

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

УДК 004.9  
Рег. № НИОКТР № 121081900117-5  
Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФИЦ КНЦ СО РАН  
д.с.-х.н.  
\_\_\_\_\_ А. А. Шпедт  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

Направление фундаментальных исследований:  
1.2.1. Компьютерные, информационные науки и биоинформатика  
(0287-2021-0004)

Руководитель НИР  
зав. отделом  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ О. Э. Якубайлик

Красноярск 2022

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

н.с., к.ф.-м.н.

---

*(подпись, дата)*

Т.В. Якубайлик

(Раздел 1)

м.н.с.

---

*(подпись, дата)*

А.К. Матушко

(Раздел 1)

Нормоконтроль

---

*(подпись, дата)*

Вяткин А.В.

## РЕФЕРАТ

Отчёт 78 с., 35 рис., 5 табл., 1 прил.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГЕОПОРТАЛ, КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ СЕРВИСЫ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ, ВЕБ-ГИС, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, ВЗВЕШЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ, PM<sub>2.5</sub>, AQI, ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ МЕТЕОУСЛОВИЯ, СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА, ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, КРАСНОЯРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Исследования и разработки по настоящему проекту имеют междисциплинарный характер, ориентированы на создание информационно-технологического обеспечения для задач мониторинга и оценки состояния окружающей природной среды. Приоритетом являются новые вычислительные технологии, методики и программное обеспечение для геоинформационных веб-систем и геопространственных веб-сервисов, создаваемое в модульной сервис-ориентированной архитектуре.

Цель работы – проведение фундаментальных и прикладных научных исследований методов и технологий разработки интегрированных проблемно-ориентированных систем экологической тематики, основанных на современных веб-ГИС-технологиях.

В процессе выполнения работы проводились теоретические и практические исследования особенностей реализации и эксплуатации информационно-аналитических систем, разработки математического и программного обеспечения. Выполнялись работы по созданию систем экологического мониторинга, по оценке состояния атмосферы Красноярска, экосистемы Красноярского водохранилища. Выполненная работа имеет хорошие перспективы практического внедрения.

Стоит особое внимание обратить на один из результатов проекта – разработанную и внедренную систему мониторинга атмосферного воздуха в Красноярске. Помимо научных на ее основе уже получены практические результаты, сформулированы рекомендации по улучшению экологической обстановки для органов региональной власти. Система получила широкий общественный резонанс, на ее основе работает ежедневная программа на местном телеканале «Прима-ТВ».

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. Методы и модели, технологии комплексного анализа и оценки состояния сложных природных и антропогенных экосистем .....	7
1.1. Геоинформационное моделирование региональных экосистем на основе бассейнового подхода.....	7
1.2. Анализ многомерных данных методом упругих карт для оценки динамики систем ....	10
1.3. Анализ образования туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС.....	14
1.4. Влияние температурных инверсий на загрязнение воздуха в Красноярске .....	17
1.5. Оценка загрязнения приземного слоя атмосферы Красноярска и пригорода.....	21
1.6. Мониторинг биологических ресурсов в водоемах и водотоках на территории Красноярского края .....	24
2. Формирование информационно-вычислительного обеспечения для геоинформационных веб-систем (геопорталов) мониторинга и оценки состояния окружающей среды.....	31
2.1. Система сбора данных для мониторинга состояния атмосферного воздуха .....	31
2.2. Новые интерфейсы и сервисы визуализации данных геопортала ИВМ СО РАН .....	37
2.3. Сервис индексации и поиска данных в слоях геопортала ИВМ СО РАН.....	40
2.4. Средства автоматизации разработки проблемно-ориентированных веб-ГИС .....	44
2.5. Веб-приложение для визуализации, анализа и обработки пространственно-временных данных аграрного мониторинга .....	48
3. Проектирование и разработка алгоритмов и программ для проблемно-ориентированных информационно-аналитических систем и сервисов .....	54
3.1. Анализ методов организации информационного пространства данных мониторинга .	54
3.2. Создание каталога данных мониторинга, оценки и управления территориальными рисками ЧС.....	57
3.3. Разработка новых способов конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта .....	61
3.4. Разработка и тестирование алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования мультиагентных потоков....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации по проекту за 2021 год.....	74

## ВВЕДЕНИЕ

В представленном отчете содержатся результаты научных исследований и разработок, выполненных в проекте в 2021 году.

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

Представленные 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 также уделялось 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 активно используется в экологических, природно-ресурсных, физико-географических, агроэкологических, ландшафтно-климатических, и др. исследованиях. Бассейн представляет собой целостную геосистему с определенным набором природных характеристик. 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. Это огромный набор атрибутов включает характеристики рельефа в бассейнах, морфометрические характеристики рельефа, климатические показатели, тип почв и почвообразующих пород, растительный покров, антропогенная нагрузка и т.д. Для хранения и обработки этих данных эффективно использовать методы ГИС и веб-технологии.

Задачей исследования стала разработка информационного обеспечения на основе бассейнового подхода для задач оценки состояния экосистем с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования.

В качестве элементарной территориальной единицы выступают минимальные водосборные бассейны со средней площадью около 1 га. Для каждого бассейна средствами геоинформационного моделирования формируется набор атрибутов уникальных природных характеристик, которые получены на основе наземных и спутниковых исследований, а также климатических данных реанализа. Такой набор атрибутов позволяет проводить оценку состояния территории используя различные методы математического моделирования, статистического и кластерного анализа.

Исследования проводились на примере «пилотной» территории четырех водосборных бассейнов в Восточной Сибири. Это бассейны рек Красноярского края – Кан, Мана, Туба и Оя – общей площадью около 1 млн. га, расположенные в пределах 91°-97° в.д. и 52°-56° с.ш.

Бассейновое моделирование территории проводилось на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа MERIT DEM Hydro (пространственное разрешение около 70 м). На сегодняшний день эта модель является одной из лучших для Красноярского края, так как она содержит детальные данные для территории севернее 60° с.ш., и в ней наименьшее количество ошибок точности по высоте.

Для исследуемой территории была создана 4-уровневая иерархическая система водосборных бассейнов с учетом гидрографической сети разных масштабов. Получено 1105 бассейнов 4-го уровня, в том числе для р. Кан – 479 бассейнов 4-го уровня водосборного деления, Мана – 94 бассейна, Туба – 483 и Оя – 49 бассейнов.

Для каждого водосборного бассейна был вычислен набор атрибутов. В том числе – данные по температуре, вегетационным индексам, растительному покрову – на основе спутниковой информации Terra/MODIS. По данным реанализа NASA GPM и NCEP GFS для всех элементарных водосборных бассейнов были сформированы данные по накопленным осадкам и ряду других характеристик за период 2001–2019 г. (Рис. 1). Почвенный покров создавался по цифровым данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов (ЕГРПР), это почвенная карта РСФСР (1988) масштаба 1:2 500 000 под редакцией В.М. Фридланда. Для каждого бассейна была добавлена информация о преобладающем типе почв. На основе перечисленной информации был создан ряд производных характеристик природно-ресурсной тематики.

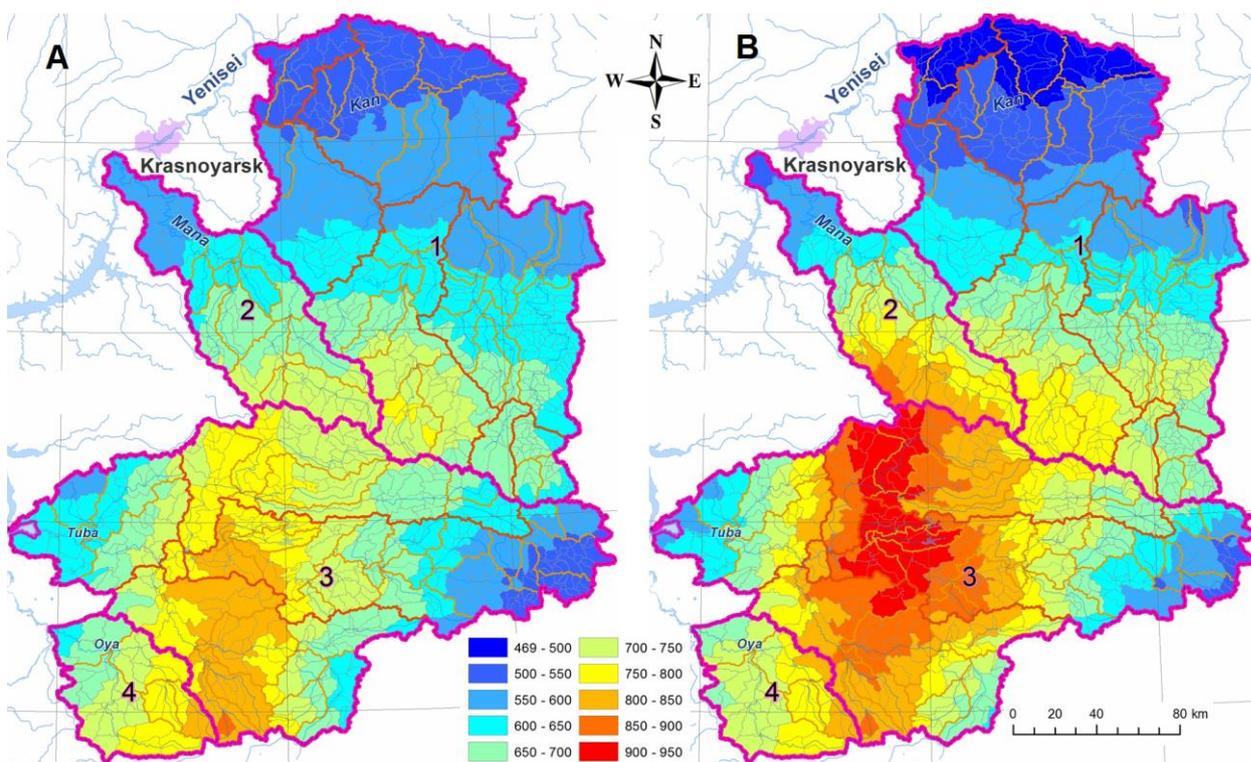


Рисунок 1 – Среднегодовые значения накопленных осадков на исследуемой территории: А) в среднем за период 2001-2020 гг., В) за отдельный 2019 год.

Был выполнен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхно-

сти в течение года для каждого водораздела. Посчитана сумма активных температур воздуха выше 10°C.

Были получены статистические значения и среднегодовые характеристики трендов изменения вегетационных индексов NDVI, SAVI и LAI для каждого водораздела. Накопленная статистика позволяет выполнять количественную оценку развития сельскохозяйственных культур на рассматриваемой территории (Рис. 2).

