI: 10.25743/SDM.2021.12.67.045

2.7. Программно-технологическое обеспечение для формирования архива изображений процессов туманообразования над рекой Енисей

Местные климатические условия и особенности рельефа г. Красноярска приводят к частому возникновению неблагоприятных метеорологических условий [1]. Мониторинг атмосферного воздуха в г. Красноярске ведется пятью системами наблюдения. Данные из этих

источников уже несколько лет автоматически обрабатываются и успешно накапливаются в системе научно-исследовательского мониторинга состояния окружающей среды Геопортала ИВМ СО РАН [2]. В результате формируется согласованный архив данных, вычисляются средние значения на единой временной сетке, обеспечивается интеграция с внешними приложениями через веб-сервисы [3].

Город расположен на реке Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на расстоянии 40 км от плотины. После строительства ГЭС в черте города в летнее время образуется «холодная» подстилающая поверхность, а в зимнее время «тёплая» поверхность. В результате над поверхностью реки стали формироваться адвективные туманы охлаждения летом и туманы парения зимой [4]. Делаются попытки разработать физико-математические модели аэродинамики и теплообмена атмосферного пограничного слоя, а также распространения вредных выбросов с учетом незамерзающей реки в черте города [5].

Сложный рельеф города, незамерзающая поверхность реки, наличие промышленных загрязнителей атмосферы, частный сектор в черте города с печным отоплением, особенности многоэтажной застройки значительно усложняют анализ причин формирования смога над городом. Особенно интересно зафиксировать процессы формирования туманов над рекой Енисей и периоды его существования. Для поэтапного решения этой задачи предлагается дополнить данные мониторинга атмосферного воздуха данными фотофиксации. В качестве источников данных рассматривалось несколько вариантов. Во-первых, это публичные видеорекамеры наружного наблюдения (например, cam.krk.ru), устанавливаемые в городе в основном для мониторинга автомобильного движения. Некоторые из них захватывают панорамы города и условно пригодны для визуального наблюдения за состоянием атмосферы. Во-вторых, поэтапно создается своя сеть IP-видеорекамер, расположенных в характерных точках города. В том числе, расположенных вдоль р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, для более точного выяснения условий формирования «облаков парения» над незамерзающей рекой. Для анализа данных достаточно серии растровых изображений с периодичностью в 10 минут вместо видео потока. Работа в таком режиме позволит минимизировать необходимый объем дискового пространства для архива и уменьшит время обработки самих данных.

Основные требования к техническим характеристикам IP-видеорекамер: уличное исполнение, степень защиты не хуже IP67; рабочая температура эксплуатации – от -40° до 60°С; разрешение – не хуже 2 Мп (1920×1080); поддержка технологии PoE (Power over Ethernet); наличие режима интервальной фотосъемки. Для передачи данных камера должна быть подключена к сети Интернет посредством кабеля с возможностью передавать данные в открытую сеть на выделенный сервер. Под заданные требования подходят IP-видеорекамеры Dahua

DH-IPC-HFW2230SP-S-0280B. В некоторых случаях удобно использовать поворотные видеокамеры для съемок нескольких ракурсов города с одной точки установки по расписанию, например, Dahua DH-SD5A232XB-HNR.

Разработан блок визуального мониторинга Геопортала ИВМ СО РАН, который обеспечивает сбор изображений с публичных и частных IP-видеокамер наблюдения, обработку изображений, загрузку в структурированный файловый архив и организацию доступа через веб-приложения и сервисы. Частные IP-видеокамеры настраиваются на работу в режиме интервальной фотосъемки с автоматической передачей файлов изображений во временную папку на выделенном сервере с использованием защищенного SFTP протокола. Служба обработки выполняет анализ входных изображений, преобразование разрешения, определение ракурса для поворотных видеокамер и перемещение в постоянный файловый архив. Видеопоток с городских камер видеонаблюдения обычно доступен в сети интернет на сайте. Служба загрузки по расписанию анализирует его содержимое и скачивает последнее изображение предварительного просмотра видеопотока. Далее файлы обрабатываются аналогично изображениями с частных IP-видеокамер.

Файловый архив содержит несколько уровней, для снижения нагрузки на файловую систему. Папки разделены по месяцам со следующей структурой: «</source>/<cam>/<YYYY-MM>/», где <source> - источник данных (public, private), <cam> - условный код отдельной камеры, <YYYY-MM> - папка с годом и месяцем съемки. Названия самих файлов изображений имеют следующий вид: «<cam>_<YYYY-MM-DD>_<hhmm>.jpg», где <YYYY-MM-DD> - дата, а <hhmm> - время съемки с точностью до минут.

После помещения отдельного фотоизображения в архив, выполняется его регистрация в системе научно-исследовательского мониторинга. Для этого используется инфраструктура SensorHub геопортала ИВМ СО РАН. Все камеры зарегистрированы как отдельные площадки наблюдения, указаны координаты размещения на карте и направление съемки. Факт загруженного изображения сохраняется как значение показателя «наличие файла» на указанную дату-время. Прикладной интерфейс на основе веб-сервисов был расширен добавлением запроса на получение файла изображения из архива.

Сделан прототип приложения (рис. 54) для навигации по архиву и просмотра собранных данных в концепции одностраничного веб-приложения (single-page application, SPA). Используется одна HTML-страница, которая обеспечивает взаимодействие с пользователем через динамически формируемый интерфейс путем манипуляций с DOM-структурой документа. Разработка выполнена на базе фреймворка для создания пользовательских интерфейсов Vue 3 [6] и языке программирования TypeScript.

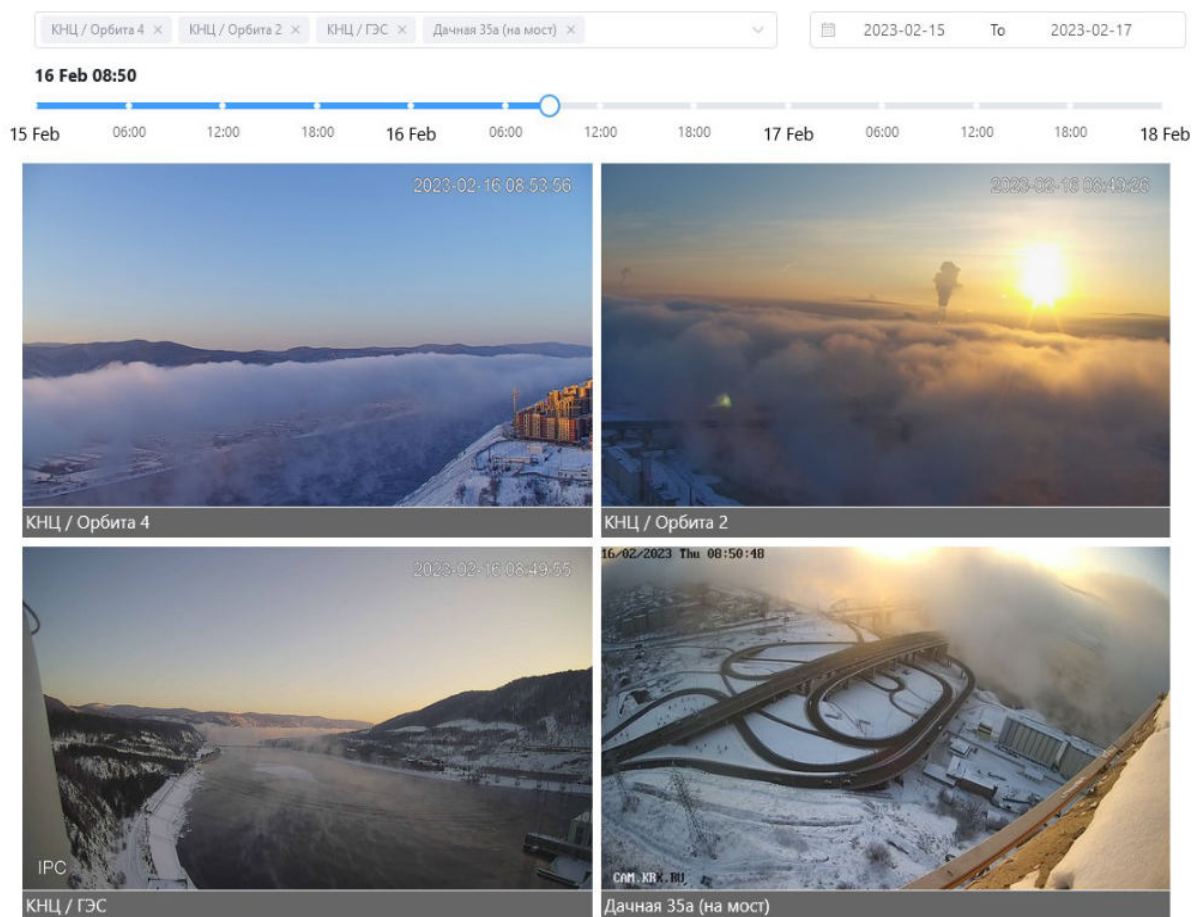


Рисунок 54 – Элементы пользовательского интерфейса системы.

Реализовано два режима визуализации архива данных: «пространственная динамика» и «суточная динамика». В режиме «пространственная динамика» одновременно выводятся изображения с нескольких камер на заданный момент времени, что дает возможность проследить состояние атмосферы в разных районах города. Интерфейс пользователя (рис. 54) позволяет выбрать список отображаемых веб-камер и период времени. Конкретный момент в рамках периода выбирается «слайдером» с шагом в 10 минут. При перемещении бегунка интерактивно обновляются изображения с каждой камеры.

Режим «суточная динамика» (рис. 55) предназначен для быстрого анализа природных явлений за продолжительный период времени (неделя, месяц). Для этого одновременно выводятся изображения с одной камеры по отдельным дням в указанное время. Пользователь выбирает камеру и задает период времени. Момент времени в интервале от 00:00 до 24:00 выбирается «слайдером» с шагом в 10 минут. При щелчке мышью на изображении открывается его увеличенный вариант во всплывающем окне. Веб-приложение построено с применением адаптивного дизайна, в зависимости от выводимого количества элементов макет страницы динамически подстраивается. Кроме этого учитывается пользовательский размер

экрана и тип браузера, что дает комфортную визуализацию на различных устройствах (монитор, планшет, телефон).

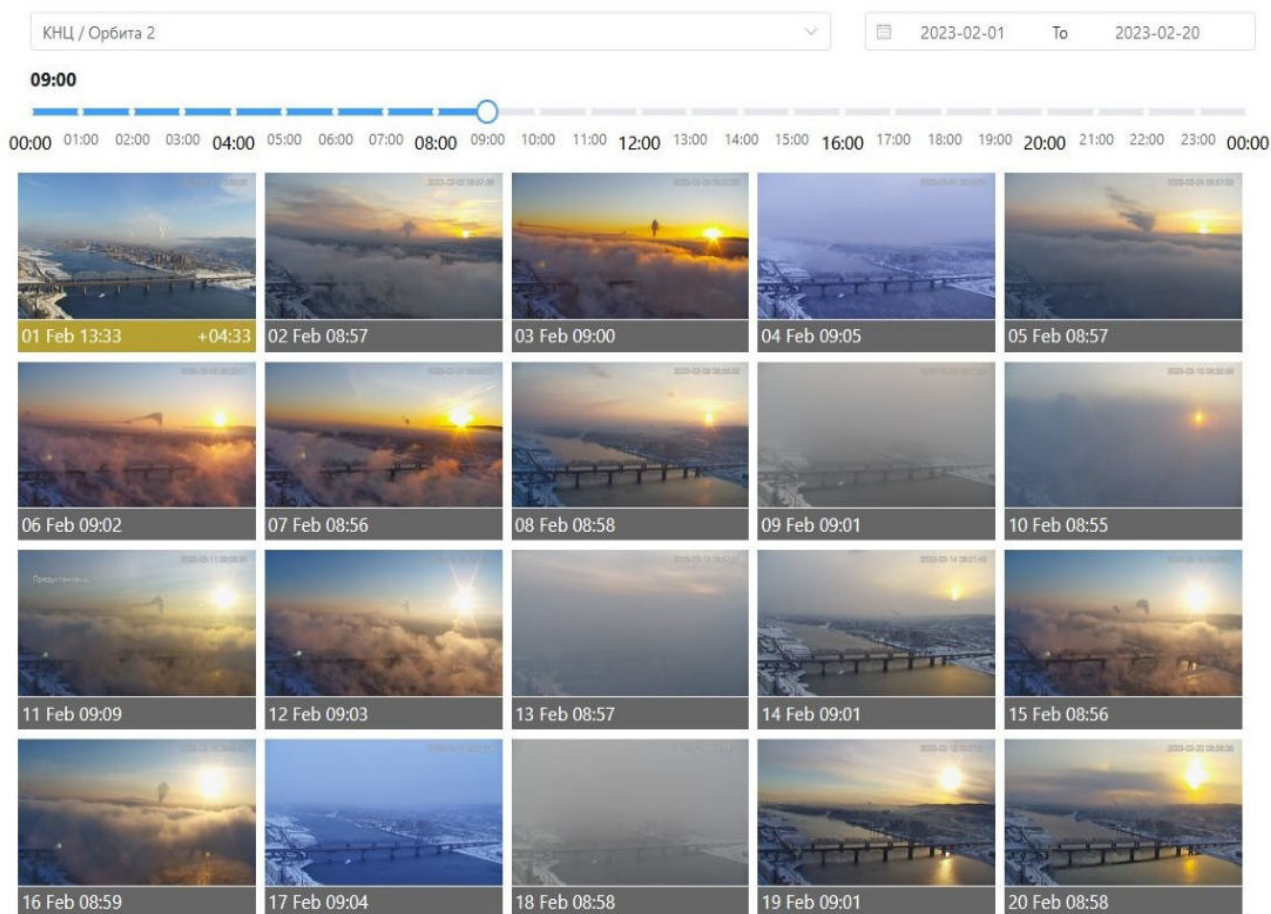


Рисунок 55 – Пользовательский интерфейс системы (суточная динамика).

Для комплексного анализа данных о состоянии окружающей среды г. Красноярска доработан блок научно-исследовательского мониторинга геопортала ИВМ СО РАН. Создано программно-технологическое обеспечение, решающее задачу автоматического формирования архива фотографий атмосферы города с различных ракурсов. Набор источников данных постоянно дополняется. В настоящее время данные собираются с 30 публичных городских камер видеонаблюдения и трех камер ИВМ СО РАН, включая одну поворотную, установленную на телебашне. Собрано порядка 1.5 млн изображений общим объемом более 500Гб.

На основе собранных данных планируется установить закономерности формирования облаков (туманов) парения над руслом Енисея с целью изучения влияния полыньи на качество воздуха в Красноярске. Накопленный архив дает хорошую основу для разработки алгоритмов автоматической классификации изображений с применением технологий искусственного интеллекта [7], направленных на выделение задымленности, тумана, снега.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Швер Ц.А., Герасимова А.С. Климат Красноярска. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.
2. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(3), с. 243-249
3. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A. V. Development of computational technologies and software for assessment of air pollution in Krasnoyarsk // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2018. T. 211. С. 012080.
4. 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, № 5. с. 397–401.
5. Hrebtov M., Hanjalić K. Numerical Study of Winter Diurnal Convection Over the City of Krasnoyarsk: Effects of Non-freezing River, Undulating Fog and Steam Devils // Boundary-Layer Meteorol. Springer Netherlands, 2017. Т. 163, № 3. с. 469–495.
6. Hanchett E., Listwon B. Vue.js in Action. Manning, 2018. 304 с.
7. Фаворская М.Н., Пятаева А.В. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно-временных локальных бинарных шаблонов // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1(80). с. 16–25.

Основные публикации по разделу:

- Tokarev A., Zavoruev V., Kadochnikov A., Yakubailik O., Malimonov M. Development of software for creating an archive of images of fogging processes over the Yenisei River // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803N. DOI: 10.1117/12.2691008 [Scopus]
- Токарев А.В., Заворуев В.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Малимонов М.И. Разработка программно-технологического обеспечения для формирования архива изображений процессов туманообразования над рекой Енисей // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами", Москва, 26-30 июня 2023. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. с. 62-65.

2.8. Результаты исследований вертикального распределения концентрации аэрозольных частиц в атмосфере при температурной инверсии

Высокие концентрации твердых взвешенных частиц размером до 2,5 мкм (PM_{2,5}) в приземной атмосфере г. Красноярска наблюдаются при инверсии температуры и скорости

ветра менее 0,5 м/с [1, 2]. Взвешенные частицы выбрасываются в воздушную среду как низкими источниками (автономное теплоснабжение, автотранспорт), так и высокими (трубы ТЭЦ). Однако, измерения концентрации $PM_{2,5}$ осуществляются, как правило, на высотах от 2,5 до 4 м от земной поверхности. Характер вертикального распределения твердых и/или аэрозольных частиц в атмосфере г. Красноярска практически не изучен. Ниже рассматриваются результаты измерения вертикальных профилей концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$, температуры и относительной влажности в условиях температурной инверсии в атмосфере.

Вертикальное зондирование осуществляли с помощью квадрокоптера Matrice 210, на котором было размещено навесное оборудование для измерения параметров воздушной среды [3] и аппаратура для видеофиксации смогового и дымового загрязнения; подобный подход стал сейчас популярным [4-7]. Точка старта БПЛА располагалась в районе Академгородка (Красноярск), высота над уровнем моря 256,3 м. Зондирование атмосферы осуществляли во время спуска квадрокоптера со скоростью 1 м/с с высоты 500 м.

Концентрацию аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ измеряли с помощью датчика Plantower PMS7003. Точность датчика находится в пределах ± 10 мкг/м³ при концентрации до 100 мкг/м³ и $\pm 10\%$ при концентрации более 100 мкг/м³ (Рис. 56).

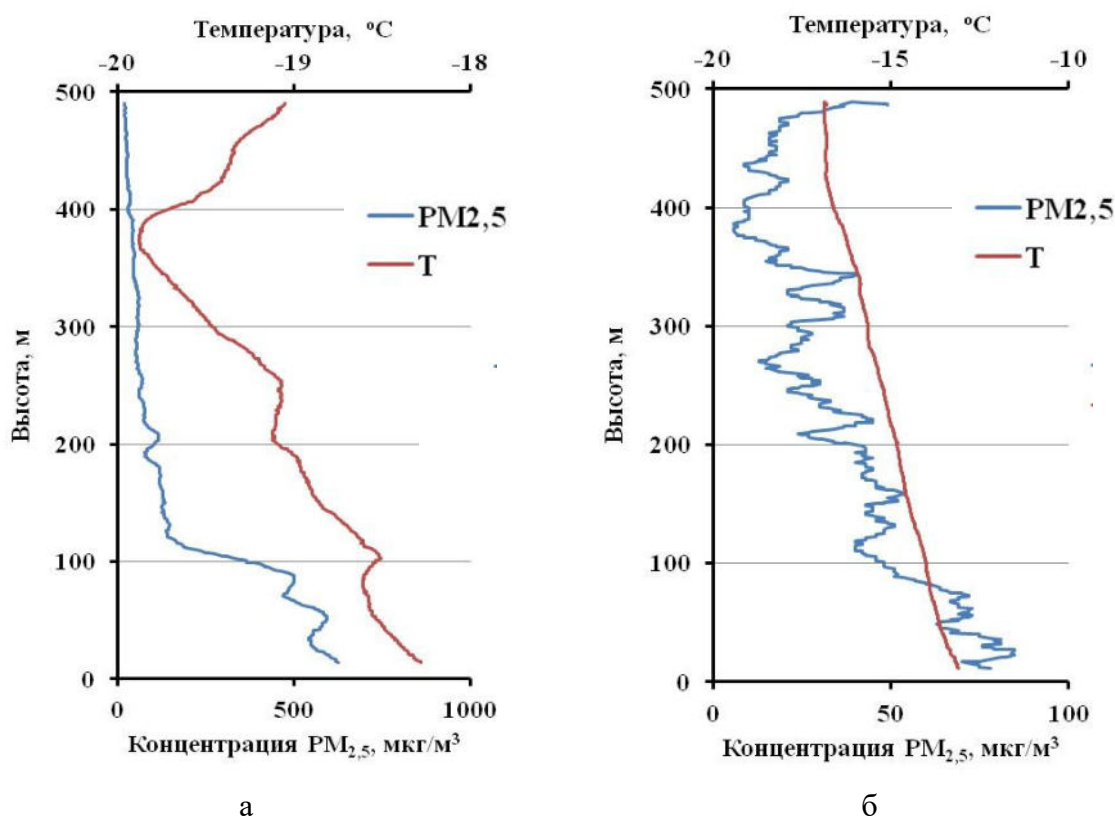


Рисунок 56 – Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и температуры воздуха при наличии (а) и отсутствии (б) атмосферной температурной инверсии. Начало измерения: 2022-12-15 в 14:06:58 (а); 2022-12-16 в 10:49:34 (б).