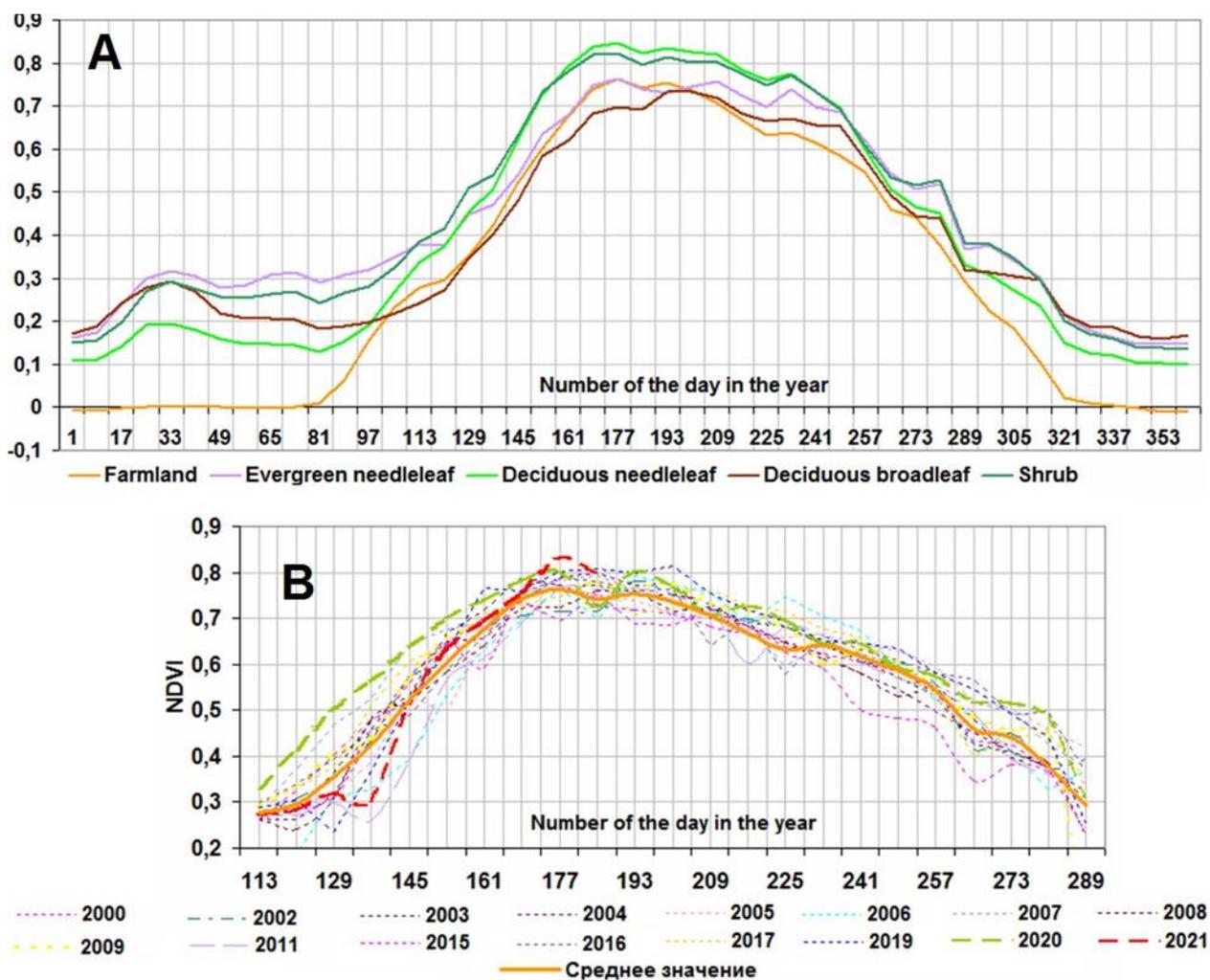


Рисунок 2 – Динамика вегетационного индекса NDVI на исследуемой территории за период с 2000 по 2021 годы: А) для разных типов растительного покрова, В) для сельскохозяйственных территорий.

Сформированный набор природных характеристик-атрибутов позволил провести кластерный анализ по выявлению однородных участков по данным годового температурного хода. Было выявлено, что нелинейная кластеризация методом эластичных карт надежно выявляет кластеры, объединяющие небольшие водные бассейны в группы со схожими географическими, климатическими и ландшафтными свойствами.

Разработана детальная многоуровневая иерархическая система водосборного деления территории Красноярского края. Созданная геоинформационная модель является инструментом для обеспечения задач оценки состояния региональных экосистем на основе ландшафтно-бассейнового подхода. Разработаны необходимые методы и технологии по созданию, хранению и обработки данных о каждом водоразделе. Методы многомерного анализа данных позволяют выявлять закономерности распределения данных, определять взаимосвязи между ними.

*Основные публикации по разделу:*

- Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Методы и технологии геоинформационного моделирования региональных экосистем на основе бассейнового подхода // Материалы Международной конференции «Экологический мониторинг: методы и подходы». Красноярск, 2021. С. 60-62.
- 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
- Ерунова М.Г., Гостева 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

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

В рамках задания 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.

*Анализ и визуализация многомерных данных в задачах биомедицины*

Метод упругих карт был применён для анализа медицинских данных по изучению динамики развития моторных симптомов болезни Паркинсона – инвалидизирующего нейродегенеративного заболевания. Одной из проблем в лечении данного заболевания являет-

ся подобие моторных симптомов, наблюдающихся как при этом заболевании, так и при другом — эссенциальном треморе — имеющим иную этиологию и требующим другого лечения. Анализ данных по тремору (непроизвольное дрожание конечностей) не позволил однозначно различить эссенциальный тремор и болезнь Паркинсона.

В связи с этим в анализ были включены данные по немоторным симптомам этих двух заболеваний, а именно определение уровня нарушения восприятия запахов. Уровень нормальности в восприятии запахов определялся с помощью Sniffin' Test метода. Для этого был изменён исходный протокол обследования, поскольку результаты клинических обследований показали, что стандартный протокол вносит систематическую ошибку в результаты измерений. Включение данных по определению ольфакторной функции пациента дополнительно к данным по тремору позволило надёжно дифференцировать болезнь Паркинсона и эссенциальный тремор у больных. В настоящее время ведутся дополнительные исследования по уточнению качества измерения ольфакторной функции человека, что позволит повысить точность и чувствительность дифференциальной диагностики этих заболеваний.

На рисунке 3 показано распределение больных, страдающих эссенциальным тремором и болезнью Паркинсона, на упругой карте во внутренних координатах. Хорошее качество дифференциальной диагностики было получено путём сочетанного изучения показателей треморографии и обоняния у таких пациентов. Хорошо видно, что кластеризация не является идеальной: часть пациентов попадает в «чужой» кластер. Это может объясняться ошибками в диагностике заболевания; более того, такое несовпадение приводит к перепроверке диагноза и 3 трёх пациентов он был изменён.

#### *Анализ соотношения роли структуры, функции и таксономии на основе генетических данных*

Другим направлением приложений нелинейных методов статистического анализа многомерных данных были исследования по биоинформатике; изучалась связь между функцией, кодируемой генами, их структурой (понимаемой как триплетный состав этих генов) и таксономией носителей этих генов. Для исследования были выбраны два семейства генов: гены АТФ-синтаз митохондрий растений и хлоропластов растений, а также гены NADH<sup>+</sup>-дегидрогеназ генов тех же органелл. Такой выбор обусловлен тем, что это два единственных гена, встречающиеся в геноме каждой из органелл. Тем самым, проверялась гипотеза о том, что именно — функция или таксономическое положение носителя генов — будет решающим фактором при кластеризации этих генов по частотам их триплетов.

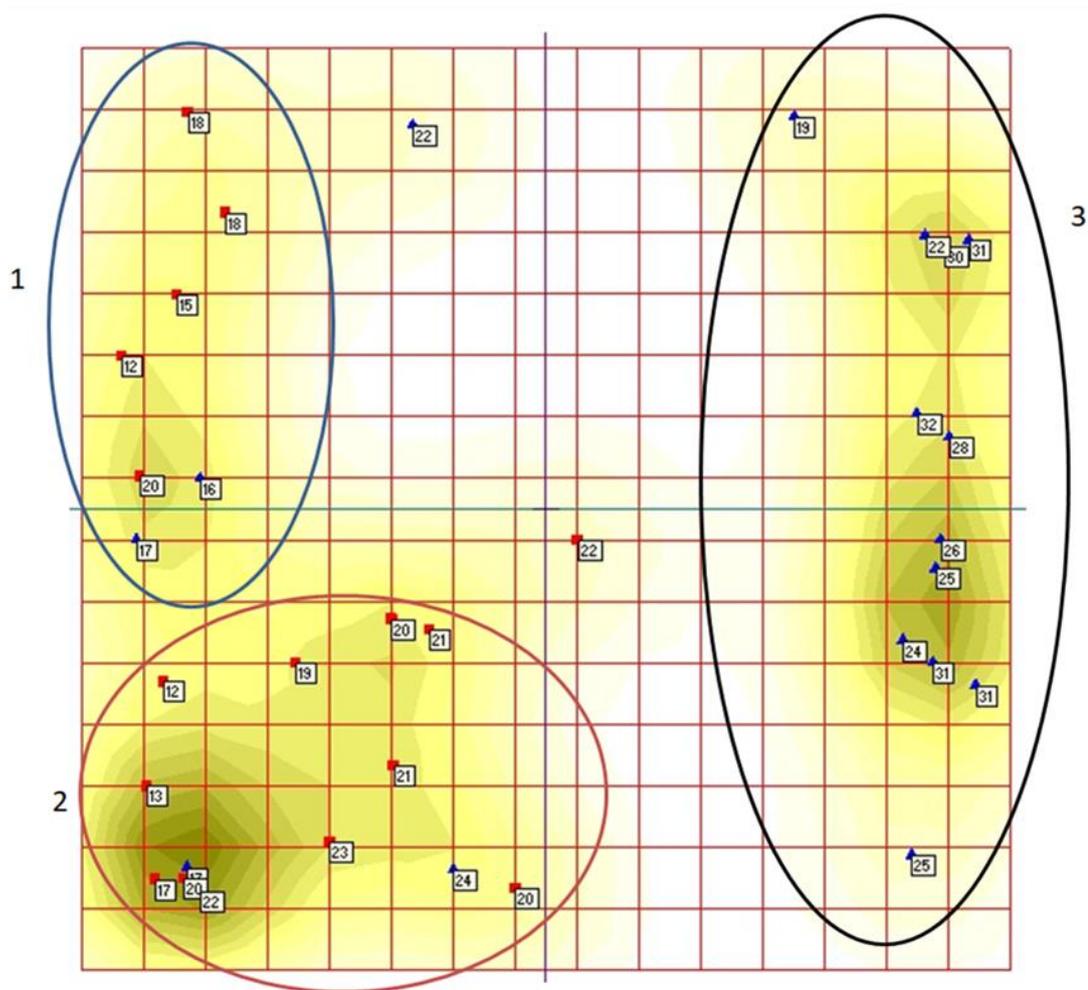


Рисунок 3 – Распределение больных эссенциальным тремором (красные квадраты) и болезнью Паркинсона (синие треугольники) в пространстве переменных, определяемых по треморографии и обонятельной функции больных.

Для проведения исследования были из геномов соответствующих органелл одного и того же вида растений извлечены указанные гены; ген АТФ-синтазы кодирует 6 субъединиц (и, соответственно, содержит шесть генов), а ген NADH<sup>+</sup>-дегидрогеназы содержит 11 субъединиц. Для изучения внутренней структурированности указанных генетических материалов каждый ген преобразовывался в словарь частот триплетов: список всех триплетов (троек нуклеотидов, стоящих подряд в последовательности) с последующим анализом методом упругих карт.

На рисунке 4 представлено распределение генов в пространстве частот триплетов; слева показано распределение по субъединицам, справа – по таксонам. Хорошо видно, что в один и тот же кластер входят гены от всех таксонов, взятых в рассмотрение. При этом для распределения по субъединицам такого перемешивания не наблюдается: каждый кластер сформирован генами, кодирующими одну и ту же субъединицу. Полностью аналогич-

ная картина наблюдается и для генов АТФ-синтазы и NADH<sup>+</sup>-дегидрогеназы митохондрий растений. Наблюдаемая картина однозначно доказывает превалирующую роль функции при кластеризации соответствующих генов над таксономией.