В результате многочисленных измерений установлено, что концентрация $PM_{2,5}$ уменьшается с высотой при отсутствии (Рис. 56б) или наличии приподнятой (Рис. 56а) и приземной (Рис. 56в) температурной инверсии. При наличии инверсии концентрация аэрозольных частиц вблизи земной поверхности возрастала более чем в 6 раз (Рис. 56 и 57в).

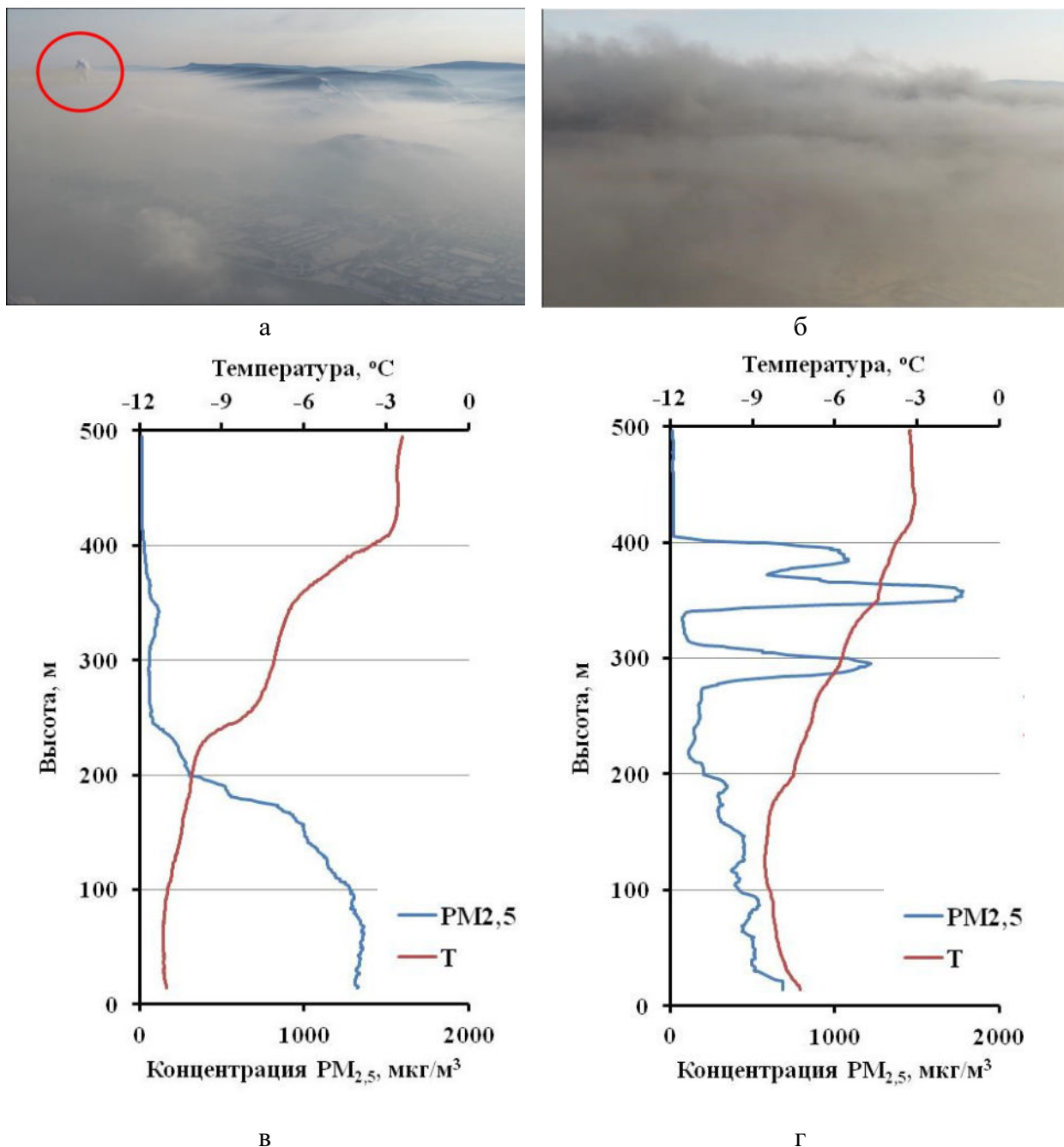


Рисунок 57 – Вид с квадрокоптера верхней границы вертикального распределения аэрозольных частиц при температурной инверсии до возникновения пожара (а) и во время пожара (б); вертикальное распределение аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и температуры воздуха до пожара (в) и во время пожара (г). Начало измерения: 2023-02-22 в 11:01:10 (а, в); 2023-02-22 в 13:31:30 (б, г).

Приземная температурная инверсия препятствует рассеиванию аэрозоля и дыма не только от автономных источников теплоснабжения (печи и котлы частных домовладений), но и высотных труб ТЭЦ. На рисунке 57а в красном кружке показана ситуация, когда выбросы из трубы ТЭЦ 2 высотой 180 м (369 над уровнем моря) не могут «пробить» инверсионный слой, и взвешенные частицы рассеиваются практически параллельно поверхности земли. Расстояние между точкой старта БПЛА и основанием трубы около 8,8 км. В этом момент в Академгородке мощность инверсии была около 9°C, наибольшие концентрации аэрозольных частиц PM_{2.5} наблюдались в слое 14-60 м, а на высотах от 100 до 200 м их содержание уменьшалось в 4 раза (Рис 57в). Возможно, что выбросы ТЭЦ 2 загрязняли воздушную среду Академгородка. В пользу этого предположения свидетельствует следующий факт. Через час после проведения измерений, результаты которых показаны на рисунке 57а,в, на направлении «точка старта БПЛА – труба ТЭЦ 2» возник пожар. Расстояние от стартовой точки до очага пожара (площадью возгорания около 12500 м²) составило 3,1-3,2 км. Дым распространялся в сторону Академгородка (Рис. 58). Вертикальное зондирование атмосферы, выполненное с помощью БПЛА, показало загрязнение атмосферы в слое 280-400 м до величин 1777 мкг/м³, в то время как у поверхности земли концентрация PM_{2.5} была около 685 мкг/м³ (Рис. 57г). Температурная инверсия препятствовала вертикальному распространению дыма. Это хорошо видно на фото (Рис. 57б). Следует отметить, что фотографии, представленные на рисунке 57а и 57б, сделаны с одной и той же точки (на высоте 500 м) в одном направлении. Таким образом, характер распространения дыма от пожара косвенно свидетельствует о возможном загрязнении атмосферы Академгородка выбросами ТЭЦ 2.

Следует отметить, что 2023-02-22 за 2,5 часа (между первым и вторым полетами БПЛА) воздух в слое 400-500 м стал холоднее на 0,23÷0,83 °С, а на высотах 100, 200 и 300 м атмосфера прогрелась на 2,59, 2,60, 1,36 °С, соответственно.

Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц PM_{2.5} и относительной влажности показано на рисунке 59. Коэффициент корреляции между этими параметрами при отсутствии инверсии (Рис. 59а) равен 0,88, в условиях инверсии (Рис. 59б) равен 0,89, а при пожаре в условиях инверсии (Рис. 59в) он не превышает 0,15.

Анализ вертикальных профилей температурных инверсий и концентраций аэрозольных частиц PM_{2.5}, полученных в 2022-2023 годах, не позволил найти объяснение факту формированию горизонтальных фронтов (Рис. 57а), в границах которых наблюдается резкое снижение содержания аэрозоля. Вероятно, для этого надо знать температуру на источнике выбросов аэрозольных и дымовых частиц. Кроме того, необходимо исследовать ветровые потоки выше слоя температурной инверсии.

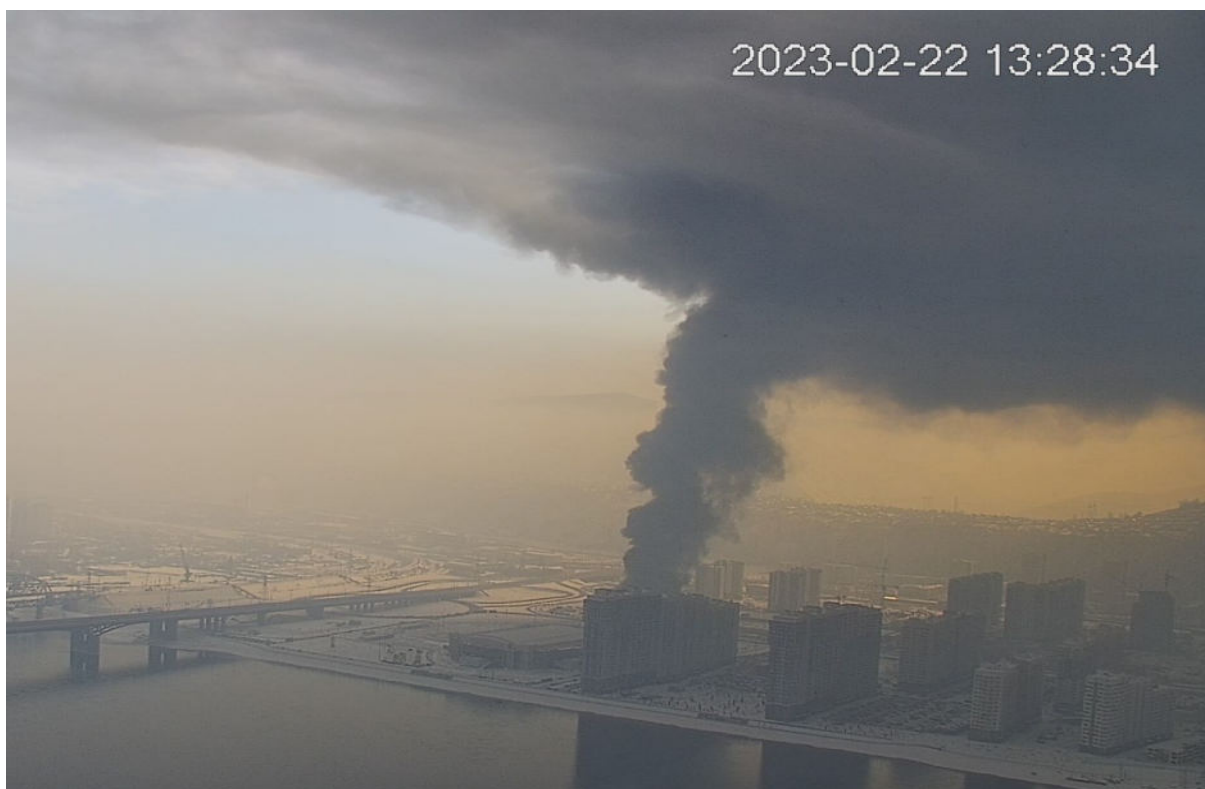


Рисунок 58 – Распределений дыма пожара при температурной инверсии в атмосфере. Фото сделано камерой, размещенной на телебашне Красноярского краевого радиотелевизионного передающего центра (расположена на уровне ~213 м над р. Енисей).

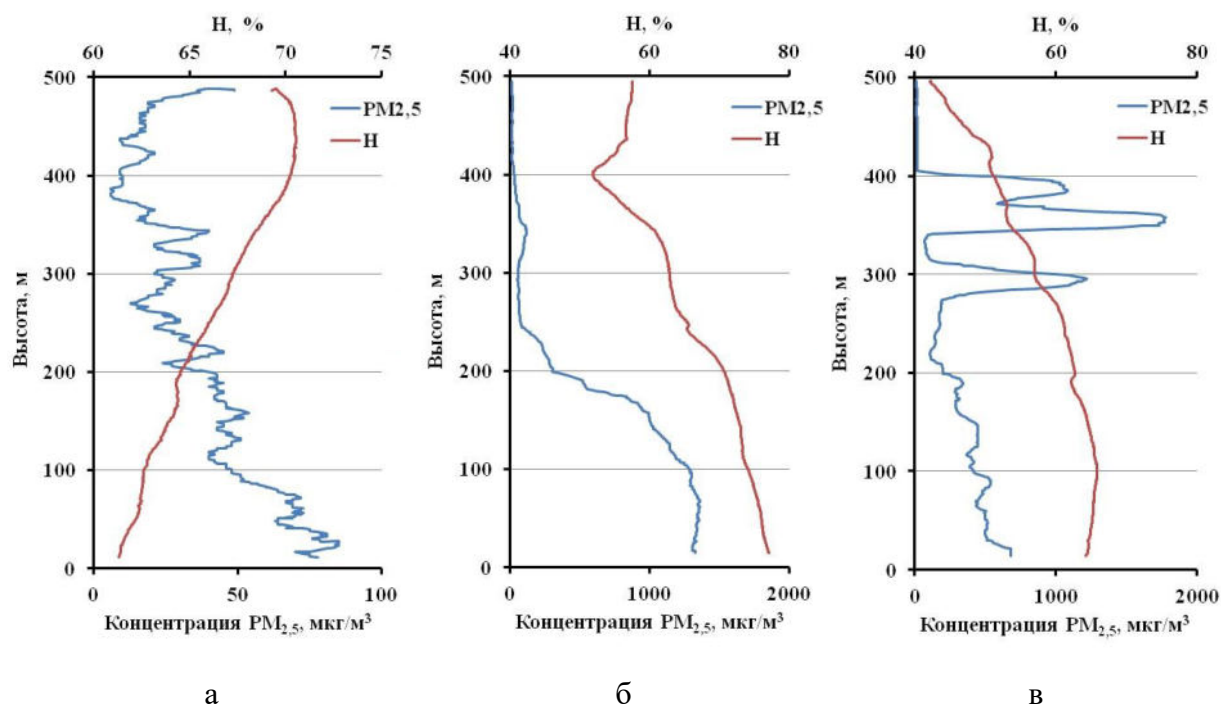


Рисунок 59 – Вертикальное распределение аэрозольных частиц PM2.5 и относительной влажности воздуха (H) без температурной инверсии (а) и при её наличии (б, в).

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Yakubailik O., Tokarev A., Kadochnikov A., Zavoruev V., Krasnoshchekov K., Dergunov A. Monitoring and assessment of the state of the atmosphere over the Yenisei riverbed using drone // Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes. 2021. P. 384-391. DOI:10.25743/SDM.2021.12.67.045.
2. Tokarev A., Shaparev N. The influence of weather conditions on the concentration of pm2.5 in the surface layer of the atmosphere of Krasnoyarsk // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. № 862. P. 062040. DOI:10.1088/1757-899X/862/6/062040.
3. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Concentration of PM2,5 in the surface layer of the Krasnoyarsk atmosphere during the winter anticyclone // Proc. SPIE. 2019. № 11208. P. 112084J. DOI: 10.1117/12.2540744.
4. Abarca M., Saito C., Angulo A., Paredes J., Cuellar F. Design and development of an hexacopter for air quality monitoring at high altitudes // 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2017. Xi'an, China, p. 1457-146.
5. Singh D., Dahiya M., Kumar R., Nanda C. Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review // Journal of Environmental Management. 2021, 289, 112510.
6. Crosman E., Jacques A., Horel J. A novel approach for monitoring vertical profiles of boundary-layer pollutants: Utilizing routine news helicopter flights // Atmospheric Pollution Research. 2017. 8(5), pp. 828-835.
7. Abdelrhman M., Balkis A., Abou-Elmour A., Tarique M. Environmental Monitoring System by Using Unmanned Aerial Vehicle // Network Protocols and Algorithms. 2018. 9(3-4), 31.

Основные публикации по разделу:

- Zavoruev V., Yakubailik O., Tokarev A., Dergunov A., Krasnoshchekov K., Sokolova O. Vertical distribution of aerosol particle concentration in the atmosphere at temperature inversion // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803P. DOI: 10.1117/12.2691013. [Scopus]
- Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Соколова О.В., Краснощекков К.В., Дергунов А.В. Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц в атмосфере при температурной инверсии // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами", Москва, 26-30 июня 2023. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. с. 389-392.

2.9. Результаты сравнительного анализа концентрации взвешенных частиц PM_{2.5} в Красноярске над территорией города и акваторией незамерзающей реки Енисей

Во многих городах мира с конца восьмидесятых годов прошлого тысячелетия стал осуществляться мониторинг аэрозольного загрязнения атмосферы. К двадцатым годам нынешнего XXI-го века был собран большой набор данных, который позволил проанализировать долговременные тренды изменений среднегодовых концентрации PM_{2.5} в приземном слое городской воздушной среды, выявить основные факторы, определяющие загрязнение. Исследования выполнялись в разных странах, регионах.

В результате наблюдений были определены сезонные, суточные и пространственные распределения концентраций взвешенных частиц, выявлена взаимосвязь с географическими, природно-климатическими характеристиками. Было определено, что в разных регионах мира наблюдаются разнонаправленные тренды. В Китае, например, на долю промышленного сектора приходится в среднем 50% выбросов PM_{2.5} [1]. Жилой сектор является вторым по величине источником PM_{2.5} с вкладом около 36–41% [2], на выбросы транспортных средств и других источников загрязнения воздушной среды – приблизительно 9–14% [3]. Наиболее высокие концентрации PM_{2.5} всегда наблюдаются в холодное время года. В эти периоды содержание PM_{2.5} в приземной атмосфере было в два раза выше, чем в теплые сезоны [4]. В последнее десятилетие самое существенное снижение загрязнения атмосферы произошло в восточной части США, Европе и Японии. Однако, в 65% городских районов мира, в частности на Ближнем Востоке, в странах Африки к югу от Сахары и Юго-Восточной Азии, наблюдалось увеличение среднегодовых концентраций PM_{2.5}. Наибольшее увеличение произошло в городских районах в Индии и Бангладеш [5].

В масштабах больших городов и мегаполисов пространственное загрязнение приземной атмосферы обычно неоднородное [6]. Неравномерное распределение источников выбросов и влияние метеорологических условий приводят к тому, что в разных зонах города наблюдаются очень различные уровни концентраций загрязняющих веществ в воздухе, в том числе PM [7]. Кроме того, на пространственное распределение PM оказывают влияние морфологические характеристики города [8].

В этом контексте особой интерес представляет анализ пространственной неоднородности загрязнения атмосферы Красноярска, сравнительной оценке величин концентраций PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией города и над акваторией р. Енисей. Территория города разделена рекой 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 реки не оценивалось с момента строительства Красноярской ГЭС.

Для исследования воздушной среды над р. Енисей на островах Молокова и Татышева было создано два автоматизированных поста непрерывного мониторинга воздуха, обозначенные на рисунке 60 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 PM_{2.5} 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. 60).

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.

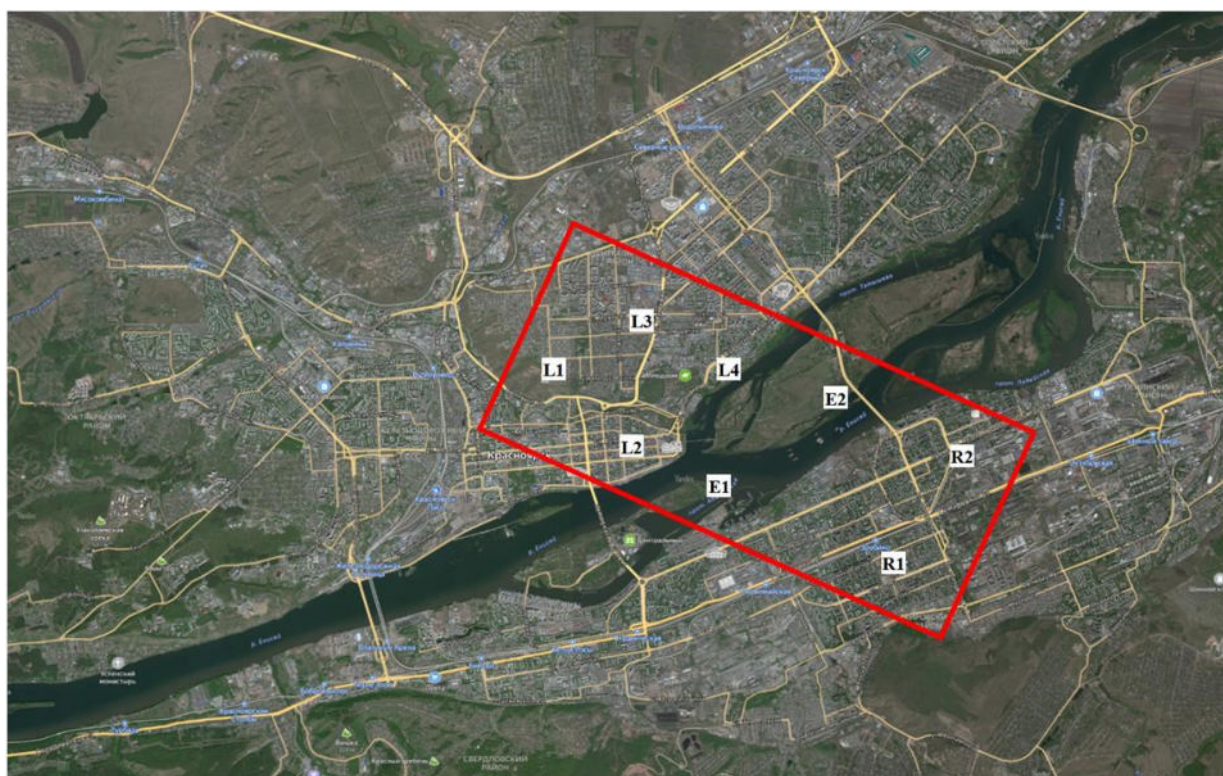


Рисунок 60 – Схема расположения постов мониторинга PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей (E1 и E2), на левом (L1-L4) и правом (R1 и R2) берегах.

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 также 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). Анализ данных 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.

На рисунках 61, 62 представлены данные по концентрациям PM_{2.5} над акваторией реки и суши (левый и правый берег) в январе 2021 и 2022 гг.

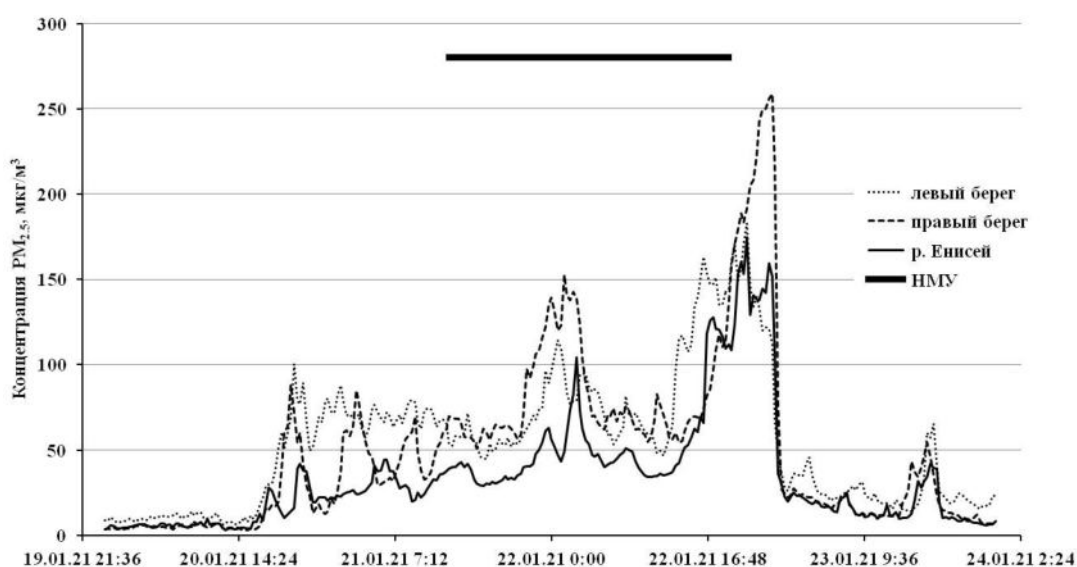


Рисунок 61 – Изменение усредненных двадцатиминутных концентраций PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегу в период 19-24 января 2021 г.

Для рядов концентраций PM_{2.5}, представленных на рисунках 61 и 62, были рассчитаны коэффициенты корреляций (табл. 3). 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 вышесказанного для дальнейшего анализа среднюю концентрацию PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией города рассчитывали по данным шести постов L1-L4 (левый берег) и R1, R2 (правый берег).

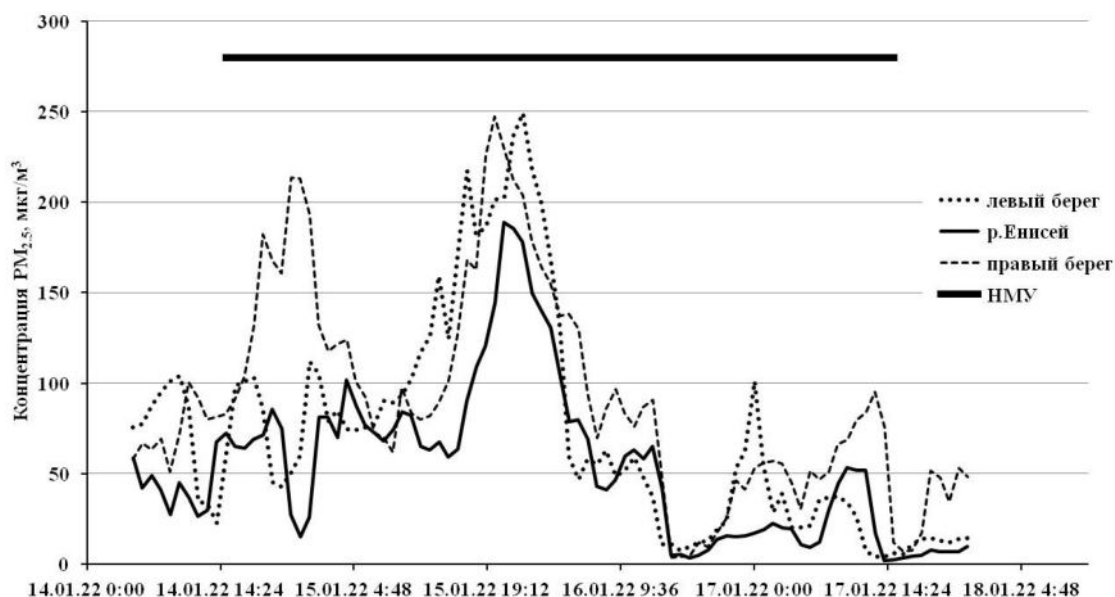


Рисунок 62 – Изменение усредненных часовых концентрация PM2.5 в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегу в период 14-18 января 2022 г.

Таблица 3. Корреляция концентраций PM2.5 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 PM2.5 над Енисеем и прилегающих к нему с обеих сторон территорий г. Красноярска были выполнены следующим образом. Двадцатиминутные концентрации PM2.5, 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 PM2.5 и доверительные погрешности ($P=0,95$). Аналогично рассчитывали среднесуточные и среднемесячные концентрации PM2.5, используя для этого, соответственно, часовые и суточные измерения.

Средние двухчасовые концентрации PM2.5 в воздушной среде над акваторией р. Енисей и над территорией города в период 21-23 января 2021 г. показаны на рисунке 63. Видно, что загрязнение атмосферы над руслом реки меньше, чем над городом, и для подавляющего числа измерений эти различия статистически достоверно различаются.

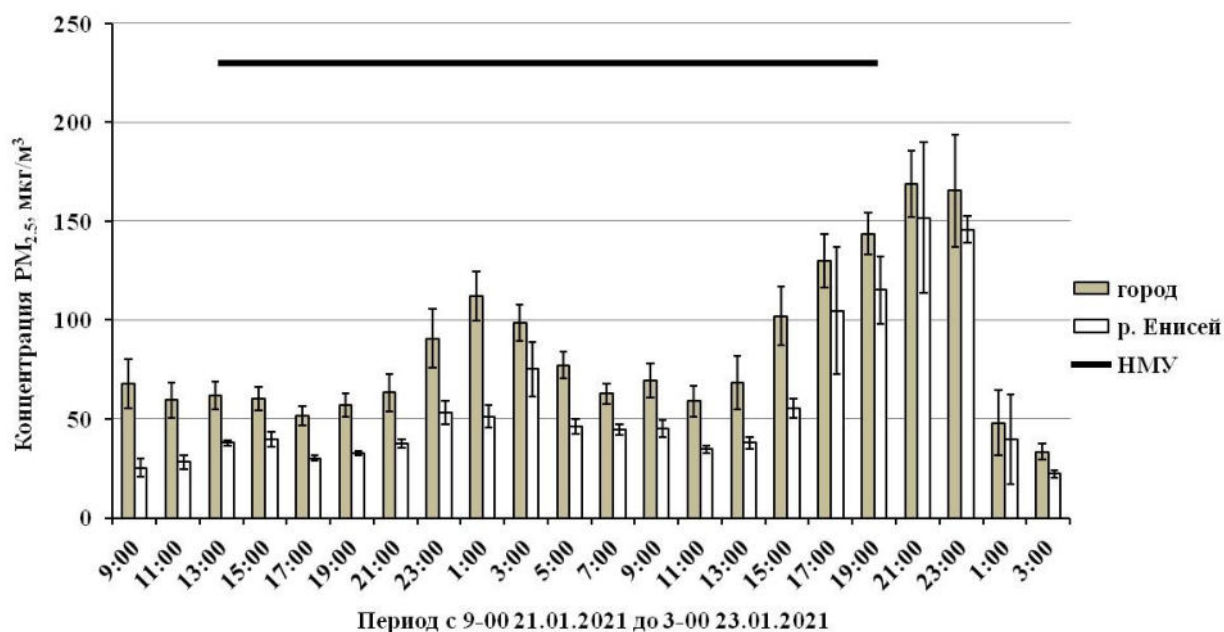


Рисунок 63 – Изменение двухчасовых концентрация PM_{2.5} в воздушной среде над акваторией р. Енисей и над территорией города в период 21-23 января 2021 г.

Согласно официальным сообщениям Среднесибирского УГМС в январе 2021 года на территории г. Красноярска 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. 64). 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. 64). При использовании двухчасовых концентраций PM_{2.5} (Рис. 63) это различие не так однозначно. Следовательно, среднесуточное усреднение сглаживает двухчасовые флуктуации концентраций PM_{2.5}.

Двухлетняя динамика среднемесячных концентраций PM_{2.5} показана на рисунке 59.

Анализ представленных (Рис. 65) 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.

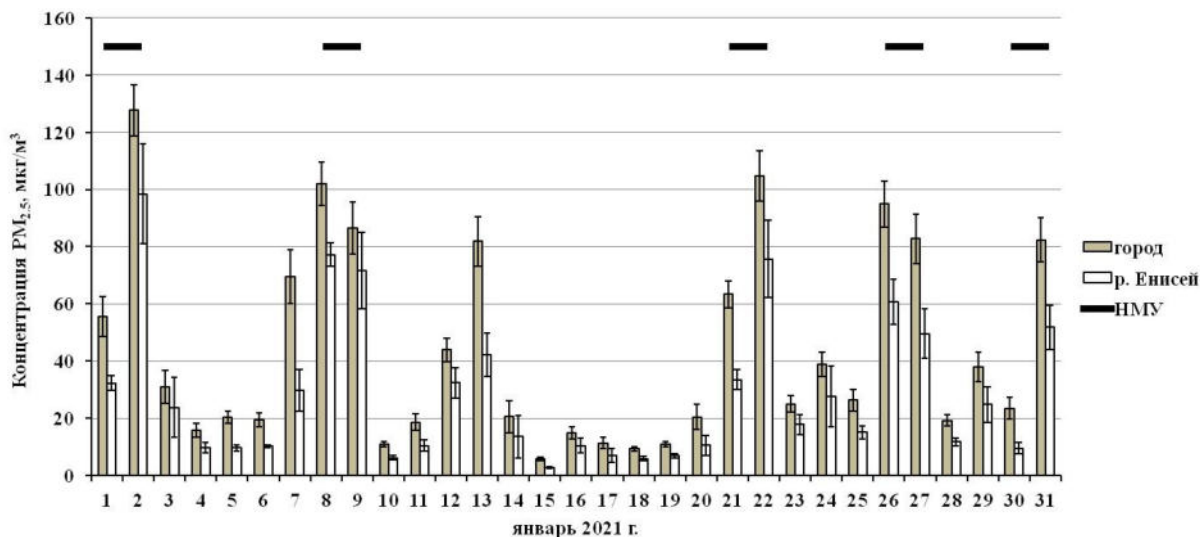


Рисунок 64 – Среднесуточные концентрации PM_{2,5} в приземной атмосфере над рекой Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска в январе 2021 г. Черные горизонтальные линии обозначают периоды НМУ.

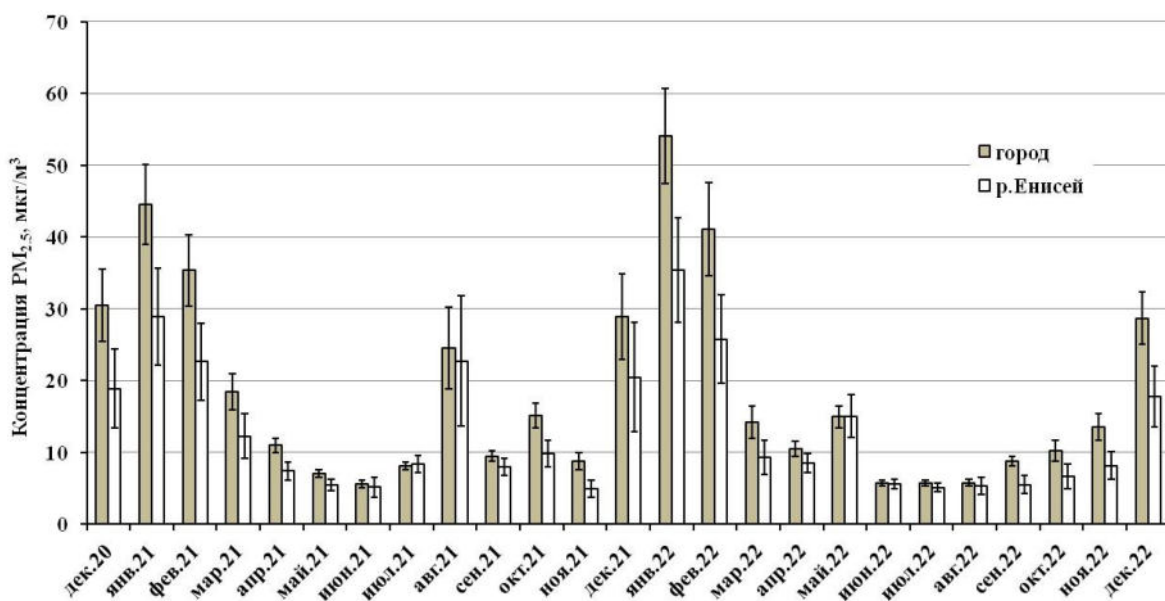


Рисунок 65 – Среднемесячные концентрации PM_{2,5} в приземной атмосфере над акваторией незамерзающей реки Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска.

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. 66).

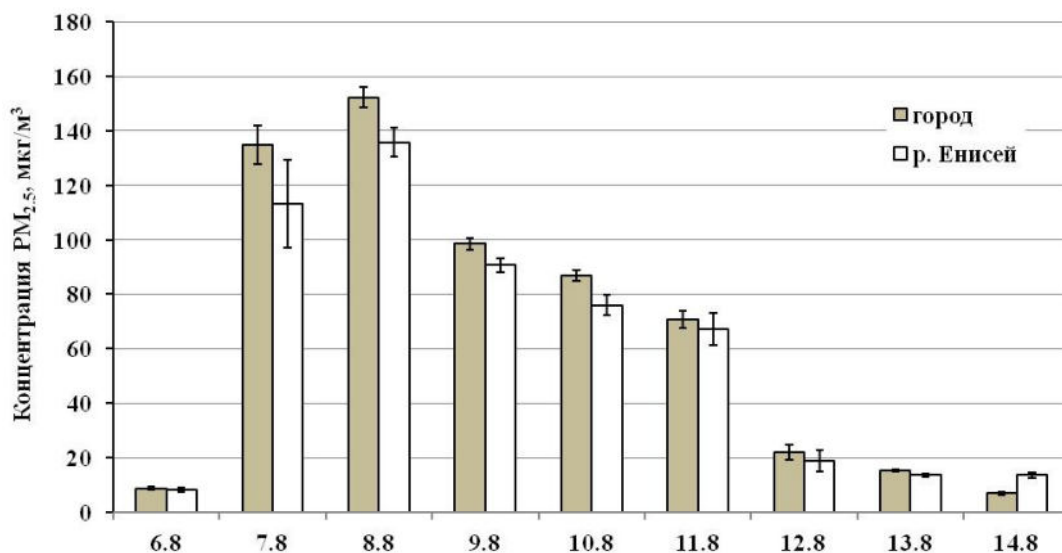


Рисунок 66 – Среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере над рекой Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярска.

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.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Li M., Liu H., Geng G., Hong C., Liu F., Song Y., Tong D., Zheng B., Cui H., et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review // Natl Sci. Rev. 2017. V. 4. P. 834–866.
2. Zheng B, Tong D., Li M., Liu F., Hong C., Geng G., Li H., Li X., Peng L., Qi J., et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 14 095–14 111.
3. Zheng M, Yan C, Zhu T. Understanding sources of fine particulate matter in China // Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2020. V. 378. N. 2183. P. 20190325.
4. Fontes T., Li P., Barros N., Zhao P. Trends of $PM_{2.5}$ concentrations in China: a long term approach // J. Environ. Manag. 2017. V. 196. P. 719-732.
5. Singh V., Singh S., Biswal A. Exceedances and trends of particulate matter ($PM_{2.5}$) in five indian megacities // Sci. Total Environ. 2021. V. 750. P. 141461.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141461

6. Xu X., Zhang T. Spatial-temporal variability of PM_{2.5} air quality in Beijing, China during 2013–2018 // J. Environ. Manag. 2020. V. 262. P. 110263.
7. Díaz J.J., Mura I., Franco J.F., Akhavan-Tabatabaei R. aiRe-A web-based R application for simple, accessible and repeatable analysis of urban air quality data // Environ. Model. Softw. 2021. V. 138. P. 104976.
8. Kokkonen T.V., Xie Y., Paasonen P, et al. The effect of urban morphological characteristics on the spatial variation of PM_{2.5} air quality in downtown Nanjing // Environ. Sci. Atmos. 2021. V. 1, N 7. P. 481-497.

Основные публикации по разделу:

- Zavoruev V.V., Sokolova O.V., Zavorueva E.N., Yakubailik O.E. Concentration of PM_{2.5} in the Surface Atmosphere over the Territory of Krasnoyarsk and the Water Area of the Non-Freezing Patch of the Yenisei River // Atmospheric and Oceanic Optics, 2023, Vol. 36, No. 6, pp. 663-669. [Scopus Q3, WoS]
- Zavoruev V., Yakubailik O., Sokolova O., Zavorueva E. Concentration of PM_{2.5} in the surface atmosphere of the Yenisei riverbed section (within the city of Krasnoyarsk) in the winter period of 2022-2023 // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803O. DOI: 10.1117/12.2691010. [Scopus]

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

3.1. Анализ методов организации информационного пространства данных мониторинга

Опыт реализации комплексной системы мониторинга природно-техногенной безопасности в Красноярском крае и других регионах страны показал, что эффективное управление территориями обеспечивается путём организации единого информационного пространства на основе межведомственного взаимодействия. Разная степень автоматизации ведомств, отсутствие стандартов, регулирующих форматы, регламенты и безопасность информационного взаимодействия приводят к необходимости использования разных видов доступа к данным. Выделим несколько степеней доступности данных мониторинга –

1. Собственная сеть источников информации, включающая измерительную аппаратуру, формализованный сбор донесений и отчётов.
2. Доступ к информационным ресурсам в рамках межведомственного информационного обмена через шлюзы API, связь СУБД по типу «издатель – подписчик».
3. Ограниченный доступ к веб-ресурсам. Ведомство предоставляет удалённый доступ к данным и сервисам, но не уведомляет о трансформации портала и представлений данных.
4. Публичный доступ к веб-ресурсам с возможностью применения процедур ETL (извлечение, преобразование, загрузка данных). При этом контроль качества данных реализуется после загрузки данных.
5. Данные по запросу. Ведомство предоставляет выгрузку актуальных данных на нерегулярной основе.
6. Данные собираемые, но не доступные для информационной поддержки управления. Межведомственный информационный обмен доступен только на коммерческой основе.
7. Недоступные данные, для которых имеются технологии сбора. Актуально для случаев необходимости расширения сетей мониторинга.
8. Недоступные данные, для которых требуется разработка новых технологий и методов сбора. Например, социологический мониторинг с гарантированным доверием к результатам, применяемый для исследования влияния человеческого фактора на вероятность и масштабы ЧС и других опасных событий.