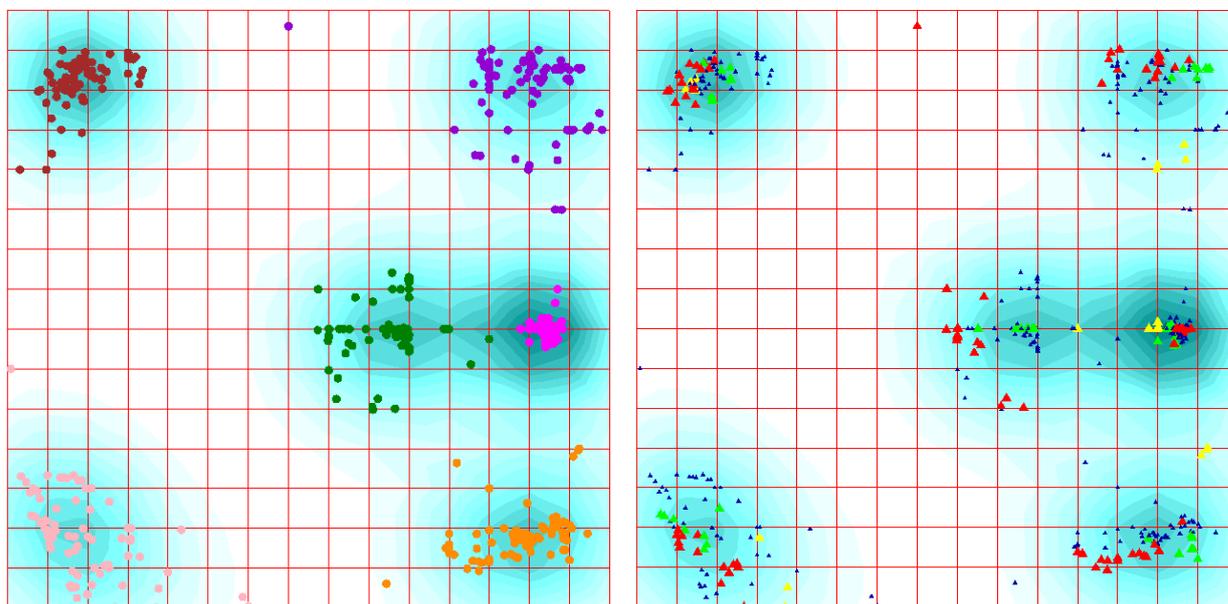


Рисунок 4 – Распределение генов 6 субъединиц АТФ-синтазы в пространстве частот триплетов. Слева кластеры маркированы субъединицами (каждая субъединица окрашена в свой цвет), справа – по наиболее представленным таксонам.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на уровне генов функция, кодируемая ими, является основным фактором, определяющим состав кластеров: в кластеры объединяются гены с одной и той же функцией, а именно субъединицы соответствующих белков (АТФ-синтаз и NADH<sup>+</sup>-дегидрогеназы митохондрий растений).

Все эти результаты свидетельствуют о высокой эффективности методов, разработанных в ходе выполнения базового проекта. Данные методы могут быть применены для анализа данных самой разной природы, при условии, что сама структура данных у них близка: данные должны быть метрическими и не иметь очень высокой корреляции между переменными.

*Основные публикации по разделу:*

- Pokhabov D.V. et al. 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

### 1.3. Анализ образования туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Туманы являются опасным явлением погоды, которые формируются, развиваются и рассеиваются в результате взаимодействия между различными микрофизическими, динамическими, радиационными и химическими процессами, действующими в пограничных слоях, при определенных метеорологических процессах. Работа направлена на изучении условий формирования туманов в городе Красноярске.

Река Енисей по объему стока самая большая в России (599 км<sup>3</sup>/год) и шестая по величине в мире (1.5% мирового стока). Красноярская ГЭС, построенная в 1967 г., является ключевым антропогенным фактором, влияющим на реку Енисей. Температура поступающей воды из водохранилища в течение года изменяется от 2°C до 12°C. В Красноярске и его пригороде размещены 9 постов наблюдения, которые выполняют измерение метеорологических параметров (влажность, температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра) и концентрацию загрязнений PM<sub>2.5</sub> в атмосфере. Данные собираются с периодом в 20 минут и автоматически передаются в Краевую систему наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. В дальнейшем они попадают в информационную систему научно-исследовательского мониторинга природной среды Sensor Collector на геопортале ИВМ СО РАН. Температура воды в нижнем бьефе измерялась ежедневно в 8 часов утра на городском водозаборе «Гремячий Лог». Для дистанционного зондирования туманов использовались данные со спутников Sentinel-2 и Landsat-8. Наблюдение туманов выполнялось визуально и с данных камер видеонаблюдения (рис. 5).



Рисунок 5 – Туман над Енисеем 31 июля 2021 г. в 07:30. Фотография с веб-камеры, размещенной возле Николаевского моста.

Туманы, возникающие в рассматриваемых условиях следует разделить на две категории: адвективные туманы охлаждения и адвективные туманы испарения.

Туманы охлаждения возникают в тёплое время года (июль, август), когда температура атмосферы  $T_a > T_w$  (температуры воды). Тёплый воздух с относительной влажностью  $RH < 100\%$  охлаждается при адвекции холодной водной поверхности. При достижении температуры равной температуре точки росы  $T_d$  часть паров переходит в туман. Первый туман охлаждения был зарегистрирован визуально вечером 31 июля 2020 и рассеялся до полудня 1 августа. Движение тумана было направлено по течению реки. На рисунке 6 представлены усредненные по городу Красноярску метеоданные, соответствующие этому времени: скорость ветра (WS), относительная влажность (RH) и температура ( $T_a$ ) воздуха.

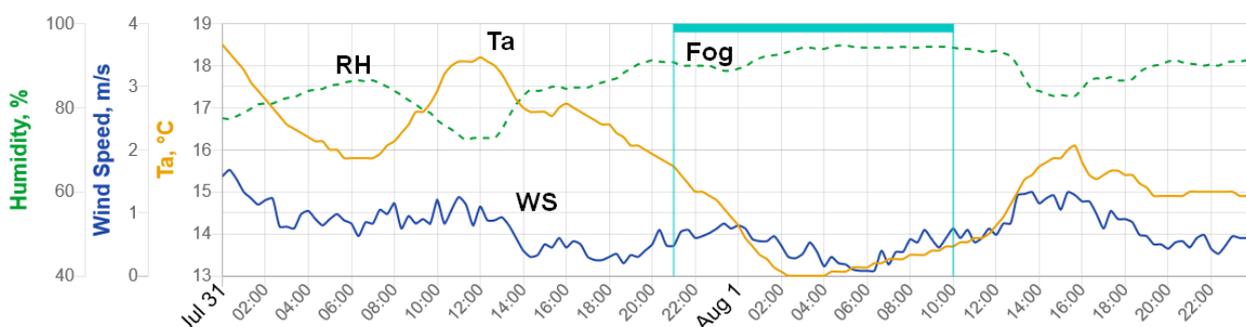


Рисунок 6 – Усредненные по постам наблюдений метеоданные за 31.07 – 01.08 2020 г.

Графики показывают, что 31 июля во второй половине дня относительная влажность RH росла с понижением температуры  $T_a$ , что в конечном итоге привело к образованию тумана. Относительная влажность во время эпизода тумана в прибрежной зоне оставалась равной  $RH = 95\%$ , а температура воздуха составляла  $T_a = 13^\circ\text{C}$ . Для этих значений, температура точки росы составляет  $T_d = 12.2^\circ\text{C}$ . Для достижения точки росы над холодной поверхностью реки требуется понижение температуры воздуха на  $0.8^\circ\text{C}$ . Днем 1 августа температура атмосферы  $T_a$  начала повышаться, поэтому достижение точки росы  $T_d$  стало невозможным, и образование тумана прекратилось. В период существования тумана ветра не было, иногда ветер юго-западный со скоростью  $0.5 \text{ м/с}$ . Однако скорость речного течения составляла  $1.5 \text{ м/с}$ . Температура воды во время тумана составляла  $T_w = 10.6^\circ\text{C}$ . Таким образом, для существования тумана необходимо, чтобы разница температур между воздухом и водой была меньше  $T_a - T_w = 2.4^\circ\text{C}$ .

Туманы испарения формируются зимой, ранней весной и осенью, когда холодный атмосферный воздух соприкасается с относительно тёплой поверхностью воды. Образование таких туманов обусловлено испарением с поверхности реки с последующим охлаждением поднимающихся паров, в процессе турбулентного перемешивания с окружающим холодным воздухом.

На рисунке 7а представлены статистические данные по RH и  $\Delta T = (T_w - T_a)$  во время существования туманов испарения в течение 2020 г., которые показывают, что туманы возникали при разности температур в диапазоне  $8^\circ\text{C} < \Delta T < 25^\circ\text{C}$  и  $RH > 75\%$ . Относительная частота возникновения туманов в зависимости от разности температур представлена на рисунке 7б. Данные показывают, что наиболее вероятное образование туманов испарения происходит при  $20^\circ\text{C} < \Delta T < 25^\circ\text{C}$ .

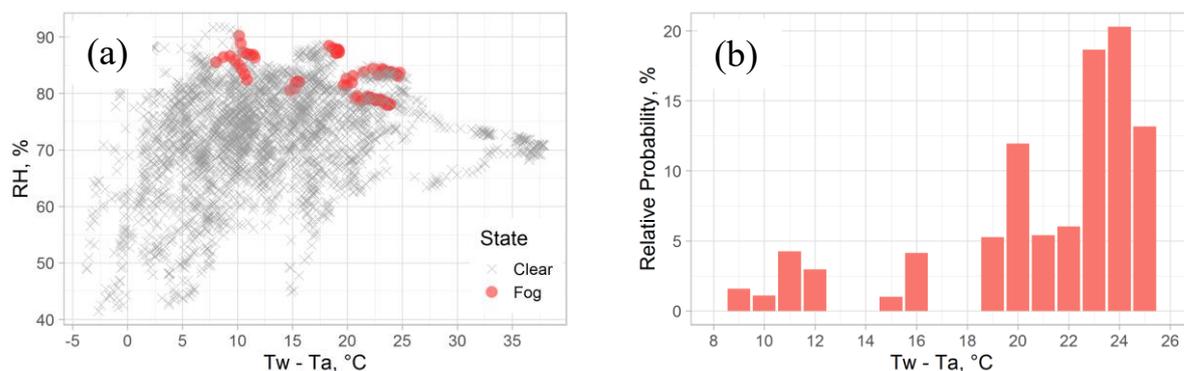


Рисунок 7 – Относительная влажность воздуха и разность температур ( $T_w - T_a$ ) в периоды наличия и отсутствия тумана (Jan, Feb, Nov, Dec 2020). (a) – распределение, (b) – относительная вероятность возникновения туманов.

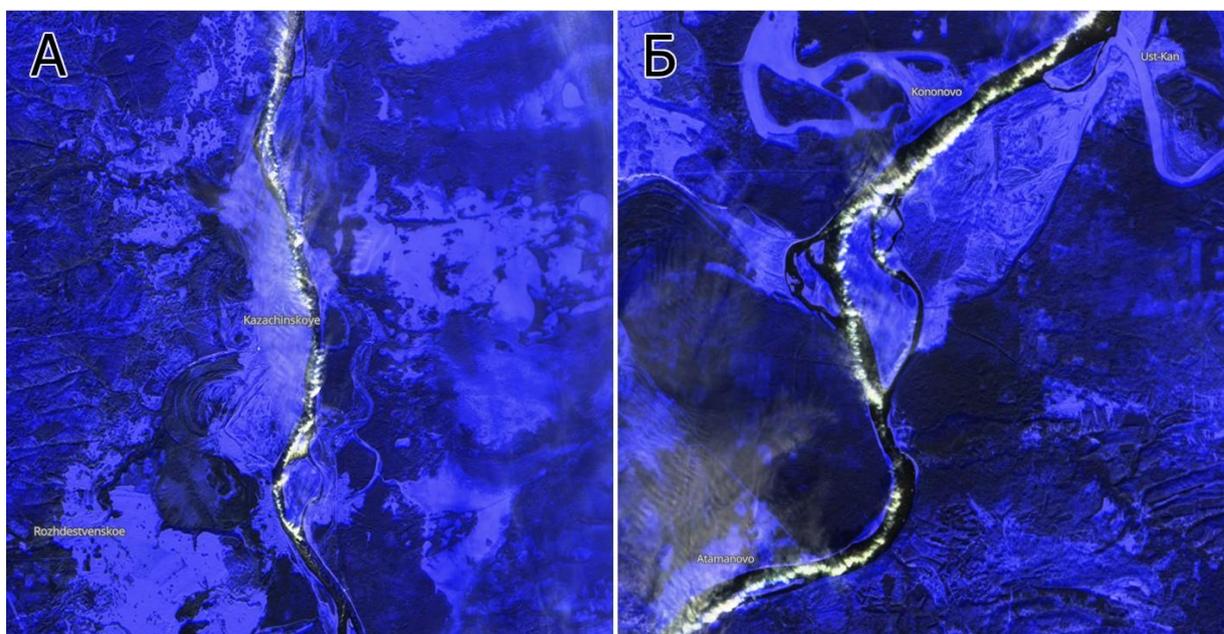


Рисунок 8 –Туманы испарения на р. Енисей (11 января 2020 г, 12:02).