Региональные и отраслевые программы цифровизации управления акцентируют внимание на способах 1 и 2 с перспективой развития направлений 7 и 8. В настоящее время широко распространён способ № 5. Ведомства даже при наличии формализованных данных

предоставляют информацию в виде отчётных форм, предназначенных для решения внутренних задач, зачастую не связанных с обеспечением безопасности территорий. Адаптация таких данных для аналитической обработки требует больших затрат, поэтому в большинстве случаев не проводится.

В результате органы территориального управления имеют данные наблюдений, каталоги событий, фрагментарные описания характеристик территорий, не связанные между собой. «Ручная сборка» возможна только для небольших фрагментов и требует предварительного анализа. Затруднена оценка ситуации в большом регионе, учёт динамики процессов.

Связывание наборов данных можно выразить как

$$Decision = I_d \times I_v \times I_s \times EE,$$

где *Decision* – информационная поддержка управления; *I_d* – данные об опасностях, включающие результаты мониторинга, прогнозы, модели ситуаций; *I_v* – сведения об уязвимостях реципиентов риска (территорий, объектов, инфраструктуры, населения); *I_s* – информация о защищённости (характеристики сил и средств); *EE* – экспертные оценки, учитывающие особенности *I_x*. Исследованы подходы к формализации перечисленных элементов.

Связывание данных реализовано по нескольким признакам: пространственному расположению, времени, видам, масштабам ситуаций и др. Используя комплексные данные в процессах аналитической обработки и ситуационного моделирования получены новые знания, позволяющие повысить эффективность стратегического управления безопасностью территорий и экстренного реагирования на опасности и угрозы. Использованы данные, отвечающие следующим требованиям:

- максимальная детализация – обеспечение доступа к первичным, не агрегированным данным;
- темпоральная глубина – использование архивов наблюдений, сведений о динамике характеристик объектов за длительный период для получения статистически значимых оценок;
- доступность пространственного отображения – возможность картографической визуализации всех объектов и процессов с минимальной предобработкой и геокодированием.

Исследована возможность использования озёр данных федерального и регионального уровня с перспективой их последующие интеграции. Согласно стратегиям цифровизации управления субъектов РФ предусматривается построение мультизадачных центров управления регионами на основе интеграции озёр данных и технологий интеллектуальной обработки.

Озёра данных представляют пользователям доступ к разрозненной разноформатной информации. Тем самым обеспечивается межведомственный информационный обмен, гибкость межсистемного взаимодействия. Предобработка данных и их подготовка к аналитическому моделированию с целью прогнозирования обстановки, оценки территориальных рисков, решения других задач управления заключается в их трансформации для хранилища данных (DW) с более жёсткими требованиями к структуре и содержанию.

Классическое DW имеет следующую структуру: область длительного хранения, в которую записываются все данные мониторинга, пространственные данные и базы знаний; системообразующие ресурсы (справочники и классификаторы); блок управления загрузкой, включающей описание источников данных, процедуры импорта, контроля и обогащения; аналитические модели, собранные в портфолио и дашборды для решения конкретных задач управления. Локальное хранилище данных апробировано при решении разных задач поддержки управления с использованием накопленных данных. Исследована возможность построения «цифрового двойника территории» с использованием облачных сервисов и распределённых ресурсов.

Проведено предварительное тестирование модели цифрового двойника территории, сервисов расчёта и формирования рекомендаций для базовых рисков на примере Красноярского края. Предложены критерии отнесения рисков к базовым:

- реализация рисков сопровождается наибольшими потерями для населения и экономики;
- риски содержат управляемые факторы, для которых однозначно определены мероприятия по снижению вероятности и масштабов;
- информационная база доступна для исследований (наблюдения за 10 и более лет с гарантией регулярного обновления).

Основные публикации по разделу:

- Москвичев В.В., Ничепорчук В.В., Потапов В.П., Тасейко О.В. Цифровой паспорт безопасности территорий промышленных агломераций и регионов // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 6. р. 110-132. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.008
- Postnikova U.S., Nicheporchuk V.V., Taseiko O.V. Design, implementation and application of an intelligent system for territorial risks assessment // CEUR Workshop Proceedings, v. 3006, 2021. pp. 533–540. DOI: 10.25743/SDM.2021.71.71.064

3.2. Создание каталога данных мониторинга, оценки и управления территориальными рисками ЧС

В рамках разработки геопортала мониторинга, оценки и управления территориальными рисками ЧС в хранилище данных ИВМ СО РАН интегрированы каталоги опасных событий, данные наблюдений за окружающей средой и контроля объектов техносферы, паспорта безопасности объектов и территорий, пространственные данные. В каталогах опасных событий зафиксированы события разных масштабов: от обращений в экстренные службы и превышений концентраций вредных веществ в атмосферу до чрезвычайных ситуаций федерального уровня. В России принято выделять более 100 видов рисков, включая природные, техногенные, социальные, экологические, информационные и прочие. Анализ факторов рисков с использованием диаграмм качества Исикавы показал дефицит информации, необходимой для объективной оценки и управления для всех видов рисков. Образно говоря, данные мониторинга можно разделить на три типа: 1) регулярно обновляемые данные, используемые в расчётах и аналитических моделях; 2) данные, для которых по доступным фрагментам определена структура и предполагаемый источник; 3) недоступные данные, влияние которых на величины территориальных рисков описано в литературе.

Объем информации по базовым рискам показан в Таблице 4.

Таблица 4 – Каталоги событий, использующиеся для оценивания рисков

Вид	Начало периода
Аварии и инциденты на промышленных объектах	1999
Транспортные аварии	2015
Пожары техногенные и бытовые в городских агломерациях и сельской местности	1992
Аварии систем жизнеобеспечения	2007
Опасные погодные явления с масштабными последствиями	2010
Затопления территорий	1969
Ландшафтные пожары	1994
Землетрясения	1905

Для перечисленных рисков построены аналитические модели, проведена формализация превентивных мероприятий с учётом особенностей территорий. Модели учитывают характеристики территорий. Например, влияние метеофакторов можно оценить по данным GFS, характеристики застройки, дорожную сеть, инфраструктуру снабжения – по цифровым картам и планам, уровень информированности населения – на основе анализа отчётов образовательных учреждений, контента средств массовой информации и социальных сетей.

Разведочный анализ состояния безопасности регионов Сибири с верификацией полноты объёма информационных ресурсов реализован на основе OLAP. Для поиска причинно-следственных связей между масштабами проявления опасностей природного и техногенного характера и характеристиками защищённости на муниципальном и местном уровнях (детализация до населённых пунктов) использован Data Mining и Machine Learning. Результаты анализа показали избыточность данных метеорологических, гидрологических наблюдений, контроля за радиационной обстановкой в зонах влияния объектов атомной промышленности. Данные по защищённости населения и территорий, распределении материальных ресурсов, а также формализованные сведения о превентивных мероприятиях оказались в дефиците или сильно фрагментированном виде. Перечень новых данных, необходимых для формирования комплексных решений по реагированию на опасности и долгосрочному их парированию и рекомендации по и сбору согласован с органами государственной власти и местного самоуправления.

На основании предложенного метода сформирована архитектура информационных ресурсов для создания цифрового паспорта безопасности территорий (регион, муниципальное образование, населённый пункт). Выполнена декомпозиция задач управления рисками в виде функциональных диаграмм. Описаны процессы трансформации информационных ресурсов с применением разных технологий обработки данных.

В архитектуру интеллектуальной системы многоуровневой поддержки управления входят: блок консолидации и обеспечения доступа к информационным ресурсам, сервисы обработки данных, человеко-машинный интерфейс (Рисунок 67).

Хранилище консолидирует формализованные мониторинговые данные непосредственно во время работы аналитических сервисов и интеллектуальной подсистемы. Картографические данные используются в пространственном анализе. Формирование системообразующих ресурсов и знаний реализовано в отдельных приложениях. Таким образом, пробные расчёты для отладки аналитических сервисов и рекомендательной подсистемы можно проводить в автономном режиме. Облачные хранилища предпочтительны для данных, требующих минимальной предобработки и имеющих «стабильную» структуру. К ним относятся мировые ресурсы наблюдений за окружающей средой: метеорологическая, лесопожарная, сейсмическая информация. Данные экстренных служб, а также федеральных министерств и ведомств по характеристикам территорий и инфраструктуре, аварийным ситуациям и проч. доступны в озёрах данных МЧС России. Данная технология позволяет использовать распределённые данные ограниченного доступа без владения ими.

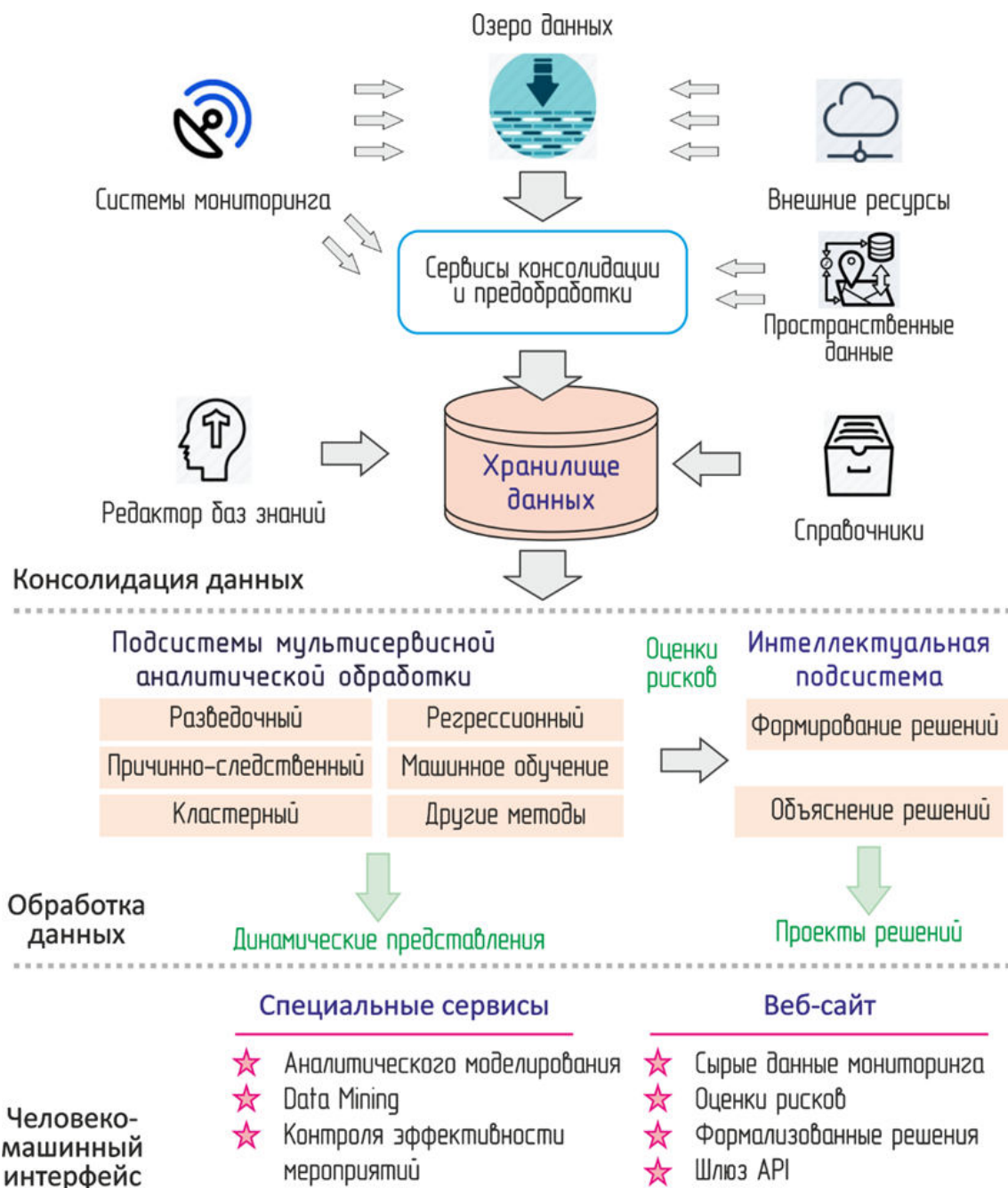


Рисунок 67 – Схема архитектуры сервисов и ресурсов цифрового паспорта безопасности территории.

В центральном блоке цифрового паспорта безопасности территории реализовано несколько независимых аналитических сервисов, ориентированных на решение задач управления конкретного вида. Разведочный анализ с использованием OLAP применяется для предварительной оценки факторов рисков, поиска аномалий и т.п. Причинно-следственный анализ необходим для детального исследования нелинейности вкладов в величины базовых территориальных рисков. Кластерный анализ позволяет группировать территории по мно-

гомерным метрикам. Например, муниципалитеты Красноярского края разделены по категориям: городские агломерации, районы с развитым сельским хозяйством и лесоперерабатывающей промышленностью, ресурсодобывающие, отдалённые и Арктические территории. Соответственно, расчётные методы и рекомендации по управлению рисками адаптированы для каждой категории. Регрессионный анализ позволяет оценить тренды для среднесрочного прогноза рисков и скорректировать модели управления. Применение методов машинного обучения в сфере управления безопасностью территорий имеет самые широкие перспективы – от предсказательной аналитики до выбора решений из базы прецедентов.

Вследствие существенных различий в структуре данных, методах их обработки и представления результатов целесообразна их интеграция для каждого вида рисков по типу контейнерной обработки. Рост интеллектуализации системы реализуется через массовое формирование баз знаний, описывающих процессы управления превентивными мероприятиями. Это позволяет также формировать несколько альтернативных решений с ранжированием их по приоритетам.

Человеко-машинные интерфейсы проектируются с учётом различия задач, решаемых на разных уровнях в иерархии территориального управления. Вариативность динамических представлений результатов обработки позволяет избежать редуцирования оценок рисков в виде «территория/числовой показатель». Предусмотрена поддержка разнообразия доступа лиц, формирующих и принимающих управленческие решения – настольные комплексы программ, сайты, мобильные приложения. Разработанная архитектура определит функционал цифрового паспорта безопасности территории с обоснованием выбора программных компонентов и рациональных способов комплексного решения задач управления.

Основные публикации по разделу:

- Ничепорчук В.В., Калач А.В., Шарапов С.В. Концепция построения архитектуры информационных ресурсов систем мониторинга природно-техногенной безопасности // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2021. № 2. С. 61-70.
- Ничепорчук В.В., Калач А.В., Крутолапов А.С. Проектирование информационно-аналитической системы обеспечения природно-техногенной безопасности // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2021. № 3. С. 57-65.

3.3. Разработка новых способов конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта

Системное проектирование является наиболее важным этапом цифровизации управления. Предложен метод проектирования информационных систем, синтезирующий разных технологии графического представления структуры информационных ресурсов и процессов обработки данных для решения задач управления безопасностью территорий. Метод включает описания в нотациях IDEFx, UML, а также онтологические описания. Основой метода является модель информационной поддержки управления, обосновывающая применение информационных технологий и ресурсов в процессах формирования управленческих решений. Модель представляет процессы управления в различных режимах функционирования посредством связывания функциональных задач с технологиями их реализации. Это позволяет обосновать унифицированные требования к архитектуре и составу данных систем поддержки принятия решений различного назначения. Использование разных сочетаний множеств задач, технологий, видов информационных ресурсов позволяет сформировать два основных способа проектирования систем и сервисов. «Технологический» способ заключается в использовании какой-либо информационной технологии (например, ГИС, веб и др.) или совместной работы нескольких технологий для решения всех доступных задач управления. Такой принцип положен в основу систем ЭСПЛА-ПРО, ЭСПЛА-М и OLAP-GIS, разработанных в Институте вычислительного моделирования СО РАН.

Для комплексной цифровизации задач управления разработан проблемно ориентированный или модульный метод конструирования. Он позволяет соблюсти баланс между сложностью решаемых задач и простотой их понимания за счёт использования разных способов отображения и описания процессов функционирования, структур информационных ресурсов, ограниченных одним видом опасных или чрезвычайных ситуаций (ЧС). Использование сразу двух способов в виде матрицы «задача для вида ЧС/ технология» позволяет определить границы применения информационных технологий и ресурсов, использования аналитического и ситуационного моделирования для комплексного решения задач территориального управления безопасностью.

На рисунке 68 показана онтология, формализующая основные задачи управления. Порядок решения задач детализирован в виде блоков системной архитектуры: информационных ресурсов (исходных данных), процессов решения и представлений результатов. Группировка сущностей выделена цветом, формой рамок и размером шрифтов. Обозначение АКО (As King Of – состоит из) означает состав элементов сущности.

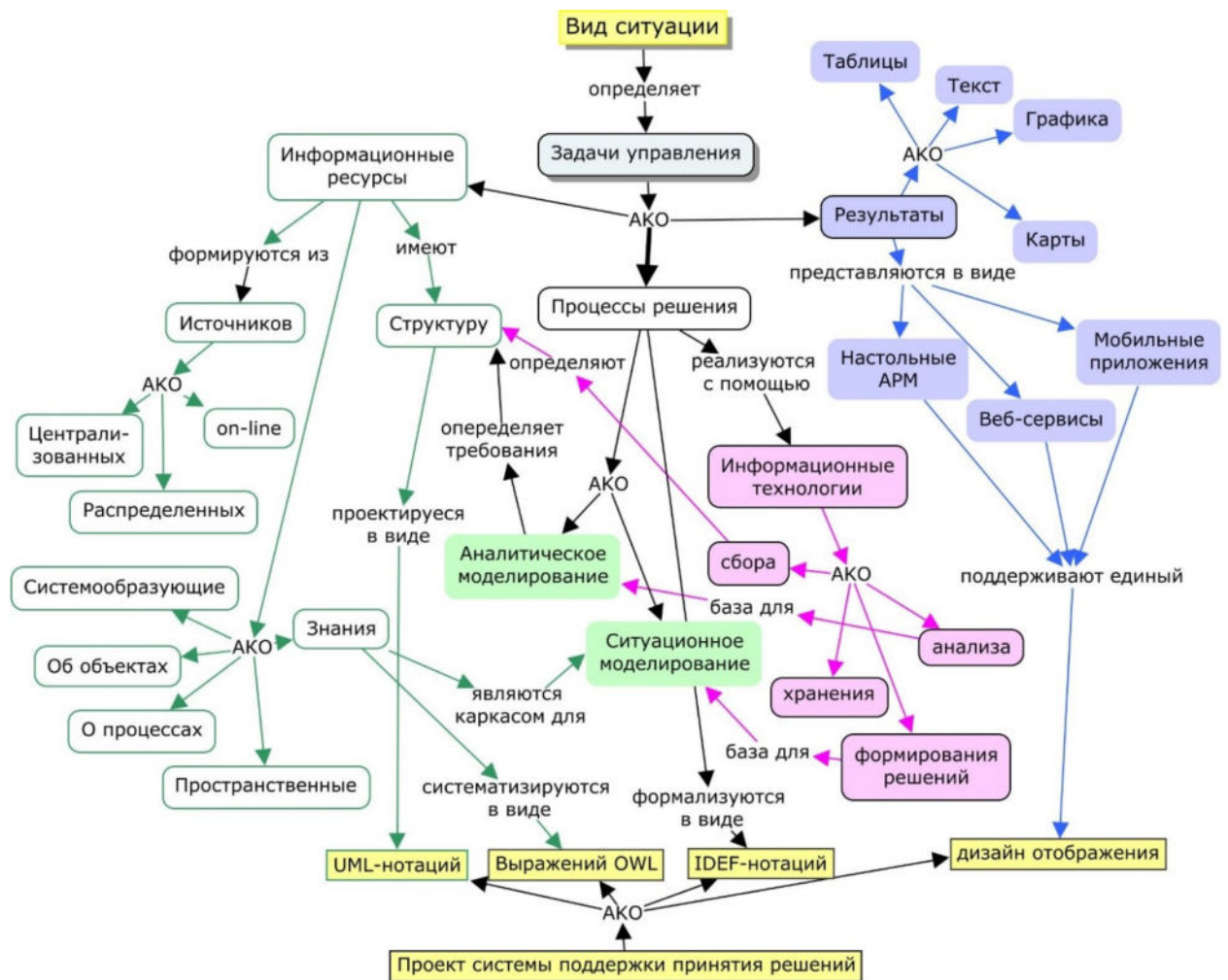


Рисунок 68. Онтология модульной разработки системы поддержки принятия решений.

Жёлтым цветом показаны конечные результаты проектирования. Слева представлено разнообразие информационных ресурсов, справа – виды динамических представлений результатов работы информационных технологий (розовый цвет). С использованием аналитического моделирования решаются задачи идентификации опасностей и угроз в потоках данных мониторинга, ранжирования территорий и объектов по степени риска, оценка готовности формирований, а также контроль достоверности данных.

Процесс ситуационного моделирования цикличен: сценарии ситуаций отлаживаются в ходе учений, тренировок и верифицируются протоколированием произошедших опасных ситуаций. Информационные процессы, по возможности, разделены на три этапа:

- моделирование динамики опасностей;
- моделирование последствий реализации опасностей;
- формирование перечней и последовательности проведения мероприятий защиты и работ по ликвидации опасной ситуации. Создание группировки сил и средств происходит с учётом масштаба ситуации и удалённости формирований.

Качество решений зависит от наличия расчётной методики для конкретного вида ситуации, целесообразности применения и детализации пространственных данных, полноты информации о защищаемых объектах в зоне действия опасных факторов. Использование динамических баз знаний показало бóльшую эффективность, чем традиционные планы действий. Отказ от предписаний новой методики планирования действий в пользу систем поддержки принятия решений позволит не только повысить качество управления, но и сэкономить значительные ресурсы.

Использование динамически настраиваемых интерфейсов позволяет выбрать оптимальный вариант представлений результатов работы систем – комплексных решений по управлению безопасностью объектов и территорий. Это могут быть формы, установленные нормативными документами, либо получаемые на основе анализа отчётов, донесений, распоряжений, либо спроектированные с учётом предпочтений лиц, принимающих решения.

Создание систем поддержки управления основано на интеграции разных информационных ресурсов и технологий. Гибкая архитектура обеспечивает мультизадачность, модульность, многоуровневость систем, длительность жизненного цикла и наследуемость информационных ресурсов. Сложность проблемной области и разнообразие подходов системной инженерии обуславливают необходимость использования всего потенциала средств проектирования для поиска оптимальной методологии формализации знаний, процессов их накопления, распространения и использования.

Разработаны онтологии систем поддержки принятия решений для конкретных видов ЧС. Они также состоят из нескольких блоков: мероприятия как результаты принятия управленческих решений; аналитическое и ситуационные модели опасностей с оценкой их воздействия на защищаемые объекты. Содержание блоков позволяет сформулировать требования к решению функциональных задач поддержки принятия решений.

Проект и его реализация для ЧС, связанных с затоплением территорий описывает применение аналитического моделирования используется для обработки данных гидрологического мониторинга, контроля уровней воды, ледовых явлений, расходов сброса гидроэлектростанций. Выделение средств на противопаводковые мероприятия основано на ранжировании территорий по каталогу событий и уточняется с учётом прогнозов прохождения весеннего половодья, обследования состояния гидротехнических сооружений и других факторов риска, систематизированных в виде диаграмм качества Исикавы.

Использование модуля ситуационного моделирования позволило установить зоны затопления населённых пунктов и объектов инфраструктуры. Помимо визуализации контуров разлива водотоков формируются мероприятия оповещения, спасения и обеспечения людей,

организации бесперебойной работы транспорта и коммунальных служб для сценариев разной обеспеченности. Представление сценариев в виде модифицированных схем IDEF3 позволяет учесть возможность эскалации ЧС: рассредоточенность районов бедствий, отсутствие связи, транспортного сообщения, недостаточная подготовка населения к действиям в ЧС. Процесс моделирования ситуации реализуется в двух режимах: заблаговременном, на основе зон затопления рассчитанных по результатам изысканий и топографической съёмки; оперативном – на основе данных БПЛА, космических снимков района бедствия с высоким разрешением.

На примере Красноярского края построена онтология системы поддержки управления пожарной безопасности. Реализовано наполнение баз данных на уровне муниципальных образований, апробирован процесс аналитического моделирования на уровне региона. Это позволило по-новому решить задачи ранжирования территорий по величине пожарного риска, с детализацией характеристик населённых пунктов и объектов защиты. Важной особенностью метода является включение характеристик защищаемых объектов в показатели оценивания пожарной безопасности. В регионе около 1800 населённых пунктов, 400 тыс. объектов пожарного надзора. Организация межсистемного информационного обмена поддерживает в актуальном состоянии весь объём данных.

Онтологии разработаны с использованием свободно распространяемого программного обеспечения CMapTools. Помимо графического отображения сущностей и связей между ними имеется возможность формировать каталоги объектов для последующей детализации с бóльшим формализмом. В качестве следующего этапа проектирования и проверки логики путём построения предикатов предлагается пакет Protege. Анализ литературы показывает хорошие перспективы использования метода в корпоративном управлении. Его применение для цифровизации управления обеспечением природно-техногенной безопасности территорий имеет хорошие перспективы.

Основные публикации по разделу:

- Ничепорчук В.В. Проблемы интеллектуализации геоинформационного моделирования чрезвычайных ситуаций // XXV Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения-2021», 2021, т. 1, с. 448-449.
- Калач А.В., Ничепорчук В.В., Батуро А.Н. Поддержка принятия управленческих решений при защите территорий от затоплений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 1. С. 74-86. DOI: 10.17308/sait.2021.1/3372

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

Разработана модель управления территориальными рисками, увязывающая данные комплексного мониторинга со 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 69 и 70).



Рисунок 69 – Концептуальная схема управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с затоплением территорий.

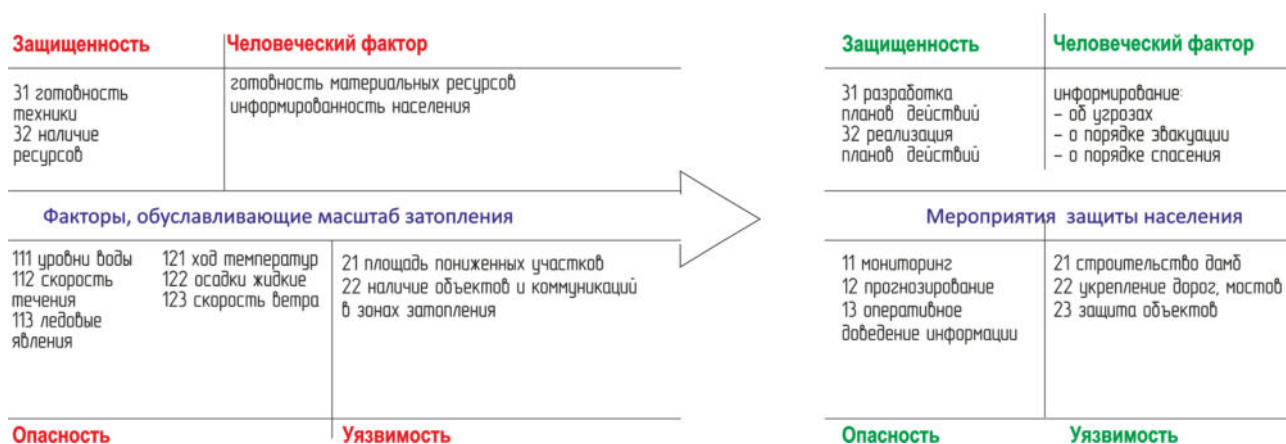


Рисунок 70 – Концептуальная схема управления риском эскалации факторов затопления территорий.

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

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 объёма и качества используемых информационных ресурсов. Обеспечена статистически достоверная темпоральная глубина описаний опасных ситуаций и процессов, а также проведённых 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 в крае.

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. 71). 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.

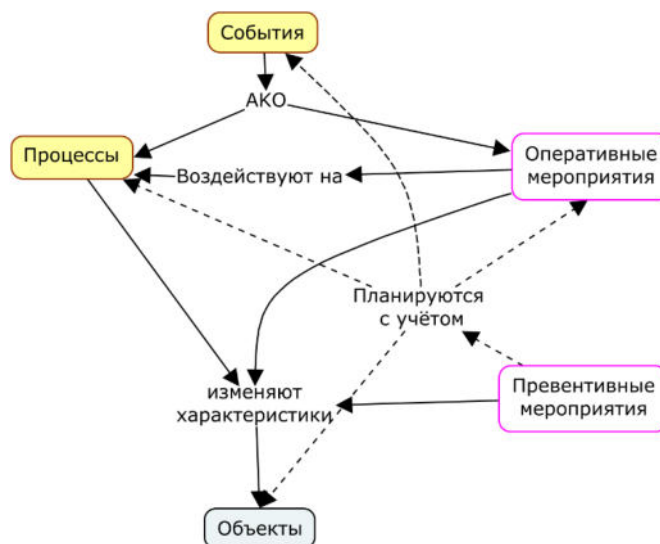


Рисунок 71 – Верхний уровень онтологии информационных ресурсов сферы обеспечения природно-техногенной безопасности (АКО – As Kind Of – состоит из)

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 предусмотрено автоматическое редуцирование сценариев, спроектированных как с учётом экспертных знаний, так и по данным натурных наблюдений.

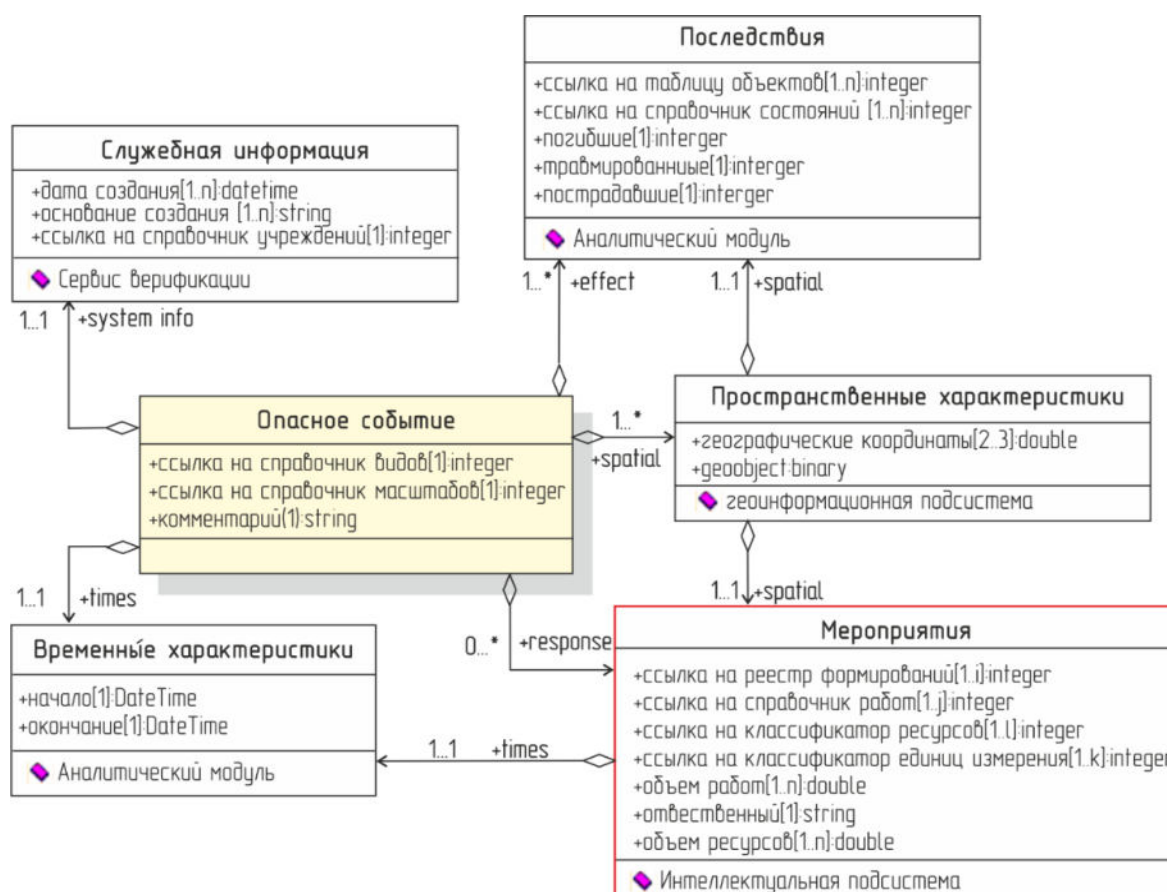


Рисунок 72 – Представление события для извлечения информации для принятия решений.

Для формирования баз знаний разработана модифицированная форма записи событий (Рис. 72). Такая структура позволяет проводить пространственный анализ, верификацию сил и средств, визуализировать сценарии в виде графическое представлений. Разработан метод анализа произошедших событий, выполнения мероприятий, оценки качества принятых решений и эффективности действий участников 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.

3.5. Интеллектуальная система поддержки управления территориальной безопасностью с учетом особенностей принятия решений на разных уровнях иерархии управления

В рамках выполнения работ по проекту в 2023 году разработаны фундаментальные основы построения интеллектуальных систем территориального управления. Создана многоуровневая модель управления природно-техногенной безопасностью, позволившая систематизировать данные мониторинга, обосновать процессы их обработки и применение новых аналитических технологий поддержки принятия решений.

Выполнено проектирование интеллектуальной системы поддержки управления территориальной безопасностью, учитывающая особенности принятия решений на разных уровнях иерархии управления. Предложены решения задач распределения ресурсов на проведение мероприятий по снижению рисков с учётом синергетического воздействия множества разнородных факторов, часть из которых не поддаётся точному измерению.

Обзор работ по теме исследований выполнен в двух направлениях: организация комплексного мониторинга природно-техногенной безопасности, использование собранных данных для поддержки принятия решений и технологии разработки интеллектуальных систем территориального управления.

Основными задачами системы комплексного мониторинга является идентификация, оценка и прогноз опасностей различного характера. В работах специалистов ВНИИ ГОЧС обобщены современные методы контроля опасностей предотвращения аварий инцидентов [1]. Удешевление сенсоров физических параметров, повышение доступности оперативных и архивных данных привело к необходимости работы с Big Data. Однако пока применений технологий распределённого хранения, искусственного интеллекта, глубокого обучения носит очаговый характер. Необходима разработка средств фильтрации «полезной информации», позволяющей снизить неопределённости принятия решений в различных задачах управления. Использование методов статистической обработки наблюдений недостаточно для извлечения знаний из массивов данных.

Другой проблемой является включение в системы мониторинга слабоструктурированной информации, например, корпусов текстов нормативных документов, определяющих бизнес-процессы и задающих ограничения их выполнения. Востребован мониторинг социальных факторов, имеющих вероятностный характер проявления. Для их идентификации и оценивания, расчётов вкладов в реализацию рисков природного и техногенного характера требуется согласованная работа экспертов высшей квалификации, использование методов Data Mining для извлечения полезной информации.

В работе [2] рассмотрены прогнозные и аналитические модели в области природных, техногенных и биолого-социальных угроз безопасности жизнедеятельности населения. Модели реализованы в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город». При разработке моделей использован метод статистической обработки с использованием байесовских классификаторов. Обеспечен многофакторный мультивариантный анализ вероятностей возникновения угроз различного характера, моделирование последствий ЧС в режиме реального времени. Слабым местом предлагаемых моделей развития ЧС природного и техногенного характера является сбор исходных данных. Зачастую это получение данных требует специальных изысканий или доступа к корпоративной информации ведомств.

Большой задел по созданию интеллектуальных систем поддержки управления создан в Институте проблем управления РАН [3]. Решены задачи информатизации муниципального хозяйства Москвы, предприятий военно-промышленного комплекса, объектов атомной энергетики, других отраслей экономики. Представленные методы анализа задач, функций и процессов управления имеют универсальный характер и могут быть масштабированы для решения проблем безопасности и развития территорий. Для оценки эффективности управления разработана система сбалансированных показателей оценки состояния сложных систем.

Теории проектирования различных информационных систем посвящена работа [4]. Систематизированы процессы разработки, внедрения и эксплуатации автоматизированных систем. Предложен обобщённый алгоритм проектирования с четырьмя возможными ветвями своего развития. Показаны методы моделирования систем и бизнес-процессов, на основе которых реализуется анализ и синтез интеллектуальных систем.

В работе [5] представлен комплекс формальных моделей и методов описания и исследования бизнес-процессов. Формальный аппарат, лежащий в основе теории бизнес-процессов, базируется на различных направлениях теории программирования, включая формальные грамматики и языки, технологии тестирования программ и разработки баз данных; методы оптимизации, верификации, анализа и оценки качества программ, структурные и объектно-ориентированные методы проектирования.

Несмотря на необходимость учёта большого количества разнородных факторов, деятельность по подготовке управленческих решений состоит из логически увязанных процессов обработки информации, которые *возможно формализовать*. Задача *оперативного управления* в опасных ситуациях (пожарах, ДТП) небольшого масштаба имеет типовые решения, основанные на минимуме данных. Декомпозиция процессов *подготовки к циклическим ЧС* (природные пожары, весенние паводки) хорошо описана в литературе и руководя-

щих документах. *Стратегические решения* по снижению рисков, требующие анализа большого объёма информации, представляют собой конечный перечень мероприятий, для которых требуется определить ресурсоёмкость, порядок выполнения и ожидаемый эффект. При дефиците профильных экспертов в области безопасности машинное формирование перечисленных видов решений позволит повысить эффективность управления территориальной безопасностью.

Сложность применения «классических» подходов к формированию решений с использованием языковых моделей заключается в трудоёмкости формализации принятых решений, которые необходимы для формирования обучающей выборки. Фильтрация ошибочных решений требует критериев качества и эффективности. Использование продукционных экспертных систем (ЭС) позволяет точно запрограммировать логику формирования решений. Однако в этом случае появляется проблема размерности, поскольку приемлемая детализация решений при расширении области применения ЭС требует большого количества правил, в создание которых требуют высоких затрат квалифицированных специалистов.

Концептуальный уровень описания предметной области представлен в виде онтологии (Рис. 73).

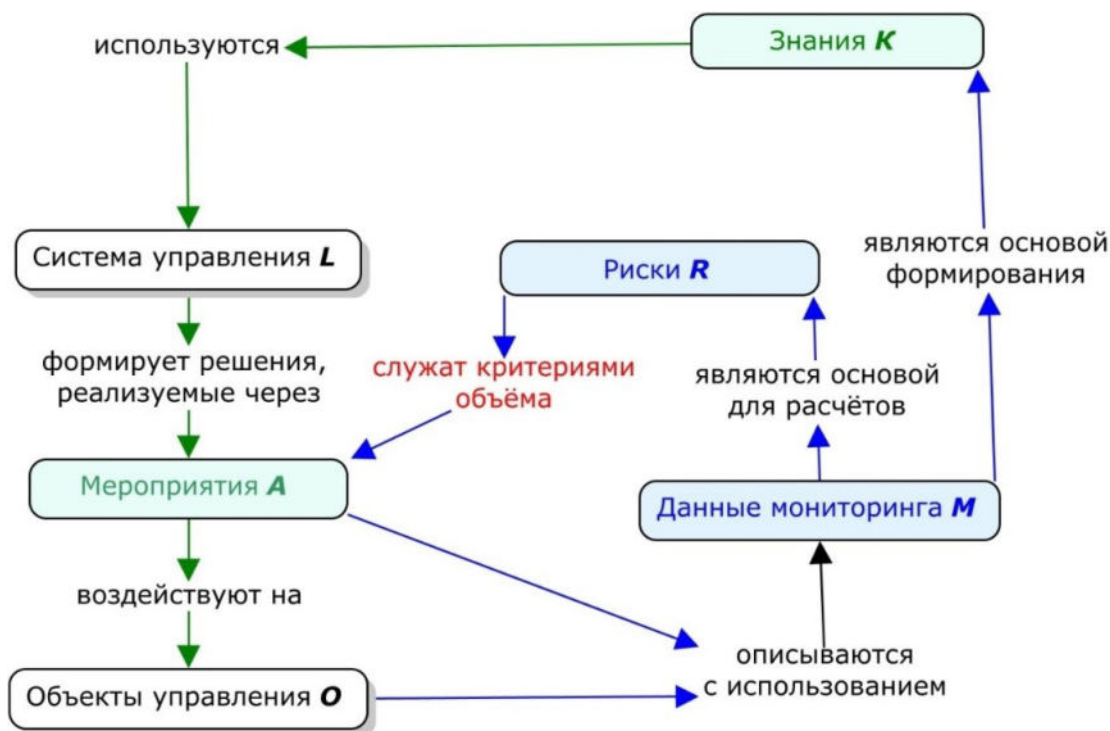


Рисунок 73 – Онтология информационной поддержки задач управления безопасностью территорий.