Анализ архивов спутниковых данных Landsat-8 (пространственное разрешение данных видимого диапазона 15 м) и Sentinel-2 (10 м), на которых можно обнаружить туманы

показал, что за весь 2020 год имеется считанное количество сцен и только с изображением туманов испарения. На фрагментах снимка Sentinel-2 за 11 января 2020 г. 12:02 местного времени видны туманы испарения на р. Енисей в районе села Казачинское на расстоянии 300 км от плотины ГЭС (рис. 8А) и деревни Кононово на расстоянии 140 км от плотины ГЭС (рис. 8Б). Туманы испарения наблюдаются практически непрерывно вдоль Енисея на участке до 300 км. Видно, что туман неоднородный, имеет форму страт. Время съемки соответствует началу формирования тумана, изображения представлены в виде комбинации спектральных каналов False color Urban (12/11/4).

Проведена регистрация туманов в течении 2020 г. в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей. Число туманов в г. Красноярске возросло в 1.5 раза по сравнению с ситуацией до строительства ГЭС. Причина формирования туманов обусловлена аномальным гидротермическим режимом в нижнем бьефе ГЭС, приведшим к образованию движущейся подстилающей поверхности в течение года. Показано, что формируются два типа туманов: адвективные туманы охлаждения в летнее время и адвективные туманы испарения зимой, ранней весной и осенью. Адвекция обусловлена течением реки со скоростью более 1.5 м/с. Туманы охлаждения возникают в результате понижения температуры нижнего влажного слоя атмосферного воздуха, при условии: относительная влажность  $RH > 85\%$  а разность температур воздуха и воды  $0 < (T_a - T_w) < 6^\circ\text{C}$ . Туманы испарения формируются при охлаждении водяного пара над поверхностью воды при адвекции поверхности реки относительно холодного слоя атмосферного воздуха и реализуются при  $RH > 75\%$  и  $8^\circ\text{C} < (T_w - T_a) < 25^\circ\text{C}$ . Анализ данных дистанционного зондирования показывает, что туманы испарения формируются в нижнем бьефе на расстоянии до 300 км.

#### 1.4. Влияние температурных инверсий на загрязнение воздуха в Красноярске

Целью данной работы являлся анализ влияния температурных инверсий в приземном слое атмосферы на формирование неблагоприятной экологической обстановки в Красноярске по метеоданным модели реанализа NCEP Global Forecast System (GFS); выявление взаимосвязи между периодами с повышенными концентрациями взвешенных частиц  $PM_{2.5}$  и скоростью, порывами ветра и высотой пограничного слоя атмосферы. Рассматривались данные за два года – 2019 и 2020 гг. Исследуемым районом в данной работе является город Красноярск и прилегающие территории (рис. 9).

По данным Министерства экологии Красноярского края в Красноярске с 2019 по 2020 год было установлено 12 периодов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Периоды НМУ характеризуются низкой скоростью ветра и концентрациями взве-

шенных частиц PM<sub>2.5</sub>, значительно превышающими среднесуточную ПДК, равную 35 мкг/м<sup>3</sup>.

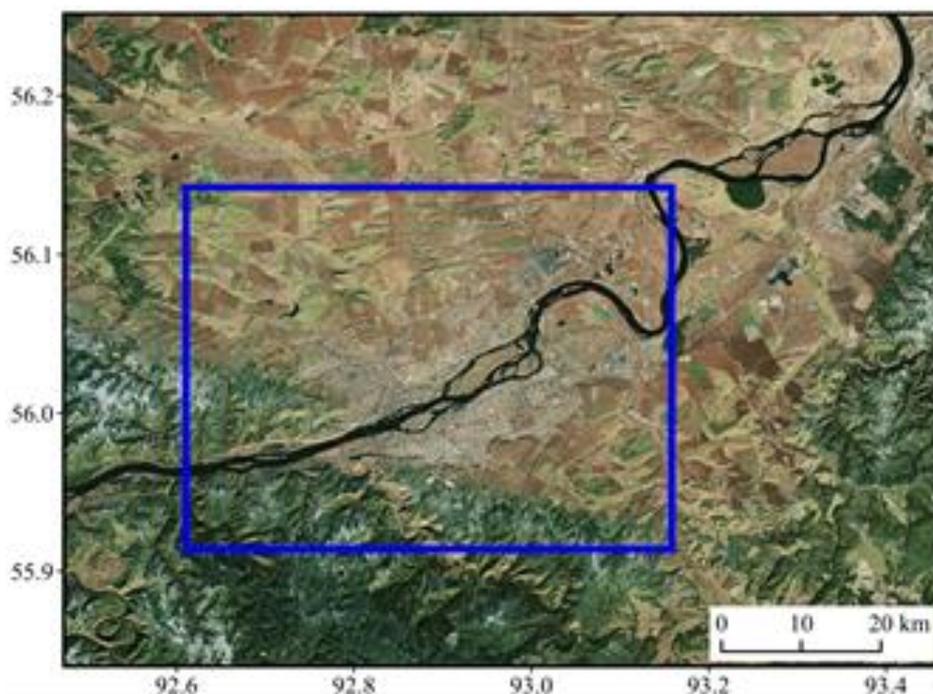


Рисунок 9 – Район исследований: г. Красноярск и окрестности.

Используемая в работе метеорологическая информация из набора данных GFS имеет пространственное разрешение 0.25 градуса (около 25 км на широте города Красноярск). Для оценки температурных инверсий были выбраны данные реанализа GFS на трех изобарических поверхностях: 1000 гПа (высота около 100 м над уровнем моря), 925 гПа (около 750 м н.у.м.) и 850 гПа (около 1500 м н.у.м.), а также данные о высоте пограничного слоя атмосферы и порывах ветра.

Выявление слоев инверсии производилось путем получения отрицательной разности между данными о температурах на разных вертикальных уровнях. При отрицательной разности между температурами на изобарических поверхностях 1000 гПа и 925 гПа – инверсия считалась приземной или приподнятой, если между 925 гПа и 850 гПа – приподнятая или высотная (инверсия свободной атмосферы).

Также в работе использовались данные о концентрациях взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> и скорости ветра системы мониторинга воздуха, полученные на геопортале ИВМ СО РАН. Данные о концентрациях PM<sub>2.5</sub> усреднялись за сутки по всем доступным постам наблюдения в городе. Таким образом были получены среднесуточные значения концентрации взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> для всего города Красноярск.

На основе анализа данных GFS о температуре воздуха на различных вертикальных уровнях проведено сравнение количества дней с температурными инверсиями и дней, ко-

гда среднесуточная концентрация взвешенных частиц PM2.5 превышала среднесуточную ПДК, по месяцам для 2019 и 2020 года (рисунок 10).

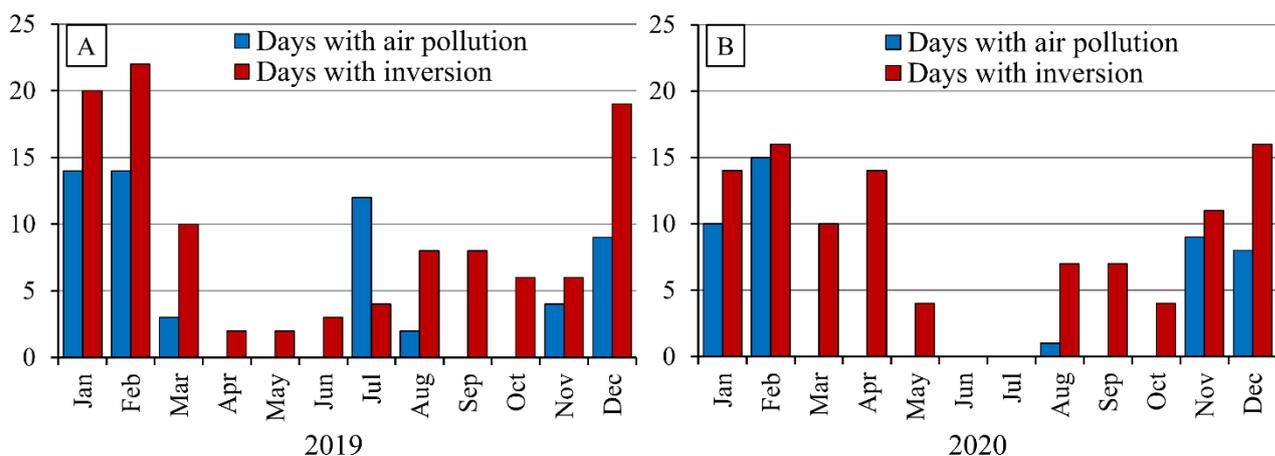


Рисунок 10 – Экологическая обстановка в Красноярске по месяцам в 2019 и 2020 году.

В апреле, мае и ноябре количество дней с инверсиями больше в 2020 году на 19 дней, в остальные месяцы – наоборот, за исключением марта, когда и в 2019 и в 2020 году их количество составляло по 10 дней. В 2019 году дней с «загрязнением» атмосферы было больше, чем в 2020 году на 15 дней.

Общее количество дней с температурными инверсиями в 2019 году составило 110, в 2020 году – 103 дня. Общее количество дней с «загрязнением» атмосферы в 2019 году составило 58, в 2020 году – 43 дня.

Также был проведен анализ данных, который показал устойчивую взаимосвязь между изменениями среднесуточной концентрации PM2.5 и порывами ветра по данным модели GFS. Для примера продемонстрирован период с января по февраль 2020 года (рис. 11). Данный период характеризуется тем, что из 60-ти дней в течение двух месяцев, 24 дня регистрировалось серьезное загрязнение воздуха взвешенными частицами PM2.5.

Периоды повышенной концентрации взвешенными частицами PM2.5 в январе-феврале 2020 года: 09-13.01, 22-23.01, 27-28.01, 31.01, 01-06.02, 14-18.02 и 25-27.02. В эти дни наблюдались температурные инверсии, за исключением 9 января, 5 и 26 февраля. Показано, что при увеличении скорости ветра уровень загрязнения падает и наоборот (рис. 11).

Были проанализированы данные и построены графики, которые показывают величины температурных инверсий ( $\Delta T$ ) в ночное и дневное время для периода с января по февраль 2020 года (рис. 12).

На рисунке 12 синими вертикальными полосами отмечены официальные периоды неблагоприятных метеорологических условий, а оранжевыми вертикальными полосами –

выявленные в результате анализа данных периоды с повышенной среднесуточной концентрацией PM2.5.

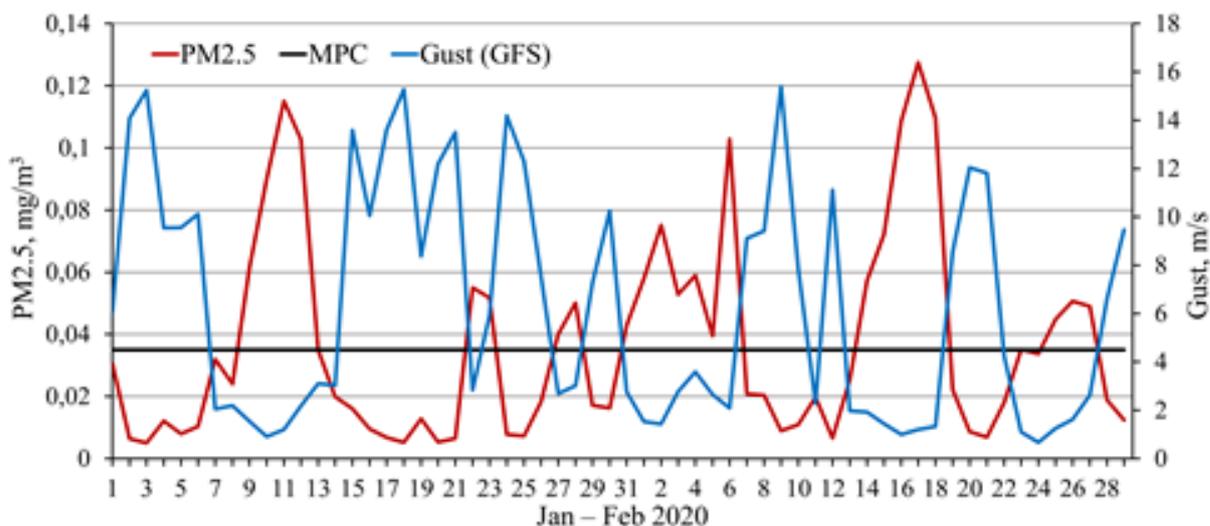


Рисунок 11 – Метеорологическая обстановка в Красноярске в феврале 2020 г. Красный график обозначает изменение среднесуточной концентрации PM2.5, синий график – изменение скорости порывов ветра. Горизонтальной линией обозначена среднесуточная ПДК, равный 5 мкг/м<sup>3</sup>.

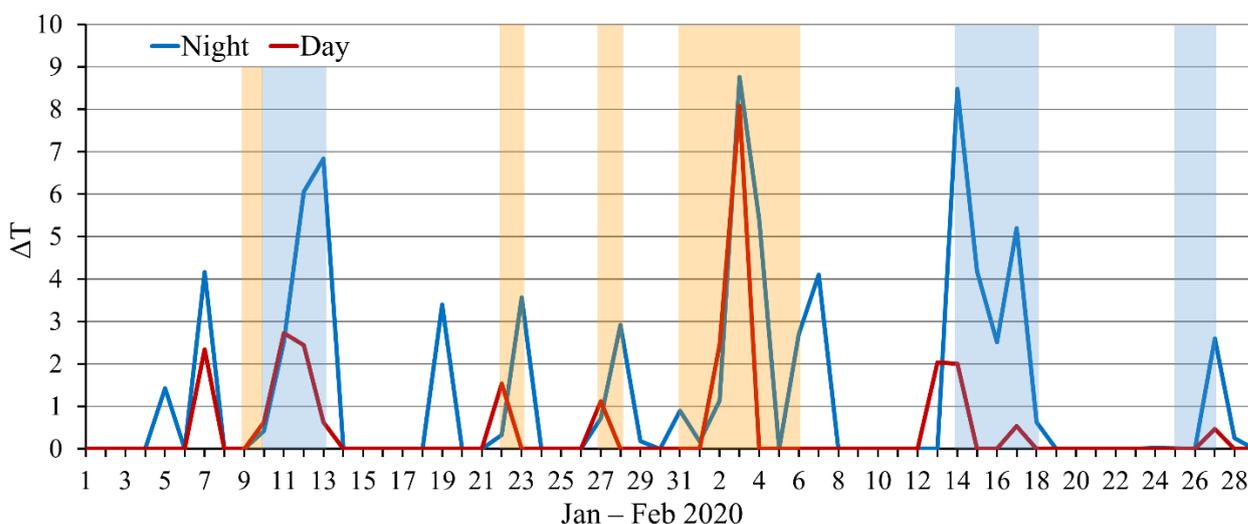


Рисунок 12 – Величины температурных инверсий ( $\Delta T$ ) в январе-феврале 2020 года.

Анализ данных показал, что, как правило, наибольшие значения величины температурных инверсий регистрируются в отмеченные периоды неблагоприятной экологической обстановки в городе (рис. 12). Преобладающий тип инверсии – приземная или приподнятая. В рассматриваемый период ночные инверсии появлялись на 52% чаще, чем дневные.

Также проведено сравнение вариации высоты планетарного пограничного слоя атмосферы со скоростью ветра, полученной по данным наземной станции мониторинга. Ко-

коэффициент корреляции составил 0.79. Это связано с тем, что при высокой скорости ветра уменьшается устойчивость атмосферы, увеличивается турбулентность, что ведет к увеличению высоты пограничного слоя. Корреляция между скоростью ветра, полученной по данным наземной станции мониторинга, и порывами ветра по данным модели GFS, составляет 0,82.

Подводя итоги выполненной работы, следует сделать вывод о том, что между температурными инверсиями и загрязнением приземного слоя атмосферы взвешенными частицами существует прямая связь. Данные о высоте пограничного слоя могут служить дополнительным показателем при исследовании атмосферы Красноярска. Анализ метеоданных модели реанализа GFS способствует решению задач, связанных с изучением нижнего слоя атмосферы, его загрязнения, может сыграть важную роль в более точном выявлении периодов неблагоприятных метеорологических условий и их прогнозировании.

*Основные публикации по разделу:*

- Dergunov A., Yakubailik O. Influence of temperature inversions on air pollution in Krasnoyarsk // E3S Web of Conferences 333, 02002 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202133302002
- Дергунов А.В., Якубайлик О.Э. Влияние температурных инверсий на загрязнение воздуха в Красноярске // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание. Науч. редактор Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. Красноярск, 2021. С. 174-177.
- Dergunov A., Yakubailik O. Analysis of temperature inversion during unfavorable weather conditions in Krasnoyarsk // AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2402, 060040. DOI: 10.1063/5.0071357

#### 1.5. Оценка загрязнения приземного слоя атмосферы Красноярска и пригорода

Исследования загрязнения приземного слоя атмосферы Красноярска и пригорода были выполнены на основе данных сетей мониторинга Краевого государственного бюджетного учреждения «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края» (КГБУ «ЦРМПиООС») и «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» (Система КНЦ СО РАН). Использовалась информация КГБУ «ЦРМПиООС», регистрируемая на семи автоматизированных постах наблюдения (АПН) в Красноярске и двух АПН в пригородной зоне, а также данные с 25 пунктов наблюдения Системы КНЦ СО РАН.

Для оценки уровня загрязнения атмосферы использовались российские гигиенические нормативы (ГН) и рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), представленные в таблице 1.

Таблица 1. Нормативы взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> (мкг/м<sup>3</sup>).

Документ	Среднегодовая ПДК	Среднесуточная ПДК	Максимальная разовая ПДК
ГН 2.1.6.3492-17	25	35	160
Рекомендации ВОЗ	10	25	

Существующие нормативные и методические документы, в частности – РД 52.04.667-2005, регламентируют правила оценки состояния загрязнения атмосферы в населенных пунктах, методы расчета его статистических характеристик. Исходя из этих требований, для расчета среднегодовых концентраций PM<sub>2,5</sub> были использованы данные 17 постов наблюдения, расположенных в границах территории города Красноярска, и 4 постов, размещенных в пригороде. Результаты измерения представлены в таблицах 2 и 3.

Оценка загрязнения приземного слоя атмосферы г. Красноярска с позиции российского норматива показывает, что во всех пунктах наблюдения среднегодовая концентрация PM<sub>2.5</sub> не превысила значение среднегодовой ПДК, которое равно 25 мкг/м<sup>3</sup> (табл. 2). При этом, среднесуточная ПДК, равная 35 мкг/м<sup>3</sup>, была превышена в районе всех постов наблюдения. Наименьшее превышение было зарегистрировано в районе поста Удачный (88/35≈2,5 раза), а наибольшее превышение в районе поста Николаевка (196/35=5,6 раза).

В пригороде Красноярска величина среднегодовой ПДК была превышена только в районе поста наблюдения Солонцы (36,9/25≈1,5 раза) (табл. 3). В этом же месте зарегистрировано самое большое превышение среднесуточной ПДК (235.6/35≈6,7 раза). С позиции рекомендаций ВОЗ только в двух районах Красноярска, а именно в Академгородке и в Удачном, загрязнение приземного слоя атмосферы было ниже 10 мкг/м<sup>3</sup> (табл. 2). На всех остальных постах, расположенных в черте города и его пригорода, загрязнение атмосферы превышало рекомендованный ВОЗ уровень (табл. 2 и 3).

Обращает на себя внимание факт того, что в атмосфере пригорода концентрация PM<sub>2.5</sub> выше, чем в воздушной среде города Красноярска. В районах постов наблюдения Светлый, Дрокино, Минино, Солонцы нет промышленных предприятий и дорог с интенсивным движением автотранспорта. Основными источниками выбросов PM<sub>2.5</sub> в этих населенных пунктах являются автономные источники теплоснабжения (АИТ), для работы которых используется в большинстве случаев бурый уголь.

Таблица 2. Среднегодовая концентрация, максимальная среднесуточная концентрация и количество дней наблюдения в районе постов наблюдения, расположенных в г. Красноярске.

	Пункт наблюдения	Среднегодовая концентрация PM2.5, мкг/м <sup>3</sup>	Максимальная среднесуточная концентрация PM2.5, мкг/м <sup>3</sup>	Количество дней наблюдения
1	Академгородок	8,3±1,4	103,6	362
2	Удачный	8,6±1,1	88,0	366
3	Свердловский	12,6±1,9	117,4	365
4	Солнечный	12,9±1,5	132,2	364
5	Партизана, 3г	13,4±1,9	122,2	366
6	Спутник	15,0±2,2	129,2	366
7	Ленина, 41	15,3±2,7	165,0	366
8	Покровка	15,7±2,5	168,2	361
9	КрАЗ	16,3±2,0	153,2	366
10	Кировский	16,8±2,6	151,7	366
11	Северный	17,2±2,1	149,1	364
12	Шахтеров, 25	17,7±2,2	139,3	366
13	Черемушки	18,1±2,0	125,5	348
14	Песчанка	18,8±1,8	111,9	366
15	Телевизорная, 4Б	21,1±3,2	181,7	366
16	Овинный-Таймыр	22,1±2,9	176,4	364
17	Николаевка	23,3±3,3	196,0	355
	Средняя по городу	16,1±2,2		

Таблица 3. Среднегодовая концентрация, максимальная среднесуточная концентрация и количество дней наблюдения в районе постов наблюдения, в пригороде г. Красноярска.

	Пункт наблюдения	Среднегодовая концентрация PM2,5, мкг/м <sup>3</sup>	Максимальная среднесуточная концентрация PM2,5, мкг/м <sup>3</sup>	Количество дней наблюдения
1	Светлый	13,6±1,7	128,1	366
2	Дрокино	24,6±3,1	166,4	366
3	Минино	24,8±2,8	151,5	366
4	Солонцы	36,9±4,6	235,6	353
	Средняя по пригороду	25,0±3,0		

На основе полученные результатов, сравнения средних по городу и пригороду концентраций взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub>, можно сделать следующие выводы:

- В пригороде, в местах размещения пунктов мониторинга, загрязнение приземного слоя атмосферы выше, чем в городе. Концентрации взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> равны 25,0±3,0 и 16,1±2,2 мкг/м<sup>3</sup>, соответственно.
- С точки зрения российских нормативов воздушная среда в пригороде и в городе Красноярске не загрязнена.
- С позиции рекомендаций ВОЗ воздушная среда в пригороде и в городе Красноярске загрязнена.

*Основные публикации по разделу:*

- Заворуев В.В., Соколова О.В., Заворуева Е.Н., Тихонова Е.В. Взвешенные частицы в приземном слое атмосферы Красноярска и пригорода в 2020 году // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 71-1. С. 97-101. DOI: 10.18411/lj-03-2021-21.
- Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Картографическое веб-приложение для визуализации состояния атмосферы г. Красноярска // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610487 от 12 января 2022 г.