Основные элементы онтологии – система управления L и объекты управления O логически связаны через мероприятия A , реализующие принимаемые решения. Система мони-

торинга M консолидирует характеристики O и их изменения. В результате формируется информационная база для оценивания рисков и формирования знаний. Синие стрелки указывают на потоки данных. Связь сущностей разных таблиц реализуется через системообразующие элементы (справочники, реестры). Например, вид ситуации и её локализация позволяют сформировать сценарий реагирования, задействованные ресурсы и ожидаемые результаты. Зелёные стрелки показывают использование для связывания данных логических правил «Если..., То...».

Онтология предусматривает использование ситуационного и аналитического моделирования. В $R \rightarrow A$ предусмотрена обратная связь для поиска оптимума функции объём ресурсов / величина рисков. Трансформация данных в знания является самым сложным процессом. Применение онтологии к существующей системе управления выявляет дисбалансы, препятствующие интеллектуализации информационно-управляющих систем, функционирующих в органах территориального управления. Основные усилия исследователей направлены на увеличение объёма данных мониторинга $O \rightarrow M$. Цифровыми представлениями $A \rightarrow M$, как правило пренебрегают. В результате мероприятия A проводятся независимо от результатов оценки рисков R . Отсутствует механизм регулярного пополнения знаний K .

Оригинальность предлагаемого подхода, заключается в уменьшении объёма данных мониторинга за счёт *отказа от персонифицированных данных*. Согласно нормативным документам МЧС России ключевыми характеристиками безопасности муниципального образования являются контактные данными руководящего состава, необходимые информирования и оповещения. Системный анализ процессов реагирования на чрезвычайных ситуациях разного масштаба и решения задач стратегического управления показал узкость круга лиц, решения которых способны изменить ситуацию. Вместе с тем, данные о наличии ресурсов, способности выполнить мероприятий определённого вида актуализируются с меньшей интенсивностью. Изменение регламентов и содержания отчётности позволяет сосредоточиться на повышении достоверности данных, востребованных многими ведомствами. Сценарии управления, в котором возникают временные задержки из-за незнания фамилий/телефонов руководителей не являются катастрофичными, поскольку в экстренных службах, на предприятиях, организациях имеются диспетчерские подразделения.

Следующим этапом проектирования интеллектуальной системы является детализация элементов онтологии. Для этого удобна терминология объектно-ориентированного программирования. Если представить онтологию в виде класса, то элементы составляющих её множеств есть экземпляры класса. Каждый экземпляр реализуется в виде отдельного мо-

дуля, с конкретным набором информационных ресурсов и технологий их обработки. Количество экземпляров определяется сочетаниями основных и дополнительных элементов онтологии (Таблица 5).

Таблица 5 – Элементы множеств онтологии

Множество	Элементы	Комментарий
Основные элементы		
Система управления L	региональный уровень управления l_1 ; муниципальный уровень управления l_2	Для базовой версии интеллектуальной системы. Экземпляры уровней l_0 (федеральный) и l_3 (поселение, объект) требуют дополнительного проектирования
Объекты управления O	опасности O_1 ; защищаемые объекты O_2 ; система обеспечения безопасности O_3	В O_1 ; включены управляемые факторы техногенных и природных опасностей; O_3 – это формирования РСЧС, располагаемые ресурсы
Мероприятия A	разовые a_1 ; периодические a_2 ; поддержка функционирования объектов с длительным жизненным циклом a_3	Полный перечень мероприятий формируется на основе нормативных, методических и отчётных документов
Данные мониторинга M	консолидируемые в автоматическом режиме m_1 ; отчётные, заполняемые вручную m_2	Возможны другие классификации: по источникам данных, форматам, регламенту актуализации и т.д.
Риски R	аварийные r_1 ; перманентные r_2	К r_2 относятся природные и социальные риски с отложенным эффектом
Знания K	приобретённые машинным обучением k_1 ; сформированные инженерами по знаниям и экспертами k_2	В интеллектуальной системе предполагается симбиоз k_1 и k_2
Дополнительные элементы		
Виды управления T	повседневное t_1 ; оперативное t_2 ; стратегическое t_3 ; сезонное (циклическое) t_4	Для каждой t_i рассматривается свой экземпляр онтологии
Виды ситуаций H	Группировка ведомственных перечней рисков в зависимости от t_i, l_j	Детально в проекте интеллектуальной системы рассмотрены базовые риски. Понятие введено в [5]
Показатели P	Атомарные данные m_i , описывающие характеристики O, A, R	Полный состав p_j определяет основную часть информационных ресурсов интеллектуальной системы

Основной целью проектируемой интеллектуальной системы является поддержка задач стратегического управления t_3 . Если для t_2 основным назначением программных систем является снятие неопределённостей в управлении за минимальное время, то в t_3 необходимо согласованное принятие решений несколькими уровнями управления l_i , а также обработка большого объёма информации M . «Ручной» расчёт рисков R трудоёмок, носит субъективный характер и, как правило, не воспроизводим независимыми группами экспертов. По этой причине для обоснования долгосрочных (и дорогостоящих) мероприятий A используются

приблизительные оценки, снижающие эффект от результатов. Низкое качество отчётности $A \rightarrow M$ приводит к затруднению оценок $M \rightarrow R$ на основе обратной связи.

Разработаны формальные описания процессов выработки согласованных решений на нескольких уровнях управления. В практике территориального управления практически все решения по предупреждению опасных явлений и процессов t_3 , а также по реагированию на масштабные ситуации t_2 , принимаются совместно несколькими уровнями управления L , с учётом с принятых ранее. Например, рекомендации по выбору способов реагирования, объёмов расходуемых ресурсов определяются федеральными и региональными нормативными актами (уровни l_0, l_1), которые в данной модели также считаются решениями по управлению. Новые решения нижних уровней l_2, l_3 принимаются с учётом этих ограничений. В свою очередь, решения верхних уровней l_0, l_1 основаны на анализе данных статистики событий и описания крупных катастроф. Эти данные отражают результаты работы l_2, l_3 .

Информационное обеспечение задач сезонного управления t_4 несколько проще, чем в случае управления стратегического t_4 . Во-первых, из-за относительного небольшого количества видов H сокращается размерность исследуемого пространства решений (Рис. 74).

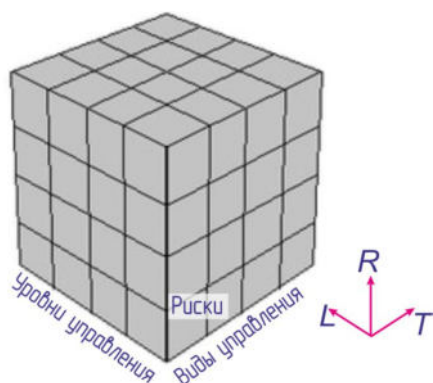


Рисунок 74 – Гиперкуб вариантов решений по управлению природно-техногенной безопасностью территорий

Во-вторых, используются результаты ранжирования территории по степени опасности на основе данных мониторинга M . В-третьих, для долгосрочных прогнозов используется экстраполяция на основе оценок реализованных рисков.

Например, при подготовке к прохождению весеннего половодья в регионах Сибири подготавливается несколько сценариев разного масштаба и вероятности реализации. Затем оценивается потребность территорий в ресурсах при максимально неблагоприятном сценарии, выстраивается логистика, проводятся учения. По мере приближения опасного периода уточняется гидрологический прогноз детализируются мероприятия. Решение задачи t_4 приобретает типовой характер, а машинные модели описывают реальность с приемлемой точностью.

Вид гиперкуба на Рисунке 2 условный, поскольку в качестве измерений могут также выступать A, O, M, K . Аналитический срез куба (фиксированные измерения) в соответствии с правилами OLAP [22] изменяется в зависимости от точки зрения. Примеры, проблем, решаемых с использованием аналитического моделирования:

Вид гиперкуба на Рисунке 2 условный, поскольку в качестве измерений могут также выступать A, O, M, K . Аналитический срез куба (фиксированные измерения) в соответствии с правилами OLAP [22] изменяется в зависимости от точки зрения. Примеры, проблем, решаемых с использованием аналитического моделирования:

- оценка изменения защищённости O_2 при проведении мероприятия a_i ;
- обоснование состава данных m_x , собираемых для принятия решений на уровне l_j при управлении t_y ;
- выбор способов трансформации m_x в решения для снятия неопределённостей в принятии решений (l_j, t_y) ;
- изменение алгоритмов управления при возникновении новых рисков (таких, как COVID-19).

Работа модели управления показана на рисунке 75.

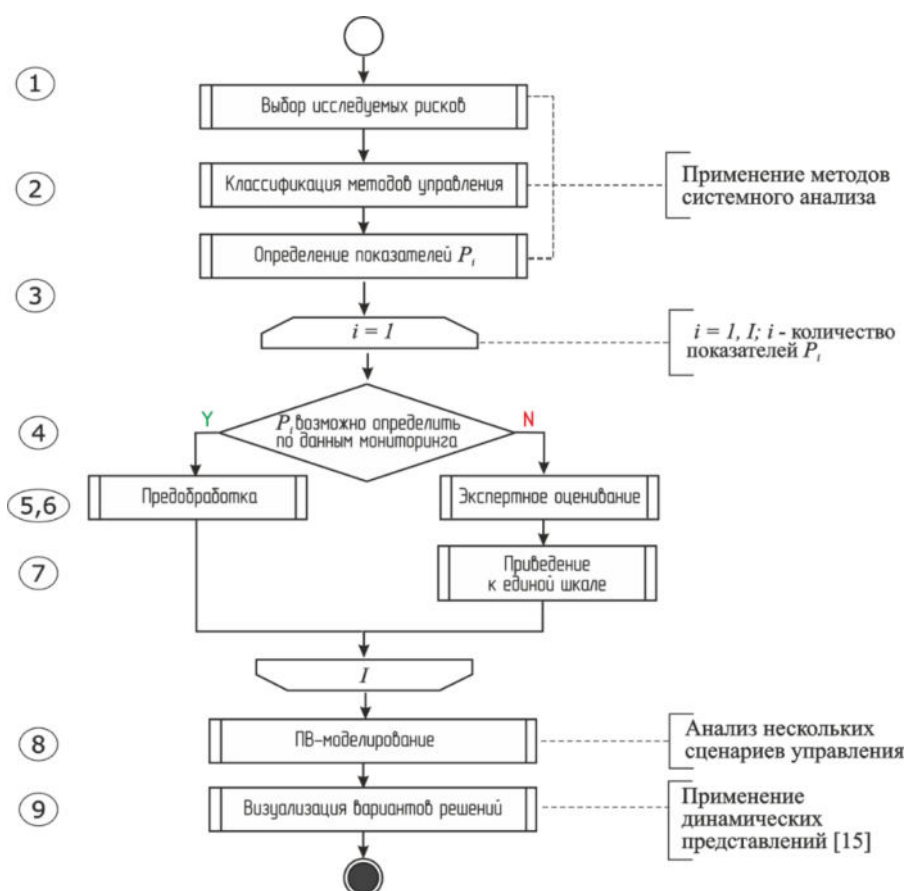


Рисунок 75 – Процесс моделирования управления безопасностью территорий

На этапе 1 полный список видов опасностей для населения и территорий классифицируется по степени значимости. По критерию потерь выделяются базовые риски территорий, уменьшение которых является целью управления. Часть базовых рисков R_b характерна для всех территорий России (например, техногенные и бытовые пожары). Вероятность и масштаб проявления других R_b зависит от географических, климатических и экономических характеристик территорий. Если решается задача t_4 , то базовые риски заменяются на циклические, набор которых также уникален для каждой территории. Для t_1 также характерен набор рисков, в отношении которых реализуются мероприятия A .

Далее следует процесс классификации методов управления. Результаты решения задачи t_3 заключаются либо в гарантированном снижении рисков, либо в приведении в соответствие характеристик объектов нормативам безопасности, установленным законодательно. Примеры показаны в таблице 6.

Таблица 6 – Примеры управления базовыми рисками территорий Сибири

Виды ситуаций	Содержание оценок R	Цели реализации мероприятий A
Пожары техногенные	Распределение по показателям P для каждой территории	Выполнение нормативов
Затопления	Ранжирование территорий по рискам Долгосрочный прогноз на основе экстраполяции	Гарантированное повышение защищённости территорий
Пожары природные	Ранжирование территорий по степени опасности и вероятности возникновения масштабных событий	Выполнение нормативов
Аварии систем ЖКХ	То же	Выполнение нормативов
Транспортные аварии	То же	Выполнение нормативов
Загрязнение окружающей среды	Оценка последствий для здоровья с учётом временного лага. Долгосрочный прогноз на основе экстраполяции	Снижение заболеваемости до приемлемых значений

Небольшой перечень целей превентивного управления рисками, приведенный в правом столбце, показывает актуальность работ по двум направлениям: поиск новых методов и технологий, кардинально снижающих потери и вероятность возникновения опасных событий; либо системный подход к выполнению установленных нормативов, тиражирование лучших практик, уменьшение расходуемых ресурсов для достижения желаемого эффекта.

В задачах повседневного управления t_1 , как правило, перечень рисков и мероприятий постоянный. Поэтому второй этап пропускается, а остальные используются для обоснования объёмов проводимых мероприятий.

Важнейшим этапом информационной поддержки управления является определение показателей P , рисков (этапы 3-7). Примерно половина из них – объективные, то есть полученные в результате измерений системы мониторинга, обследований, геоинформационного моделирования. Социальные и комплексные показатели рисков, например, уровень урбанизации территорий, качество жизни, устанавливаются экспертными методами. Результаты социологических опросов, используемые для оценки уровня безопасности населения, затратны и не всегда достоверны.

После формирования статистически значимой информационной базы и унификации логических связей между сущностями проводится аналитическое моделирование наиболее эффективных управленческих воздействий по критериям потребность/возможность [11].

При этом потребность определяется уровнем риска R , а возможность – наличием финансовых, материальных (в особых случаях интеллектуальных) ресурсов *Resources*, логически связанных с мероприятиями A .

Количественное выражение величины территориальных рисков R как функции от объёма ресурсов *Resources*, затраченных на мероприятия, позволяет реализовать несколько процессов моделирования:

- оценить возможный эффект мероприятий, планируемых при заданном *Resources*, выраженный через R (потенциальный);
- обосновать *Resources* для достижения заданного уровня *Risk*;
- оценить полученный эффект от мероприятий по соотношению R (реализованный) к затраченным *Resources*.

Заключительный этап машинного формирования решений – выбор способа визуализации результатов. Как показывает опыт разработки авторами систем поддержки принятия решений, представление результатов в удобном для ЛПП виде способствует пониманию особенностей управления, ожидаемых результатов, преимуществ и слабых сторон предлагаемых решений по снижению рисков.

Наличие обратной связи, когда выполненные решения записываются в информационную базу, позволяют «прогонять» через модель не только разные сценарии, но и принятые решения. Предполагается, проведение декомпозиции принятых управленческих решений до уровня показателей мониторинга. Решение этой задачи позволит сформировать критерии количественные эффективности и ошибочности управления.

Разработанный подход к информационной поддержке управления сложными системами с использованием интеллектуальных платформ имеет универсальный характер. Практически все задачи управления территориями требуют анализа большого числа разнородных показателей. На практике также приходится решать обратные задачи прогноза последствий управленческих решений. Современные ИТ в сочетании с междисциплинарными системными исследованиями позволяют учесть значительное количество социальных, экономических факторов, влияние внешней среды, более тонко настраивать долгосрочные стратегии обеспечения безопасности и развития территорий. Применение языковых моделей в территориальном управлении затруднена отсутствием обучающей выборки. Работы по формализации и верификации решений находятся пока в зачаточном состоянии. Перспективно применение комплексного подхода, сочетающего нейронные сети и экспертные системы.

Концептуальные подходы к построению модели управления, изложенные в работе, планируются использовать для модернизации эксплуатирующихся в Красноярском крае про-

граммных систем и создания мультизадачной интеллектуальной платформы. Авторами использован риск-ориентированный подход для рационального управления безопасностью территорий с учётом изменения их характеристик. Разработаны детализированные структурно-функциональные схемы для конкретных задач управления. Моделирование подготовки решений позволило определить функционал сервисов, их взаимодействие для разных пользователей. Трансформация процессов конкретных задач позволит достичь целей цифровой экономики, перенаправить ресурсы с обеспечения рутинных операций по переработке данных на развитие территорий.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / под общ. ред. В.А. Пучкова / МЧС России. – М.: ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013. – 352 с.
2. Акимов В.А., Мишурный А.В., Якимюк О.В. и др. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город»: Монография / Под ред. А.П. Чуприяна / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. – 316 с.
3. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В., Никишов С.М. Информационные аспекты управления коммунальным хозяйством – М.: ЛЕНАРД, 2011. – 320 с.
4. Блюмин А.М., Калянов Г.Н. Проектирование информационных систем. Уч. пособ. для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 312 с.
5. Калянов Г.Н. Теория бизнес-процессов. Уч. пособ. для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 296 с.

Основные публикации по разделу:

- Nicheporchuk V., Postnikova U. Technologies of information support of territorial safety management. Reliability: Theory & Applications. Special Issue No 5(75). V. 19. 349-355. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-349-355 [Ядро РИНЦ, Scopus]
- Ничепорчук В.В. Принципы цифровой трансформации управления безопасностью территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 55-63. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.98.57.006. [ВАК]
- Батуро А.Н., Ничепорчук В.В., Бутузов С.Ю., Гилек С.А. Управление пожарной обстановкой на основе риск-ориентированного подхода // Сибирский пожарно-спасательный вестник, 2023, № 1, с. 67-80. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.29.76.003. [ВАК]

3.6. Математические модели движения людей индивидуально-поточного типа

Введение

Среди наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС) в антропогенной экосистеме выделим пожары в зданиях и давки при массовом скоплении людей. Эти ЧС объединяет наличие людей, которые по путям ограниченной пропускной способности покидают место событий. Задачи пожарной безопасности (эвакуация при пожаре), организации комфортной среды в местах массового пребывания людей (оценка проходимости и пропускной способности), безопасной эвакуации в случае ЧС являются примерами задач в области обеспечения техногенной безопасности с выраженным запросом на внедрение современных вычислительных технологий. И это является общемировой практикой [1-10].

Развитие численных (цифровых) технологий решения задач безопасности является необходимым, поскольку вычислительный эксперимент – это наиболее эффективный, безопасный, экономичный метод разработки и апробации решений. И, конечно, инструмент должен быть рабочим: за допустимое время корректно моделировать рассматриваемые процессы с возможностью проводить пространственно-временной анализ результатов моделирования. Требование к производительности алгоритмов особенно ярко выражено при решении крупномасштабных задач (когда линейные размеры области моделирования составляют сотни метров, площадь – десятки тысяч квадратных метров).

В этом направлении за отчётный период (2021, 2022, 2023 гг.) были решены следующие задачи:

- разработка и тестирование алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования/наблюдения (мониторинга) мультиагентных потоков;
- разработка и тестирование с учетом разнородности вычислительных сред «быстрых» алгоритмов пространственного препроцессинга для моделирования мультиагентных потоков (на примере пешеходных);
- разработка методов тестирования моделей динамики мультиагентного потока для корректного моделирования крупномасштабных процессов на примере реального процесса.