#### 1.6. Мониторинг биологических ресурсов в водоемах и водотоках на территории Красноярского края

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<sup>1, 2</sup>.

---

<sup>1</sup> Балушкина 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.

<sup>2</sup> 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>

Организмы зообентоса (беспозвоночные животные, обитающие на дне водоемов) широко применяются в качестве перспективных индикаторов для оценки загрязнения водных экосистем. Существенное преимущество оценки качества вод по составу зообентоса состоит в том, что большая продолжительность жизни донных животных позволяет оценивать качество вод даже по рекогносцировочным обследованиям.

В отчетном году был проведен ряд полевых гидробиологических исследований в бассейне Енисея и обобщены собственные материалы биосъемок, проведенных в предыдущие годы. Конечной целью данных работ являлась оценка экологического статуса водных объектов методами биоиндикации по структуре донных сообществ. На данный момент наиболее значимые результаты достигнуты на реках бассейна Енисея и р. Чулым.

### *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 г. В р. Енисей мониторинг проводили на нескольких участках от истока до дельты включительно. Исследованные водотоки являются горными реками, в донной фауне которых преобладают литореофильные организмы, заселяющие каменистые грунты на большом течении при низких температурах воды и благоприятном кислородном режиме. В зообентосе обнаружен 231 вид и таксон более высокого ранга макробеспозвоночных, широко распространенных в Палеарктике и Голарктике. Наибольшим видовым богатством (более 100 видов) отличались рр. Мана и Кан. Река Енисей характеризовалась бедным видовым составом, в котором число таксонов увеличивалось от верховья (48) к устью Ангары (69). Структурообразующие комплексы в исследованных водотоках имели некоторые отличия (рис. 13).

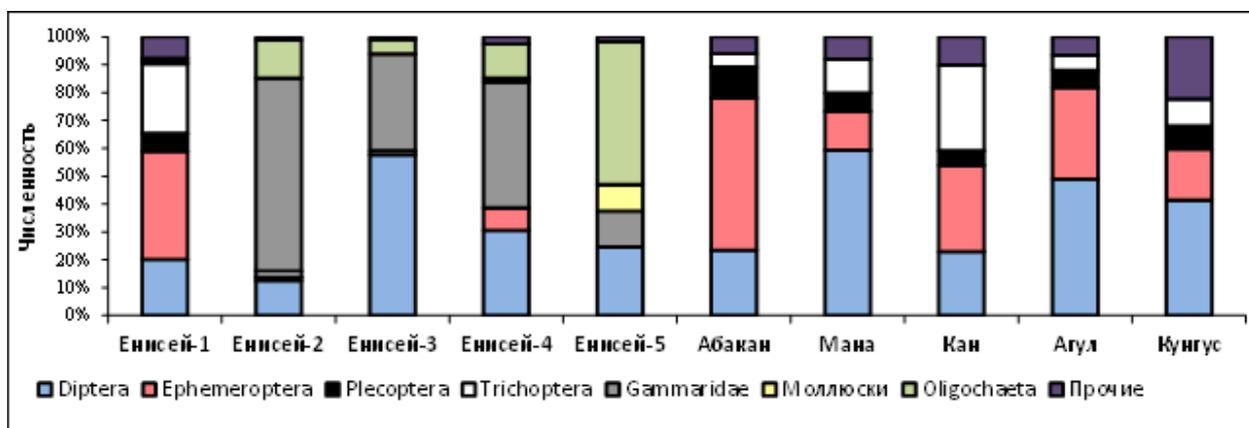


Рисунок 13 – Структурная организация донных сообществ в Енисее и его притоках.

В Енисее в пределах республики Тыва (участок Енисей-1) преобладали поденки, ручейники и хирономиды. В пределах республики Хакасия (участок Енисей-2) широко распространены фитофильные биоценозы, массово заселенные амфиподами. На участке Енисей от плотины Красноярской ГЭС до устья Ангары (участок Енисей-3) доминировали хирономиды и амфиподы. В Енисее ниже устья Ангары (участок Енисей-4) увеличивается доля олигохет, и в низовье (участок Енисей-5) они составляют половину бентосных сообществ. Донные сообщества в притоках Енисея представлены преимущественно хирономидами и поденками, в р. Кан численность дополняли ручейники.

Для оценки качества воды по донным сообществам использовали комплексный подход, включающий анализ нескольких биоиндикационных показателей, которые традиционно используются в отечественных гидробиологических исследованиях (индексы Шеннона *H*, Балушкиной *K* и Гуднайта *G*) или рекомендованы Европейской Рамочной Водной Директивой (ЕРТ, *BMWP*, *ASPT*, *FBI*)<sup>3</sup>. 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<sup>4</sup> (табл. 4), при этом каждому классу качества присвоен соответствующий цвет.

Таблица 4. Ранжирование биотических индексов в соответствии с российскими стандартами.

Класс	Качество воды	Цвет	<i>BMWP</i>	<i>ASPT</i>	<i>FBI</i>	<i>G</i>	<i>K</i>	<i>H</i>
I	Условно чистая	Голубой	>100	>7	<4.25	<30		>3.1
II	Слабо загрязненная	Зеленый	70-99	6-6.9	4.26-5.0	31-50	0.14-1.08	2.1-3.0
III	Загрязненная	Желтый	40-69	5-5.9	5.01-5.75	51-70	1.08-6.5	1.1-2.0
IV	Грязная	Оранжевый	10-39	4-4.9	5.76-6.5	71-90	6.51-9.0	0.5-1.0
V	Экстремально грязная	Красный	<10	<3.9	6.51-10.0	90-100	9.1-11.5	>0.5

<sup>3</sup> Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. Экологическое качество пресных вод. 2-е изд., исправленное. Минск: Беларуская навука, 2011. 328 с.

<sup>4</sup> РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. «Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши» (утв. Росгидрометом 8.12.2016), 2016. – 104 с.

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 проведенной экологической оценки представлены в ГИС на платформе “Енисейская Арктика” (<http://www.eniseyartika.ru/>).

#### *Исследования бассейна р. Чулым*

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. Отбор проб проводили на 18 станциях. Рельеф поверхности сложный, в бассейне хорошо различаются горная, холмистая и равнинная части. Целью исследования являлась оценка экологического состояния модельного водотока смешанного типа (с выраженными горными, полугорными и равнинными участками) по составу и структуре донных сообществ с использованием интегрального биоиндикационного показателя и статистического анализа данных.

В реке обнаружено 170 видов и таксонов более высокого ранга макробеспозвоночных, характерных для горных и предгорных водотоков различных регионов <sup>5</sup>. Зообентос состоял преимущественно из личинок амфибионтных насекомых: хирономид, веснянок, поденок и ручейников. На исследованном участке р. Чулым меняет характер от горного до равнинного, что сопровождается замедлением течения и увеличением илистых отложений в русле. В этой связи наблюдалась закономерная перестройка таксономической структуры зообентоса: от верховья к низовью увеличивалась доля хирономид в общей численности, при этом снижалась доля индикаторной группы ЕРТ (поденки, веснянки, ручейники).

---

<sup>5</sup> Andrianova A.V. Biotic indices and metrics in assessment of the water quality of small rivers on the territory of Ergaki nature park (south of Krasnoyarsk krai) // Contemporary Problems of Ecology. 2015. V. 8 (3). P. 358–367. <https://doi.org/10.1134/S1995425515030038>

Для оценки качества воды по донным сообществам использовали комплексный подход, включающий анализ 11 биоиндикационных показателей, в том числе традиционно используемых в отечественных гидробиологических исследованиях: количество видов в сообществе ( $n$ ); индекс видового разнообразия Шеннона ( $H$ ); хириноидный индекс Балускиной ( $K$ ). Остальные индексы и метрики рекомендованы Европейской Рамочной Водной Директивой: EPT Index (суммарное число видов – EPT $n$  или суммарная относительная численность – EPT $N$  поденок, веснянок и ручейников), BMWP (Biological Monitoring Working Party Index) и его производное ASPT (Average Score Per Taxon Index), FBI (Family Biotic Index). Кроме того, были использованы показатели, основанные на соотношении высоко чувствительных и нечувствительных к загрязнению видов макрозообентоса: EPT/Ch – отношение суммарной численности (EPT $N$ ) и числа видов (EPT $n$ ) поденок, веснянок и ручейников к хириноидам.

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. Отдельные индексы можно привести к единообразию в соответствии с градациями по классам качества вод<sup>6, 7</sup>. Однако каждый из индексов, выделяя ту или иную особенность биотического сообщества, недоучитывает другие, в результате чего возникает несоответствие в оценке качества экосистем по различным показателям. Поэтому для определения качества воды в реках смешанного типа, имеющих участки с различными гидроморфологическими условиями, как вариант решения проблемы возможно применение разнообразных статистических методов, в частности кластеризации данных по совокупности нескольких биоиндикационных показателей.

*Статистический анализ данных проводили с использованием программы R.*

Отдельно для весны и осени по каждому из 11 индексов проводился дисперсионный анализ (с уровнем значимости 0.05), позволяющий выявить степень влияния типов грунта на биоиндикационные показатели. Для построения интегрального показателя и разбиения станций на группы по качеству воды применяли метод  $k$ -средних ( $k$ -means), при котором

---

<sup>6</sup> Яныгина Л.В. Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревой // Изв. АО РГО. 2017. № 4 (47). С. 93–100.

<sup>7</sup> Galas J., Dumnicka E., Galus-Barchan A. A comparison of various indices based on benthic macrofauna for the assessment of the ecological status of selected Carpathian streams // Oceanological and Hydrobiological. Studies International Journal of Oceanography and Hydrobiology. 2014. V. 43 (2). P. 123–130. <https://doi.org/10.2478/s13545-014-0124-0>

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. 14). В результате получается, что чем правее центр кластера расположен на рисунке, тем лучше на соответствующих станциях качество воды. Наилучшее качество вод (“условно чистая”) выявлено весной на ст. 2 (район пос. Новомарьясово) и ст. 6 (район хребта Арга), осенью – на ст. 10 (д. Ершово, Назаровская петля) и 12 (д. Красновка). Минимальные значения интегрального показателя и соответственно худшее качество воды (“грязная”) зафиксированы осенью в низовье исследованного участка в районе заказника “Чулымский” (ст. 15–18).