Работы направлены на развитие разрабатываемой авторским коллективом математической модели движения людей индивидуально-поточного типа одним из развиваемых в мире в настоящее время видов математических моделей движения людей [11-14]. Отличительной чертой таких моделей является определение на каждом расчетном шаге для каждого индивида (человека) новой координаты его положения на плоскости. Моделируется перемещение человека из начального положения до цели. Когда достигнута последняя цель,

человек изымается из расчета. Для комфортного практического применения моделей развивается собственный математический и алгоритмический аппарат, но критерии качества (доверия) результатов моделирования являются универсальным предметом исследований. В силу сложности физического процесса единые подходы все еще находятся в разработке [15-23], включая настоящую работу.

В развиваемой авторами модели 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.

В нижеследующих разделах приводится краткое описание задач и их решений.

Список цитируемой в разделе литературы:

1. Kuligowski, E.D. Computer Evacuation Models for Buildings. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer New York. New York, NY, 2016. pp. 2152–2180.
DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_60.
2. Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried, A. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer New York. New York, NY, 2009. pp. 3142–3176.
DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3_187.
3. Wei, Z., Hui, D. & Tong, W. The application of fire spread and evacuation simulation technology in large stadium. Stoch Environ Res Risk Assess 23, 433 (2009).
DOI: 10.1007/s00477-008-0239-1.
4. Ronchi, E., Uriz, F.N., Criel, X., Reilly, P. Modelling large-scale evacuation of music festivals. Case Studies in Fire Safety. 2016. 5. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.csfs.2015.12.002.
5. Pretorius, M., Gwynne, S., Galea, E.R. Large crowd modelling an analysis of the Duisburg Love Parade disaster. Fire and Materials. 2015. 39(4). Pp. 301-322. DOI: 10.1002/fam.2214.
6. Shimura, K., Khan, S.D., Bandini, S., Nishinari, K. Simulation and evaluation of spiral movement of pedestrians: Towards the tawaf simulator. Journal of Cellular Automata. 2016. 11(4). pp. 275–284.
7. Mitsopoulou, M., Dourvas, N., Georgoudas, I.G., Sirakoulis, G.C. Cellular Automata Model for Crowd Behavior Management in Airports. Parallel Processing and Applied Mathematics.

- Springer International Publishing. Cham, 2020. Pp. 445–456. DOI: 10.1007/978-3-030-43222-5_39.
8. Davidich, M., Geiss, F., Mayer, H.G., Pfaffinger, A., Royer, C. Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: A case study using two major German railway stations as examples. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. 37. pp. 210–222. DOI: 10.1016/j.trc.2013.02.016.
 9. Wang, W.L., Lo, S.M., Liu, S.B., Ma, J. On the Use of a Pedestrian Simulation Model with Natural Behavior Representation in Metro Stations. *Procedia Computer Science*. 2015. 52. pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.048.
 10. Trivedi, A., Pandey, M. Agent Based Modelling and Simulation to estimate movement time of pilgrims from one place to another at Allahabad Jn. Railway Station during Kumbh Mela-2019. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2020. 34, 30. DOI: 10.1007/s10458-020-09454-x.
 11. Seitz, M.J., Koster, G.: Natural discretization of pedestrian movement in continuous space. *Phys. Rev. E* 86(4), 046108 (2012)
 12. Zeng, Y., Song, W., Huo, F., Vizzari, G.: Modeling evacuation dynamics on stairs by an extended optimal steps model. *Simul. Model. Pract. Theor.* 84, 177–189 (2018)
 13. Baglietto, G., Parisi, D.R.: Continuous-space automaton model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E* 83(5), 056117 (2011)
 14. Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности».
 15. Ronchi, E., Kuligowski, E., Reneke, P., Peacock, R., Nilsson, D.: The process of verification and validation of building fire evacuation models. Tech. rep. (2013). DOI: 10.6028/NIST.TN.1822
 16. International maritime organization/msc.1/circ 1533 – revised guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger, <https://www.traffgoht.com/en/pedestrians/downloads/index.html>, last accessed 18 Mar 2022
 17. Guideline for microscopic evacuation analysis. version: 3.0.0 (2016), <https://rimea.de/de/rimea-projekt/>, last accessed 18 Mar 2022
 18. В. М. Предтеченский, А. И. Милинский, Проектирование зданий с учётом организации движения людских потоков: учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1972. – 375 с.
 19. S. Buchmueller, U. Weidmann, Parameters of Pedestrians, Pedestrian Traffic and Walking Facilities, IVT-Report Nr. 132, Institute for Transport Planning and Systems (IVT), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), (2006). DOI: 10.3929/ethz-b-000047950.

20. G. Keith Still, Crowd Science and Crowd Counting, Impact, 2019: 1, 19-23, (2019).
DOI: 10.1080/2058802X.2019.1594138
21. J.J. Fruin, Pedestrian Planning and Design. Elevator World, 1971, 206 p.
22. Data archive of experimental data from studies about pedestrian dynamics.
URL: <http://ped.fz-juelich.de/da>
23. M. Boltes, S. Holl, A. Seyfried, Data archive for exploring pedestrian dynamics and its application in dimensioning of facilities for multidirectional streams, Collective Dynamics, 5, 17-24, (2020). DOI: 10.17815/CD.2020.28.

3.7. Разработка и тестирование алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования/наблюдения (мониторинга) мультиагентных потоков

Анализ данных масштабных мультиагентных динамических систем необходим для получения интегральных и/или локальных по времени и/или пространству характеристик процесса. Требуют разработки методы, позволяющие отвечать на вопросы о пространственно-временных характеристиках процессов. Характерной особенностью обсуждаемых процессов (социо-физических) является тот факт, что участниками являются отдельные индивиды (агенты), совершающие свои действия (как правило – перемещение) в ограниченном (смыслом задачи) фазовом пространстве. Действия каждого индивида обусловлены состоянием окружающей среды - других индивидов, препятствий (условных или фактических). Примером такого процесса является движение людей. Имитационные модели могут наглядно демонстрировать движение людей, позволяют оценить пропускную способность коридоров, проходов и лестничных маршей, определить предельно допустимое количество людей для каждой зоны, время эвакуации, конфигурацию путей. На основе анализа результатов расчетов можно прогнозировать, где может создаваться опасная ситуация, каковы предпосылки ее развития, давать оценку (качественную и количественную) возможным последствиям.

Для проведения, в том числе автоматизированного, анализа процессов и факторов, влияющих на их реализацию необходимы соответствующие инструменты. Разработаны численные алгоритмы, позволяющие вычислять следующие характеристики на момент времени t : суммарная интенсивность, интенсивность движения, интенсивность скоплений, текущая плотность, и отображать их в виде тепловых карт.

Поле суммарной интенсивности $I_s(t)$, [с], на момент t показывает участки пути, где происходило движение и скопление людей (то есть находились люди), и выражается в количестве времени, которое люди находились на участке пути.

Поле интенсивности скоплений $I_c(t)$, [с], на момент t показывает участки с нулевой или близкой нулю скоростью, и выражается в количестве времени (секунды), которое люди или стояли или двигались с близкой к нулю скоростью по/через участок пути.

Поле интенсивности движения $I_m(t)$, [с], на момент t является противоположным полюсу интенсивности скоплений и показывает участки с ненулевой скоростью, и выражается в количестве времени, в течение которого люди двигались по/через участок пути.

Каждая из интенсивностей является интегральной характеристикой за период с момента времени 0 к моменту t . За условный «0» принимается момент начала наблюдения. При этом для сопоставления значений с цветовой гаммой при графическом отображении тепловой карты можно как задать максимальное значение, так и использовать весь массив данных для определения максимального значения.

Задача построения тепловых карт (пространственно-временного анализа наблюдаемого динамического процесса) решается в плоскости (R^2). Для реализации численной процедуры выполняется ортогональная дискретизация области наблюдения (расчета) Ω . Вычисления проводятся для каждой ячейки (базовой площади) такой сетки (i, j):

$$I_s(t)_{ij} = \sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \Delta\tau \cdot 1_{ij}^s(k \cdot \Delta\tau);$$

$$I_c(t)_{ij} = \sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \Delta\tau \cdot 1_{ij}^c(k \cdot \Delta\tau);$$

$$I_m(t)_{ij} = \sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \Delta\tau \cdot 1_{ij}^m(k \cdot \Delta\tau);$$

где $\Delta\tau$ – временной шаг моделирования (или записи наблюдений), с;

$$1_{ij}^s(k \cdot \Delta\tau) = \begin{cases} 1, \text{ если } \exists (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau): (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau) \in \Omega^{ij}, l = \overline{(1, N)}, \\ 0, \text{ иначе;} \end{cases}$$

$$1_{ij}^c(k \cdot \Delta\tau) = \begin{cases} 1, \text{ если } \exists (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau): (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau) \in \Omega^{ij}, (x, y)_l((k-1) \cdot \Delta\tau) \in \Omega^{ij} l = \overline{(1, N)}, \\ 0, \text{ иначе;} \end{cases}$$

$$1_{ij}^m(k \cdot \Delta\tau) = \begin{cases} 1, \text{ если } \exists (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau): (x, y)_l(k \cdot \Delta\tau) \in \Omega^{ij}, (x, y)_l((k-1) \cdot \Delta\tau) \notin \Omega^{ij} l = \overline{(1, N)}, \\ 0, \text{ иначе;} \end{cases}$$

Ω^{ij} – площадь ячейки сетки; N - количество агентов; $(x, y)_l(t)$ – координата l -го агента в пространстве R^2 в момент времени t .

Выбор ортогональной сетки обусловлен быстротой ее построения. Задача выбора шага сетки, определяющего единичную (базовую) площадь, сопряжена со следующими факторами: длина временного шага, используемая для обновления координат агентов в фазовом пространстве (для данных моделирования) или частота обновления записей при мо-

3.8. Разработка и тестирование с учетом разнородности вычислительных сред «быстрых» алгоритмов пространственного препроцессинга для моделирования мультиагентных потоков (на примере пешеходных)

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.

Поле расстояний для конкретного маршрута хранит информацию о расстоянии в каждой точке до ближайшей цели из заранее составленного списка целей. 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 и не меняются в процессе моделирования движения людей. Поля расстояний считаются в узлах сетки, наложенной на расчетную область.

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.

Крупноблочное распараллеливание. Моделирование движения людей в многоэтажном здании естественным образом разбивается на одновременное движение большого количества людей по этажу и сравнительно небольшого (в силу 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. Нашем случае была использована свободно распространяемая реализация MPICH2 (MPICH | High-Performance Portable).

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.

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 `mpd.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.

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.

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. Проведены эксперименты: 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. 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.

Основные публикации по разделу:

1. 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, V. 5(1), 20. DOI: 10.3390/fire5010020. [Scopus Q1, Web of Science]
2. Kirik, E.; Bogdanov, A.; Sushkova, O.; Gravit, M.; Shabunina, D.; Rozov, A.; 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, 1546. DOI: 10.3390/buildings12101546. [Scopus Q1, Web of Science]
3. Kirik E., Vitova T. Time discretization in the time-continuous pedestrian dynamics model Sigma Eva. – Natural Computing 21, 407-415 (2022). DOI: 10.1007/s11047-022-09894-2. [Scopus Q2, Web of Science]

3.9. Разработка методов тестирования моделей динамики мультиагентного потока для корректного моделирования крупномасштабных процессов на примере реального процесса

Методы тестирования разработаны на примере такого мультиагентного явления, как пешеходное движение. Несмотря на тот факт, что разработкой моделей пешеходного движения (эвакуации – как частного случая) ученые занимаются уже более 40 лет, в настоящий момент отсутствует устоявшаяся (стандартизированная) процедура тестирования (валидации) моделей. В настоящей работе предложен минимальный набор тестов и разработана технология проведения вычислительного эксперимента для реализации соответствующих условий при моделировании.

Исходя из целей применения математических моделей движения людей – оценивание времени перемещения, включая возможное образование скоплений в силу геометрии пути, за рамками рассмотрения оставлена более стохастическая составляющая, относящаяся к поведенческим особенностям. Внимание было сосредоточено на физической составляющей процесса движения людей, которая имеет выраженную реализацию. Рассмотрены, так называемые, нормальные условия, когда люди нацелены на то, чтобы достичь цели, и они осведомлены об окружающей среде (область моделирования). Таким образом, целью является разработка способов тестирования моделей, чтобы убедиться, что модель корректно оценивает время на преодоление заданного пути.

Разработанный метод тестирования может быть применен к любым математическим моделям, реализующим направленное движение людей в нормальном режиме и режиме эвакуации (при соответствующей адаптации и интерпретации исходных данных и результатов моделирования можно использовать и для поточных моделей). Тесты не предполагают оценку таким явлениям как паника, случайное (бесцельное) блуждание, не учитывают групповые эффекты. Каждый человек предполагается самостоятельно действующим индивидом.

Следующий набор тестов разработан для тестирования модели пешеходного движения на предмет воспроизведения свойств моделируемого процесса:

- Тест 1: перестроение людского потока в части растекания;
- Тест 2: поддержание скорости свободного движения до достижения критического значения локальной плотности;
- Тест 3: движение в прямом коридоре при открытых граничных условиях [30];
- Тест 4: зависимость скорости от локальной плотности (выполнение свойств фундаментальной диаграммы) [31];
- Тест 5: движение через проем (сужение).

Для каждого теста:

- изложена постановка численной задачи, принцип задания расчетной области;
- указаны наблюдаемые (фиксируемые) характеристики, описывающие моделируемый процесс;
- методы обработки, интерпретации результатов моделирования, сравнения с реперными данными.

Результаты тестирования математической модели пешеходного движения, развиваемую авторским коллективом, и реализованной программно, обобщены в таблице 7. При наличии экспериментальных данных, с которыми возможно количественное сравнение, приводится величина (диапазон) отклонения, в иных случаях дается качественная оценка.

В подавляющем числе представленных тестов наблюдается увеличенная оценка времени эвакуации и, соответственно заниженное значение интенсивности. В случаях больших по модулю значений относительных невязок, абсолютные значения отклоняются незначимо. То есть программой в подавляющем числе случаев дается искомая оценка времени эвакуации с запасом. Это соответствует концепции оценки рисков, когда рассматриваются худшие условия.

Одним из параметров в имитационных моделях движения людей является размер тела человека, который представляет собой площадь проекции тела на двумерную плоскость. Источниками этих данных являются наблюдения в реальной жизни (как правило лабораторные эксперименты). Можно физически наблюдать и вручную измерять площадь проекции во время эксперимента только при очень низкой плотности людского потока. Если люди движутся плотным потоком, такой прямой метод не применим.

Существует разница между размером области, которую занимает тело человека в пространстве в статических (стоя на месте) и динамических (при движении) условиях. При движении люди занимают больше места из-за покачивания тела, движения рук и ног. При увеличении плотности потока пространство вокруг человека уменьшается. В плотном потоке верхняя часть тела зажата соседями, движение руками сильно ограничено или невозможно, двигаются только ноги. При определенных плотностях давление людей друг на друга увеличивается, тела сжимаются, занимают меньше места в пространстве.

При компьютерном моделировании движения людей важно корректно учитывать площадь проекции людей в зависимости от плотности. В настоящее время имеются данные по площадям проекций, которые используются для моделирования. Однако они представлены в виде констант.

Таблица 7. Сводная таблица результатов (Тесты 1-5).

Наименование теста	Оценка (качественно / количественно)	Комментарий
Тест 1. Переформирование людского потока в части растекания		
Растекание при свободном движении (открытые граничные условия) в вычислительном эксперименте, эксперимент проведен для набора начальных плотностей	Выполняется. Начиная с плотности 0,5 чел/м ² , что соответствует данным натурных экспериментов	Свойство проверено в численном эксперименте.
Тест 2. Поддержание скорости свободного движения до достижения критического значения локальной плотности		
При свободном движении (открытые граничные условия) в вычислительном эксперименте, эксперимент проведен для набора начальных плотностей	Выполняется. На плотностях ≤ 0,5-0,6 чел/м ² , что соответствует данным натурных экспериментов	Свойство проверено в численном эксперименте
Тест 3: движение в прямом коридоре при открытых граничных условиях		
Численный эксперимент проводился в схожих или равных (если было возможно установить равенство) условиях с натурными экспериментами (граничные условия - открытые), сравнивались данные (время эвакуации) численного и натурального экспериментов $\delta = 100 \times \frac{T_{\text{эксп}} - T_{\text{мод}}}{T_{\text{эксп}}}, \%$	Разброс отклонений [-6,25; -1,01] %	В целом модель демонстрирует более медленную динамику и небольшой запас в оценке времени эвакуации
Тест 4: зависимость скорости от локальной плотности (выполнение свойств фундаментальной диаграммы)		
Вычислительный эксперимент проводился при периодических граничных условиях (обеспечивалась постоянная плотность в расчетной области) для различных значений плотности, сравнивались данные (удельный поток) модельные и контрольные $\delta = 100 \cdot \frac{Q_{\text{эксп}} - Q_{\text{мод}}}{Q_{\text{эксп}}}, \%$	Связь скорости и плотности наблюдается. В случае схожих условий получения модельных и контрольных данных разброс отклонений [-10; 25] %, В абсолютных значениях разброс составляет [-0,2; 0,05] чел./м/с	Наибольший разброс в % соответствует максимальным плотностям 4-6 чел./м ² , по абсолютной величине отклонения в пределах 0,05 чел./м/с
Тест 5: движение через проем		
Влияние ширины проема на интенсивность движения в проеме при постоянном количестве человек	Модельные данные лежат в диапазоне экспериментальных данных	Величина удельного потока не чувствительна к ширине проема при ширине $b \geq 1$ м
Влияние плотности перед проемом на интенсивность в проеме при фиксированной ширине проема, сравнивались данные (время эвакуации) численного и натурального экспериментов $\delta = 100 \times \frac{T_{\text{эксп}} - T_{\text{мод}}}{T_{\text{эксп}}}, \%$	Разброс отклонений [-23,46; 2,53] %, В абсолютных значениях [-1,93; 0,35] с	Модель дает в подавляющем числе тестовых случаев завышенную оценку времени, то есть с запасом

Цель данной работы – оценить площадь пространства, которое занимает человек, в условиях разной плотности при движении и при статическом положении. Данные по движению людей в лабораторных условиях взяты из открытых источников. Данные включают координаты людей на каждом кадре в течении эксперимента, что обеспечивает высокую точность исследований. Для оценки площади пространства используется метод Вороного. Диаграммы Вороного применяются для исследования плотности людского потока.

В различных расчетных ситуациях были рассмотрены соревновательный и нормальный режимы движения людей. Опуская детали вычислений, на рисунках 77, 78 ниже представлены результаты для некоторых экспериментов.