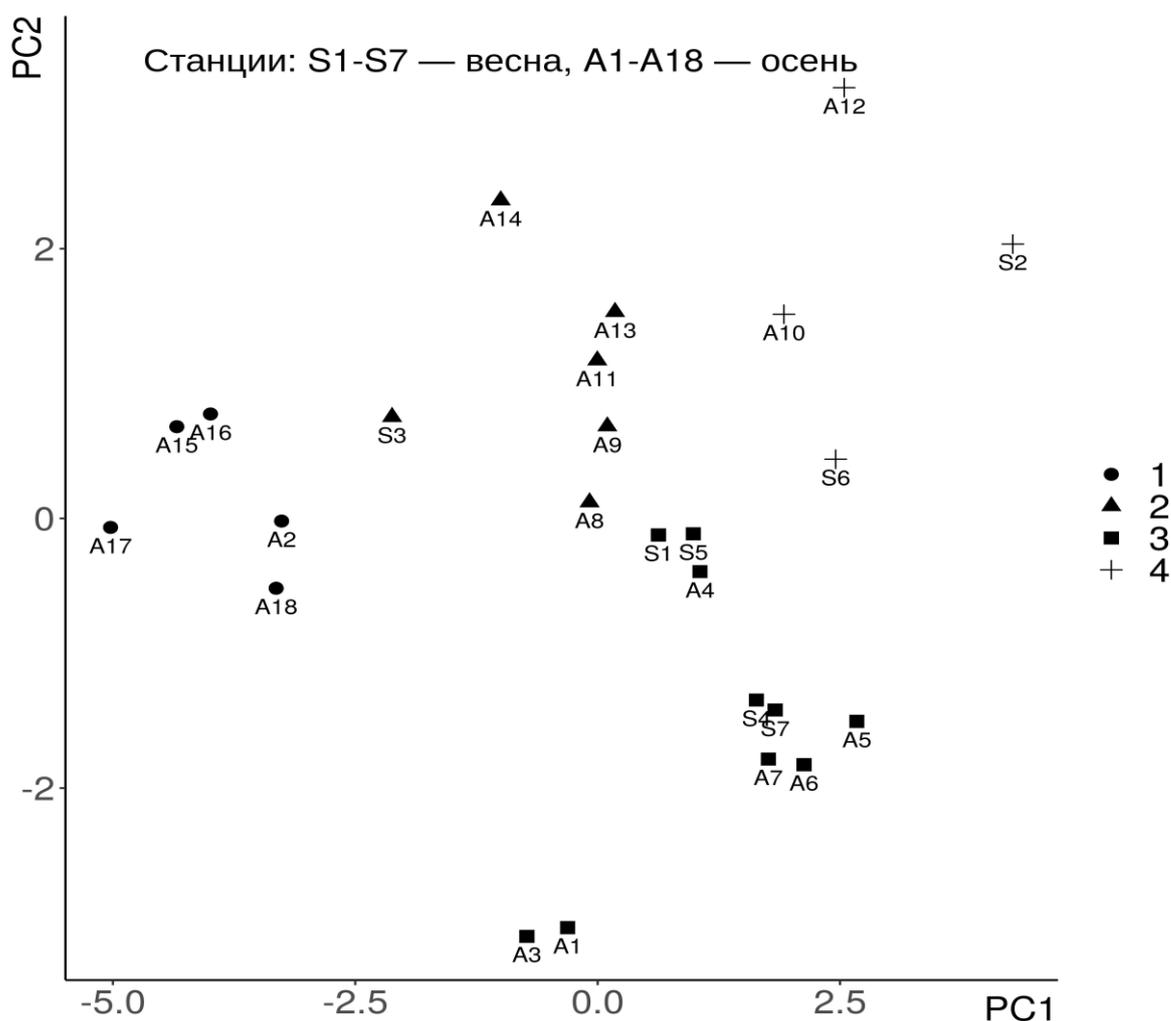


Рисунок 14 – Разделение исследованных станций в р. Чулым по качеству воды методом к-средних: 1 – грязная, 2 – загрязненная, 3 – слабозагрязненная, 4 – условно чистая..

При комплексной оценке экологического состояния реки Чулым, имеющей гидроморфологическую трансформацию от верхнего к нижнему течению, выявлено, что биоиндикационные показатели по составу и структуре донных сообществ имели неоднородное распределение вдоль исследованного участка. Для большинства метрик и биотических индексов наблюдалось отсутствие согласованности. Одним из естественных факторов окружающей среды, влияющим на оценку экологического состояния водотока, является тип донных отложений. Например, наблюдалось снижение качества воды при смене биотопов Песчано-галечные–Макрофиты–Ил–Песок; при этом типом грунта объяснялось до 60 % вариации данных. Интегральный показатель, рассчитанный по совокупности биотических индексов и метрик с привлечением статистического анализа, позволил ранжировать контрольные створы по категориям, соответствующим Российскому государственному стандарту. 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.

*Основные публикации по разделу:*

- Андрианова А.В. Оценка экологического состояния рек бассейна Енисея по организмам зообентоса // Енисейская Арктика. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2021. С. 82–84.
- Шпет С.Д., Спицына Т.П., Тасейко О.В., Андрианова А.В. Гидрохимические и биоиндикационные показатели качества воды в реке Базаиха // Енисейская Арктика. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2021. С. 48–51.
- Майнагашева А.Л., Спицына Т.П., Андрианова А.В. Структура донных сообществ реки Базаиха // Енисейская Арктика. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2021. С. 85–87.
- Андрианова А.В., Шанько Ю.В. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа // Экология (в печати).

2. Формирование информационно-вычислительного обеспечения для геоинформационных веб-систем (геопорталов) мониторинга и оценки состояния окружающей среды

### 2.1. Система сбора данных для мониторинга состояния атмосферного воздуха

В течение нескольких лет сотрудниками ИВМ СО РАН выполняется работа по поддержке и развитию системы сбора оперативной информации о состоянии атмосферного воздуха в городе Красноярске и Красноярском крае. Сбор оперативных данных для научных исследований и мониторинга состояния атмосферного воздуха осуществляется в единую систему «Данные оперативного мониторинга» Института вычислительного моделирования СО РАН (<http://sensor.krasn.ru/sc/>).

На конец 2021 года реализован сбор оперативных данных по атмосферному воздуху в Красноярском крае и Красноярске с нескольких источников и созданы следующие разделы:

- Система мониторинга состояния атмосферного воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН.
- Подсистема мониторинга атмосферного воздуха КВИАС КГБУ «ЦРМПиООС».
- Данные системы мониторинга ФГБУ «Среднесибирское УГМС».
- Оперативные данные метеонаблюдений СИНОП.
- Данные экологического мониторинга проекта Krasnoyarsk.nebo.
- Данные экологического мониторинга проекта Эковизор.
- Данные с ряда метеостанций и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

На старте создания системы данные об атмосферном воздухе загружались из федеральной и краевой сети постов наблюдения. Данные федеральной сети формируются на основе информации, получаемой с официального веб-сайта ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (<http://meteo.krasnoyarsk.ru/>). Архив ведется с начала 2013 года. Данных по загрязняющим веществам в открытом доступе нет. Данные краевой сети формируются из Краевой ведомственной информационно-аналитической системы (КВИАС) о состоянии окружающей среды Красноярского края. Наблюдения за качеством атмосферного воздуха в Красноярском крае проводятся в настоящее время на 12 автоматизированных постах наблюдений (АПН). Помимо метеоданных доступна информация по большому числу загрязняющих веществ, включая данные по содержанию взвешенных частиц.

Осуществляется сбор данных с собственной сети станций Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН». Данные собираются с 24 устройств измерений автоматизированной информационной системы мониторинга качества воздуха, позволяют получать данные измерений содержания взвешенных веществ в

атмосферном воздухе (PM2.5, PM10) и основные метеорологические параметры – температура, влажность и атмосферное давление.

В начале апреля 2021 года между министерством экологии и рационального природопользования Красноярского края, Красноярским научным центром СО РАН и общественными организациями было достигнуто соглашение о создании единой системы мониторинга атмосферного воздуха (<http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/news/0/news/99643>). В результате сотрудниками Института организован сбор дополнительных данных об атмосферном воздухе со станций двух общественных проектов с использованием публичных API – проекта Nebo community (<https://nebo.live>), созданного активистами из Красноярска и проекта «Эковизор», поддержку которого осуществляет региональное отделение партии «Российские зеленые» (<http://online.russiangureens.ru>). Оба проекта осуществляют сбор с приборов данных измерений содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе PM2.5 и основных метеорологических параметров: температура, влажность и атмосферное давление. Часть приборов проекта «Эковизор» оборудованы анемометрами, что позволяет получать информацию о ветре.

На рисунке 15 представлена диаграмма с распределением количества загрузок данных наблюдения за атмосферным воздухом для единой системы мониторинга по каждому месяцу в течении 12 месяцев до ноября 2021 года включительно.

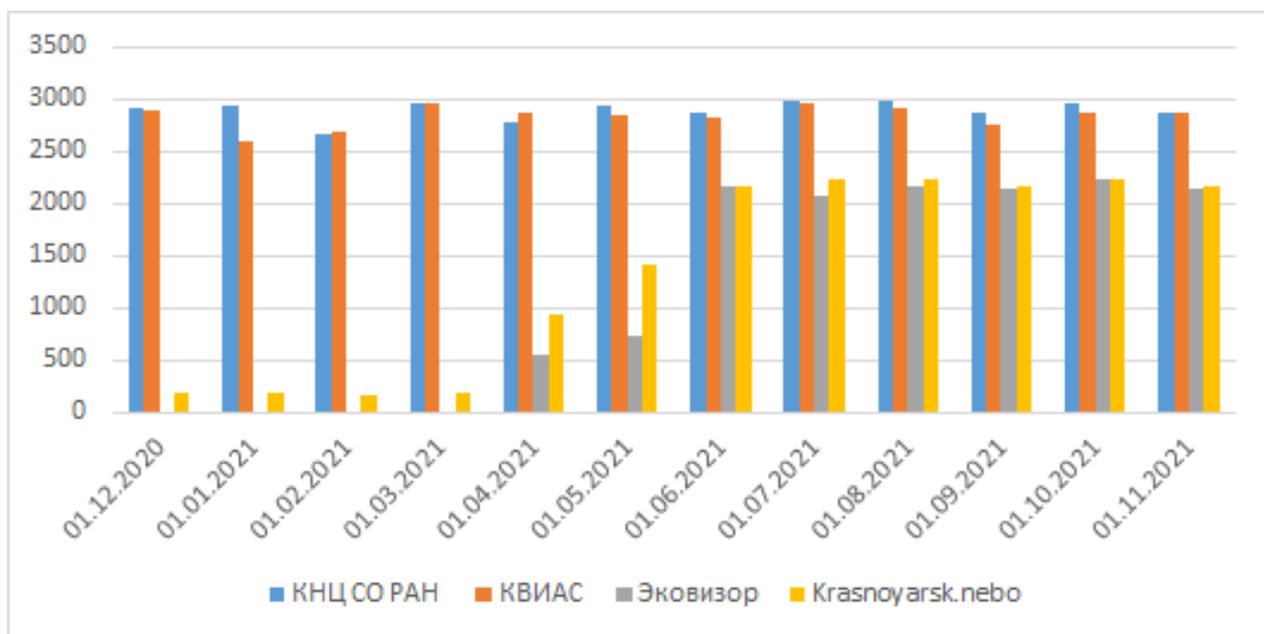


Рисунок 15 – Число загрузок данных измерений в БД по месяцам.

На приведенной диаграмме видно начало загрузки данных из проекта «Эковизор» в апреле 2021 года и увеличение частоты загрузок данных из проекта Nebo community. Данные проекта Nebo community загружались с их сайта ранее, однако до этого они практически не использовались, и частота загрузки была небольшой.

В дополнение к данным со стационарных постов организован сбор данных наблюдений в разных точках города Красноярск. В среднем около двух раз в неделю сотрудниками лаборатории ФИЦ КНЦ СО РАН выполняются полеты с помощью квадрокоптера с датчиками метеоданных (температура, влажность, атмосферное давление) и датчиком концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц PM2.5 над Красноярском и рекой Енисей. Полеты выполняются при погоде, позволяющей эксплуатацию БПЛА (отсутствие сильного ветра, осадков и ограничение по температуре воздуха). Полеты осуществляются вдоль и поперек русла реки Енисей на определенной высоте, а также проводятся измерения в вертикальном направлении на разных высотах в разных точках города. Дополнительно измеряются метеоданные в месте взлета БПЛА, включая данные по ветру.

В связи с большим количеством постоянных источников данных и объемом самих данных, возникла необходимость в дальнейшем развитии системы мониторинга загрузки и анализа ошибок в удобном виде для оперативного принятия решений и исправления ошибок. А также для отслеживания объема поступающих данных в систему. Для оперативной доработки программных модулей сбора данных в дополнение текстовой информации о процессе работы модулей и инструментам оповещения оператора создан сервис сбора статистики. Сервис позволяет накапливать и анализировать информацию с различных программ сбора данных в единой базе данных. Такое решение повышает качество инструментов и сервисов для разработки систем мониторинга окружающей природной среды и повышает стабильность и надежность работы системы в целом.

Сервис статистики позволил проанализировать процесс сбора данных в результате чего была выполнена оптимизация работы ряда сервисов и уменьшен объем загружаемых данных в систему. Некоторые данные загружаются в систему сбора данных наблюдений с наложением на уже существующие данные. Загрузка излишних данных связана с целью предотвратить потерю информации, временно неработающих внешних сервисов, которые не позволяют получать данные по всем постам независимо. Общее число хранимых данных меньше загружаемых в систему.