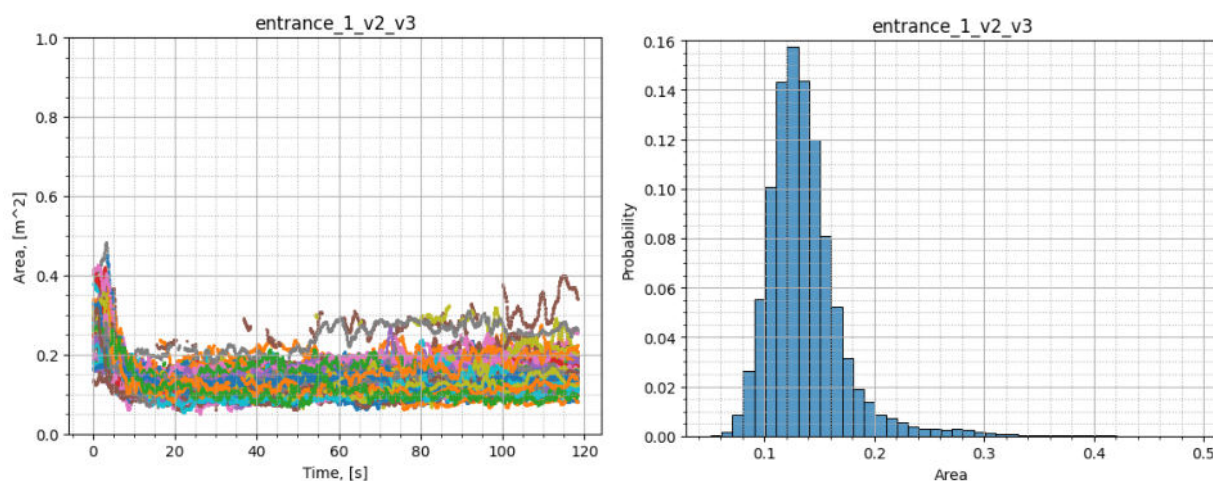


Рисунок 77 – Эксперимент «entrance_1_v2_v3», соревновательный тип движения. Слева: изменение площадей ячеек Вороного со временем. Справа: гистограммы для площади ячеек Вороного, [м²]

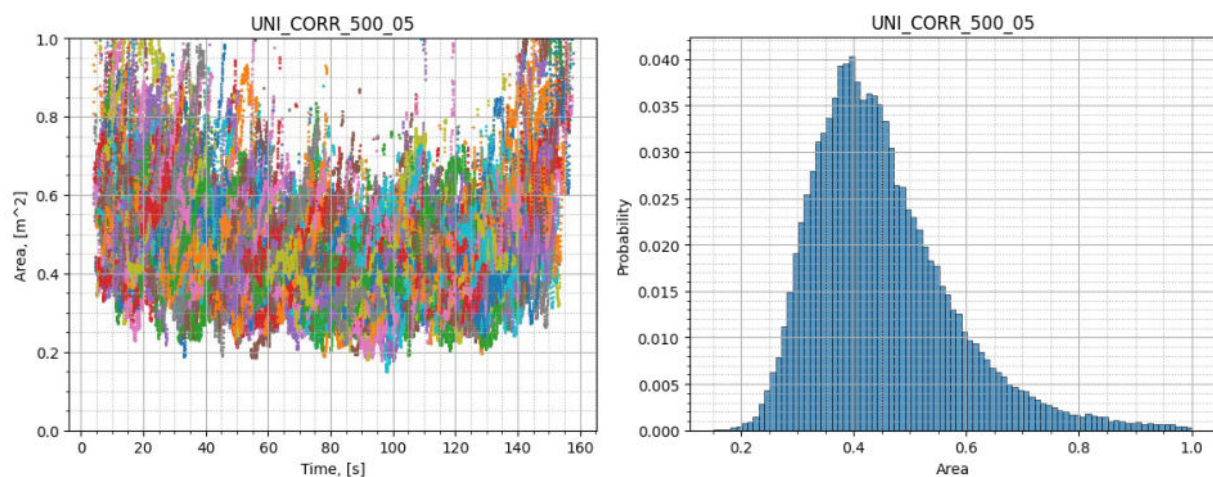


Рисунок 78 – Эксперимент «UNI_CORR_500_05», нормальный тип движения. Слева: изменение площадей ячеек Вороного со временем. Справа: гистограммы для площади ячеек Вороного, [м²]

По графикам (Рис 77, 78) видно, что режим движения сказывается на площади ячейки Вороного, которая принимает интерпретации от площади человека в плотном потоке до максимально возможного социального пространства, которое удастся держать человеку при данной плотности (с уменьшением плотности). (Существует понятие «социальной дистанции», когда люди, по возможности держатся на расстоянии от других людей. С увеличением плотности она уменьшается до нуля.)

При сужении и при соревновательном движении (которое может быть интерпретировано как движение в условиях спешки при возможной угрозе, то есть во время эвакуации) наиболее вероятное значение личного пространства составляет 0,12-0,125 м². Наблюдаются непродолжительные явления снижения площади до 0,05 м². Эти значения можно рассматривать как площадь проекции человека. В отсутствии соревновательного движения даже в сужении люди в среднем держат пространство вокруг себя, и оно составляет 0,23 м². В прямом коридоре личное пространство составляет в среднем 0,4 м².

Основные публикации по разделу:

1. 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. In: Chopard, B., Bandini, S., Dennunzio, A., Arabi Haddad, M. (eds) Cellular Automata. ACRI 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13402. Springer, Cham. (2022). DOI: 10.1007/978-3-031-14926-9_28.
2. Kirik E., Vitova T. Time discretization in the time-continuous pedestrian dynamics model Sigma Eva. – Natural Computing 21, 407-415 (2022). DOI: 10.1007/s11047-022-09894-2. [Scopus Q2, Web of Science]

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.

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.

Проведены исследования влияние дымов пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске на примере масштабных лесных пожаров в Якутии летом 2021 года. Показано, что образующиеся при сжигании биомассы дымовые аэрозоли поглощают и рассеивают солнечное излучение, тем самым уменьшая величину солнечной радиации достигающей подстилающей поверхности Земли. Обнаружено соответствующее понижение температуры почвы на 5 градусов.

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 и данным спутникового мониторинга.

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.

Проведены исследования по выявлению зон «цветения» и массового произрастания макрофитов в реке Енисей в пределах г. Красноярска на основе междисциплинарных исследований по данным мультиспектральной аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата и наземного гидробиологического мониторинга.

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.

Проведены исследования в области моделирования движения людей индивидуально-поточного типа. Решены задачи разработки и тестирования алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования/наблюдения (мониторинга) мультиагентных потоков, разработки и тестирования «быстрых» алгоритмов пространственного препроцессинга с учетом разнородности вычислительных сред для моделирования мультиагентных потоков (на примере пешеходных), разработки методов тестирования моделей динамики мультиагентного потока для корректного моделирования крупномасштабных процессов на примере реального процесса.

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. Заворуев В.В., Соколова О.В., Заворуева Е.Н., Якубайлик О.Э. Концентрация PM_{2.5} в приземной атмосфере над территорией г. Красноярска и акваторией незамерзающего участка реки Енисей // Оптика атмосферы и океана, 2023, т. 36, № 6, с. 462-468. DOI: 10.15372/AOO20230606. [Ядро РИНЦ, RSCI]
2. Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Влияние дымов якутских пожаров на состояние природной среды в г. Красноярске в августе 2021 г. // Оптика атмосферы и океана, 2023, т. 36, № 6, с. 487-493. DOI: 10.15372/AOO20230609. [Ядро РИНЦ, RSCI]
3. Gravit M., Kirik E., Shabunina D., Karimova E., Khlebnikova K. Wood-Frame Hotel Building: Fire Curtains and Evacuation Analysis // Construction of Unique Buildings and Structures, 2023, v. 108, # 10804. DOI: 10.4123/CUBS.108.4. [Ядро РИНЦ, RSCI]
4. Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э. Алгоритм вычисления температуры поверхности для восстановления потери данных Landsat 8-9 Collection 2 Level 2 // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. № 1. С. 318-329. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329 [Ядро РИНЦ, Scopus]
5. Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Геоинформационное моделирование экосистем на основе бассейнового подхода // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 560–573. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-560-573. [Ядро РИНЦ, Scopus]
6. Erunova M.G., Yakubailik O.E. Methods and technologies for spatial analysis of regional ecosystems based on the watershed approach // Integrated Environmental Assessment and Management, 2023, 19(4), 972-979. DOI: 10.1002/ieam.4652 [Scopus Q1, WoS]
7. Кадочников А.А. Опыт создания централизованного каталога данных дистанционного зондирования земли с Российских спутников // Геоинформатика, 2022, № 4, с. 36-43. DOI: 10.47148/1609-364X-2022-4-36-43 [Ядро РИНЦ, RSCI]
8. Nichporchuk V., Postnikova U. Technologies of information support of territorial safety management. Reliability: Theory & Applications. Special Issue No 5(75). V. 19. 349-355. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-349-355 [Ядро РИНЦ, Scopus]
9. Полстяной А.М., Полстяная О.Ю., Рендашкин И.В., Якименко О.Н., Туценко К.О., Садовский М.Г., Чернова А.А. Модель лечения абсолютного маточного бесплодия на экспериментальных животных // Медицина экстремальных ситуаций. 2023. Т. 25. № 1. С. 31-36. DOI: 10.47183/mes.2023.001. [Ядро РИНЦ, Scopus]
10. Заворуев В.В., Манкевич И.В., Заворуева Е.Н. Влияние выбросов автономных источников теплоснабжения на загрязнение бенз(а)пиреном атмосферы города Красноярска //

Естественные и технические науки, 2023, № 3, с. 70-74. DOI: 10.25633/ETN.2023.03.06.

[ВАК]

11. Андрианова А.В., Спицына Т.П., Пономарёва Ю.А., Ануфриева Т.Н. Современное состояние гидробиологических сообществ в низовье реки Ангары // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки, 2023, № 8, с. 7-13. DOI: 10.37882/2223-2982.2023.08.01. [ВАК]
12. Андрианова А.В. Донная фауна и оценка экологического состояния нижнего участка р. Ангары // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология», 2023, т. 43, с. 39-58. DOI: 10.26516/2073-3372.2023.43.39. [ВАК]
13. Батуро А.Н., Ничепорчук В.В., Бутузов С.Ю., Гилек С.А. Управление пожарной обстановкой на основе риск-ориентированного подхода // Сибирский пожарно-спасательный вестник, 2023, № 1, с. 67-80. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.29.76.003. [ВАК]
14. Ничепорчук В.В. Принципы цифровой трансформации управления безопасностью территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 55-63. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.98.57.006. [ВАК]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности

1. Кадочников А.А., Малимонов М.И., Токарев А.В., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Программа аналитической обработки данных температурных профиломеров // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664585 от 5 июля 2023 г.
2. Токарев А.В. Программа для формирования и визуализации архива изображений процессов туманообразования // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664714 от 6 июля 2023 г. Регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 623121000105-7.
3. Кадочников А.А. Инструменты загрузки и обработки данных наблюдения температурного профиломера // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665407 от 17 июля 2023 г. Регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 623121000106-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Прочие публикации и доклады на конференциях

1. Tokarev A., Zavoruev V., Kadochnikov A., Yakubailik O., Malimonov M. Development of software for creating an archive of images of fogging processes over the Yenisei River // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803N. DOI: 10.1117/12.2691008 [Scopus]
2. Zavoruev V., Yakubailik O., Sokolova O., Zavorueva E. Concentration of PM_{2.5} in the surface atmosphere of the Yenisei riverbed section (within the city of Krasnoyarsk) in the winter period of 2022-2023 // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803O. DOI: 10.1117/12.2691010. [Scopus]
3. Zavoruev V., Yakubailik O., Tokarev A., Dergunov A., Krasnoshchekov K., Sokolova O. Vertical distribution of aerosol particle concentration in the atmosphere at temperature inversion // Proceedings of SPIE, 2023, 12780, 127803P. DOI: 10.1117/12.2691013. [Scopus]
4. Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик Т.В., Заворуев В.В. Информационно-вычислительное обеспечение мониторинга атмосферы г. Красноярска // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 26-32. DOI: 10.25743/sdm.2023.76.63.005.
5. Зайцев Н.Е., Гостева А.А., Матузко А.К. Разработка ПО для вычисления температуры поверхности по данным Landsat 8-9 // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 57-62. DOI:10.25743/sdm.2023.50.96.010.
6. Якубайлик Т.В. Точность описания температуры воздуха и осадков глобальным климатическим архивом CRU TS на сельскохозяйственных территориях Красноярского края // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 361-366. DOI:10.25743/sdm.2023.25.63.060.
7. Токарев А.В., Заворуев В.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Малимонов М.И. Разработка программно-технологического обеспечения для формирования архива изображений процессов туманообразования над рекой Енисей // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами", Москва, 26-30 июня 2023. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. С. 62-65.

8. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Соколова О.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Концентрация PM_{2,5} в приземной атмосфере участка русла реки Енисей (в границах города Красноярск) в зимний период 2022-2023 годов // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами", Москва, 26-30 июня 2023. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. С. 385-388.
9. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Соколова О.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц в атмосфере при температурной инверсии // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Конференция В. Исследование атмосферы оптическими методами", Москва, 26-30 июня 2023. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. С. 389-392.
10. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Дергунов А.В., Соколова О.В., Якубайлик Т.В. Влияние температурной инверсии на загрязнение атмосферы Красноярска PM_{2.5} зимой и летом // Аэрозоли Сибири. Юбилейная XXX конференция: Тезисы докладов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2023. С. 53.
11. Якубайлик О.Э., Заворуев В.В., Токарев А.В., Кадочников А.А., Малимонов М.И. Аппаратно-программный измерительный комплекс для регистрации аэрозольного загрязнения атмосферы Красноярска // Аэрозоли Сибири. Юбилейная XXX конференция: Тезисы докладов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2023. С. 61.
12. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Соколова О.В. Оценка влияния незамерзающей реки Енисей на экологическое состояние приземного слоя атмосферы города Красноярска в зимний период // В книге: Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 267-269.
13. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Измерительный комплекс для определения теплофизических характеристик реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 270-272.
14. Матузко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Гидротермический режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 279-281.
15. Шапарев Н.Я., Токарев А.В., Якубайлик О.Э. Теплофизический след дымов якутских пожаров в окрестностях Красноярска в августе 2021 года // Енисейская теплофизика.

- Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 304-305.
16. Гостева А.А., Зайцев Н.Е., Матушко А.К., Таныгин К.Е. Анализ температуры поверхности и ее сезонных изменений с использованием данных LANDSAT 8-9 C2L2 // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы X Международной научной конференции. Красноярск, 2023. С. 63-67.
17. Калач А.В., Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г., Арифуллин Е.З. Современные механизмы управления рисками социально-природно-техногенных систем // Сборник трудов международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж, 12-14 декабря 2022 г. – Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации». 2023. – С. 1537-1542.
18. Ничепорчук В.В. Принципы организации мониторинга для обеспечения безопасности территорий // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 316-321.
DOI:10.25743/sdm.2023.28.80.053.
19. Ничепорчук В.В. Модель цифрового управления безопасностью арктических территорий / Система мониторинга в Арктической зоне. Сборник материалов Междунар. научно-практ. конф. (в рамках проведения XIV Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность-2023»). Москва, 2023. – С. 55-65.
20. Кирик Е. С., Литвинцев К. Ю., Дектерев А. А., Витова Т. Б. Расчетное обоснование организации эвакуации при пожаре в зданиях различного назначения // Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием "Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем". Красноярск, 16-20 октября 2023. С. 237-241. DOI: 10.25743/SSTS.2023.32.38.058.
21. Демичев И.А., Садовский М.Г. Определение показателей ДМПП с помощью машинного обучения // В сборнике: Проспект Свободный – 2023. Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2023. С. 1096-1098.
22. Сенашова М.Ю., Садовский М.Г. Распределение значений GC-состава фрагментов в пространственной структуре геномов хлоропластов, бактерий и митохондрий // Сборник научных трудов VII съезда биофизиков России. Сборник материалов съезда. В 2-х томах. Краснодар, 2023. С. 342-343. EDN: JEXQXB.

23. Алехина А.Е., Доррер М.Д., Садовский М.Г., Сакович В.В., Демичев И.А. Решение задачи расчета показателей стрейна в эхокардиографии с использованием нейронных сетей глубокого обучения // Сборник научных трудов VII съезда биофизиков России. Сборник материалов съезда. В 2-х томах. Краснодар, 2023. С. 345-346. EDN: DXRYSA.
24. Молявко А.А., Садовский М.Г. Выделение сигнала из шума в методе Шайдурова с помощью преобразования алфавита // Актуальные проблемы прикладной математики и механики. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова. Екатеринбург, 2023. С. 36-37. EDN: CRPNJH.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Избранные научные публикации по проекту за 2021-2022 гг.

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. DOI: 10.1134/S1067413622020035. [Q4 Web of Science]
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. DOI:10.25743/ICT.2022.27.6.010. [Scopus]
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. DOI: 10.3390/fire5010020. [Q2 Web of Science]
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. DOI: 10.3390/buildings12101546. [Q2 Web of Science]
6. Kirik E., Vitova T. Time discretization in the time-continuous pedestrian dynamics model SigmaEva // Natural Computing, 2022, 21(3), pp. 407-415. DOI: 10.1007/s11047-022-09894-2. [Q3 Web of Science]

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. DOI: 10.3390/ijms23073761. [Q1 Web of Science]
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. DOI: 10.1371/journal.pone.0264640. [Q1 Web of Science]
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. DOI: 10.3389/fmolb.2021.793912. [Q1 Web of Science]
10. Pokhabov D.D., Abramov V., Tunik M., Sadovsky M., Pokhabov D.V. Connection between olfactory dysfunction and severity of tremor // *Journal of the Neurological Sciences*, 2021, V. 429, 119590. DOI: 10.1016/j.jns.2021.119590 [Q2 Web of Science]
11. Pokhabov D.V., Pokhabov D.D., Abramov V.G., Tunik M.E., Tutsenko K.O., Khoroshavina A.A., Sadovsky M.G. A New Approach to the Differential Diagnosis of Patients with Parkinson's Disease and Essential Tremor // *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 2021, v. 51(8), pp.1059-1065. DOI: 10.1007/s11055-021-01165-41 [Scopus]
12. Москвичев В.В., Ничепорчук В.В., Потапов В.П., Тасейко О.В. Цифровой паспорт безопасности территорий промышленных агломераций и регионов // *Вычислительные технологии*. 2021. Т. 26. № 6. р. 110-132. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.008. [Scopus]
13. Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Кирик Е.С., Витова Т.Б. Математическая основа программного комплекса для оценки вероятности заражения вирусной инфекцией в зданиях с массовым пребыванием людей // *Вычислительные технологии*. 2021. Т. 26. № 4. С. 73-81. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.4.008. [Scopus]
14. Zinovyev A., Sadovsky M., Calzone L., Fouche A., Groeneveld C., Chervov A., Barillot E., Gorban A. Modeling progression of single cell populations through the cell cycle as a sequence of switches // *Frontiers in Molecular Biosciences*, 2021, v. 8, 793912. DOI: 10.3389/fmolb.2021.793912 [Q1 Web of Science]
15. Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8 // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 314-323. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323. [Ядро РИНЦ, RSCI]

16. Ерунова М.Г., Гостица А.А. Применение снимков высокого разрешения в задачах управления локальной территорией // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 202, т. 27, № 1, с. 263-266. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-263-276 [Scopus]
17. Erunova M.G., Sadovsky M.G. Clustering of small watersheds over annual precipitation data reveals sounding correspondence to the cluster pattern determined by annual temperature course // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 677(3), 032107. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032107 [Scopus]
18. Кадочников А.А. Разработка системы сбора данных для мониторинга состояния атмосферного воздуха в Красноярском крае // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 202, т. 27, № 2, с. 205-217. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-205-217 [Scopus]
19. Krasnoshchekov K., Yakubailik O. Application of remote sensing data to assess environmental situation in Krasnoyarsk // E3S Web of Conferences 333, 02004 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202133302004 [Scopus]
20. Kirik E.S., Vitova T.B., Malyshev A.V., Popel E.V., Kharlamov E.B., Moiseichenko V. A., Kalinin E. S., Smirnov N.V. Computer Simulation of Pedestrian Dynamics in the Design and Operation of Stadiums // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. 94. 9401. DOI: 10.4123/CUBS.94.1 [Ядро РИНЦ, RSCI]
21. Gravit M.V., Kirik E.S., Savchenko E.T. Effect of design on the evacuation time for the Colosseum of Rome // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. 95. 9504. DOI: 10.4123/CUBS.95.4 [Ядро РИНЦ, RSCI]
22. Калач А.В., Ничепорчук В.В., Батуро А.Н. Поддержка принятия управленческих решений при защите территорий от затоплений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 1. С. 74-86. DOI: 10.17308/sait.2021.1/3372 [Ядро РИНЦ, RSCI]
23. Матушко А.К., Якубайлик О.Е. Моделирование городского острова тепла по многолетним спутниковым данным // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 4 (38). С. 50-55. DOI: 10.25699/SSSB.2021.38.4.005. [ВАК]
24. Ничепорчук В.В., Калач А.В., Крутолапов А.С. Проектирование информационно-аналитической системы обеспечения природно-техногенной безопасности // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2021. № 3. С.57-65. [ВАК]
25. Ничепорчук В.В., Калач А.В., Шарапов С.В. Концепция построения архитектуры информационных ресурсов систем мониторинга природно-техногенной безопасности // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2021. № 2. С. 61-70. [ВАК]

26. Пенькова Т.Г., Метус А.М., Ничепорчук В.В., Ноженков А.И. Метод построения территориально-ориентированной нормативной модели для оценивания качества жизни с учетом спецификации территорий (на примере Красноярского края) // Информатизация и связь. 2021. № 5. С. 39-46. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-5-39-46 [ВАК]
27. Коробко А.В., Ничепорчук В.В., Метус А.М. Иерархическая модель показателей качества жизни и реализации национальных проектов Информатизация и связь. 2021. № 5. С. 47-53. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-5-47-53 [ВАК]