На рисунке 16 представлена диаграмма с числом загруженных показателей по всем сенсорам и постам для единой информационной системы. На диаграмме видно пример оптимизации без потери качества для краевой системы (КВИАС) после сентября 2021 года. Уменьшение числа загруженных показателей проекта Nebo community связано с временным уменьшением числа работающих станций для будущего перехода на новые станции.

В связи с возросшей нагрузкой и увеличившимся объемом новых данных система 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 алгоритми их обработки.

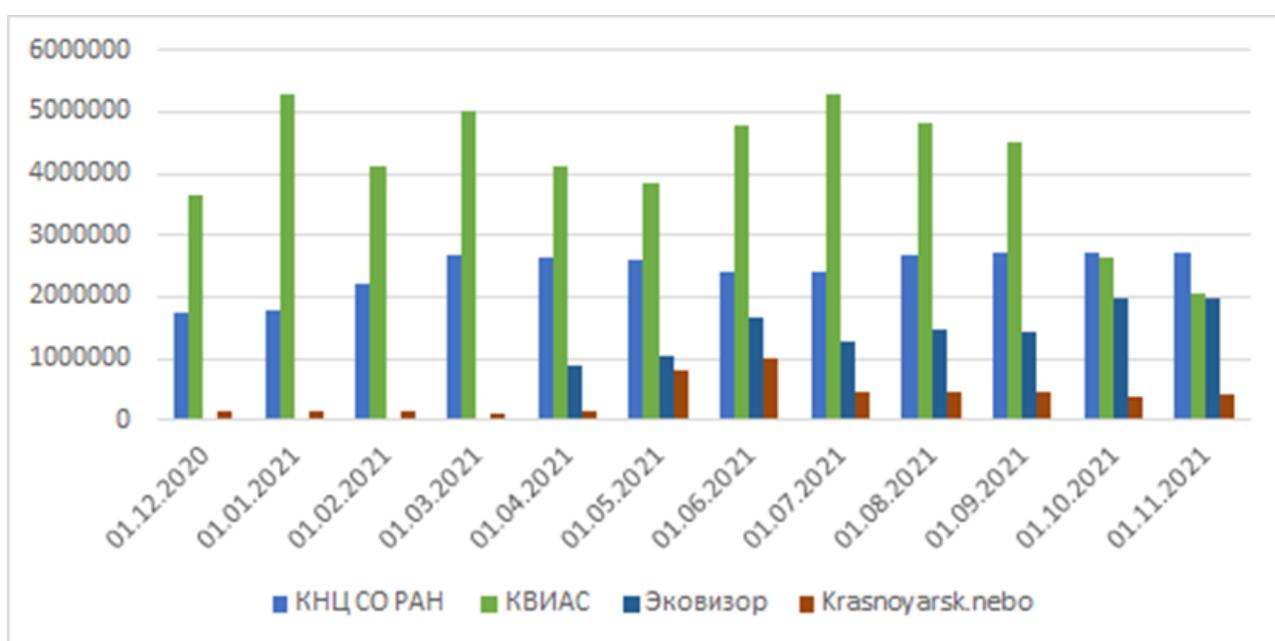


Рисунок 16 – Число загруженных показателей в БД по месяцам.

На рисунке 17 представлена диаграмма с общей статистикой загрузки данных в систему сбора данных почти по всем модулям сбора. За исключением некоторых постов наблюдений, по которым статистика начала собираться недавно. Среднее число загружаемых показателей с датчиков на постах составляет порядка 10 миллионов в месяц, количество загрузок порядка 14 тысяч раз в месяц на 2021 год.

На рисунке 18 представлен пример данных статистики на основе сервиса с использованием платформы с открытым исходным кодом для визуализации, мониторинга и анализа данных Grafana.

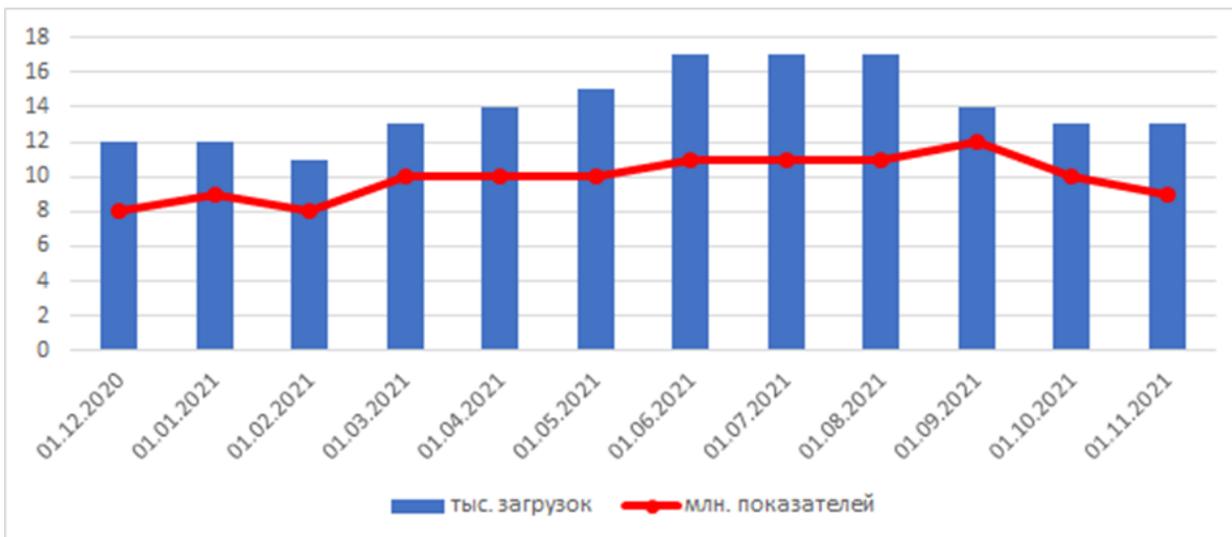


Рисунок 17 – Общая статистика по сервисам сбора данных в БД по месяцам.



Рисунок 18 – Статистика по модулям за неделю в Grafana.

В 2021 году приобретен и запущен в эксплуатацию метеорологический температурный профилемер МТР-5 производства НПО АТТЕХ, предназначенный для дистанционного зондирования, измеряющий излучение в пограничном слое атмосферы на высотах от 0 до 1000 метров с интервалом 5 минут. В стандартном варианте профиль сохраняется с интервалом 50 метров. Профилемер используется для изучения атмосферного воздуха в совокупности с другими источниками метеоинформации и данных о взвешенных частицах в Красноярске. Вид установленного профилемера представлен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Метеорологический температурный профилемер МТР-5 в работе.

В стандартной поставке профилемера идет программа для операционной системы Windows, которая не позволяет работать с данными из других программ и сервисов. Нет никаких инструментов экспорта данных и служебных сервисов. Все данные сохраняются в текстовые файлы. Для решения этой проблемы разработан модуль для системы сбора данных, позволяющий оперативно выгружать данные с профилемера на наш сервер и затем загружать их в систему сбора данных наблюдений. На данный момент загружается порядка 325 показателей в час по всему профилю с шагом 5 минут. Данные профилемера позволят решить широкий круг задач, связанных с анализа качества атмосферного воздуха.

Все данные наблюдений имеют пространственную привязку. Доступ к данным наблюдений из единой системы организован с помощью веб-сервисов, что позволяет использовать их в сторонних системах. С использованием веб-сервисов системы разработан ряд проектов с данными наблюдений, включая сайт и его подразделы с оперативной информацией об атмосферном воздухе в Красноярске, других городах и муниципальных образованиях Красноярского края (<http://air.krasn.ru/>). Комплекс предлагаемых решений успешно зарекомендовал себя как программно-технологическая основа для информационно-аналитических систем регионального уровня.

#### *Основные публикации по разделу:*

- 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
- 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

## 2.2. Новые интерфейсы и сервисы визуализации данных геопортала ИВМ СО РАН

Много лет в Институте вычислительного моделирования СО РАН ведется разработка своего геопортала. Расширяются инструментальные возможности, модернизируются некоторые программные блоки и библиотеки. Геопортал представляет собой распределенное хранилище пространственных данных и метаданных, программные средства для анализа пространственных данных с использованием открытых технологий и стандартов. Для оформления карт и картографических слоев применяется собственный формат описания стилей. Описание стиля содержит информацию о визуальном оформлении объектов слоя в зависимости от настроек видимости, включающее ограничение на масштабы видимости, типы объектов и фильтры по атрибутивным данным и т.п. Доступ к ресурсам геопортала организован с помощью набора различных картографических инструментов и сервисов, предназначенных для быстрой разработки и интеграции геоинформационных систем различного назначения.

Ядром картографических веб-приложений геопортала ИВМ СО РАН является JavaScript библиотека. Библиотека позволяет отображать ресурсы геопортала в различных веб-приложениях. Достаточно только подключить скрипт библиотеки и задать основные параметры. Библиотека предоставляет разработчикам веб-сайтов возможность размещать окно с картой на своих страницах и осуществлять его настройку. Несложные команды позволяют добавить на карту собственные контуры, маркеры, интерактивные подсказки, всплывающие окна и тематические раскраски. Основными преимуществами этой библиотеки является:

- использование всего спектра стандартных инструментов для навигации по карте;
- использование различных картографических проекций;
- поддержка ряда популярных тайловых карт подложек;

- поддержка тайловых подложек, созданных с использованием не стандартных проекций, отличных от цилиндрической прямой равноугольной проекции Меркатора на шаре (EPSG:3857);
- развитые инструменты представления информации по пространственным запросам пользователей.

В 2021 году выполнена модернизация JavaScript библиотеки геопортала для работы с актуальными версиями современных библиотек веб-разработки, что позволит использовать ее в новых проектах с использованием новых возможностей современных браузеров. Новая версия построена с использованием модульной системы ES6. При разработке использовалась Node.js – открытая кроссплатформенная среда выполнения для JavaScript. Переработана визуальная часть картографического интерфейса и переработана легенда. В легенду добавлены инструменты навигации по данным наблюдения, добавлено тематическое оформление дополнительных слоев, настройка прозрачности каждого слоя, вложенность более одного уровня и др.

Картографическая библиотека позволяет просматривать ресурсы геопортала с использованием большого набора различных картографических подложек с поддержкой ряда картографических проекций. Был добавлен новый тип слоев «компози́ты», позволяющий дополнять ресурсы геопортала одной или несколькими специализированными картами поверх основных карт и слоев в выбранном порядке. На данный момент можно добавлять слои публичной кадастровой карты, различные слои с серверов ESRI ArcGIS, слои с данными сенсоров, полученных из системы «Данные оперативного мониторинга» ИВМ СО РАН. Поддерживается формат векторных тайлов – это облегченный формат для хранения геопространственных векторных данных, таких как точки, линии и полигоны с использованием стандарта Protocol Buffers (<https://github.com/protocolbuffers/protobuf>). Этот формат позволит отказаться от некоторых типов подложек, использующих векторные данные, и позволит снизить нагрузку на сервер, а также сократить используемое место на диске и повысит скорость загрузки данных в веб-приложение. Например, можно перенести отрисовку подписей объектов на карте на сторону клиентского веб-приложения.

Для представления и аналитической обработки пространственных данных наземного мониторинга были расширены инструменты для просмотра и анализа данных, имеющих временное измерение. Такие инструменты позволяют просматривать данные в выбранный пользователем момент времени в одном ресурсе геопортала с помощью инструментов навигации по временному отрезку.

На рисунке 20 показан пример обновленного веб-интерфейса с тематическим слоем геопортала на основе базовой картографической подложки с восстановленным полем вет-

ра в городе Красноярск. Поле ветра генерируется в онлайн режиме на основе данных метеостанций из различных источников (краевая и федеральные системы, отдельные метеостанции) и с различным временным разрешением.

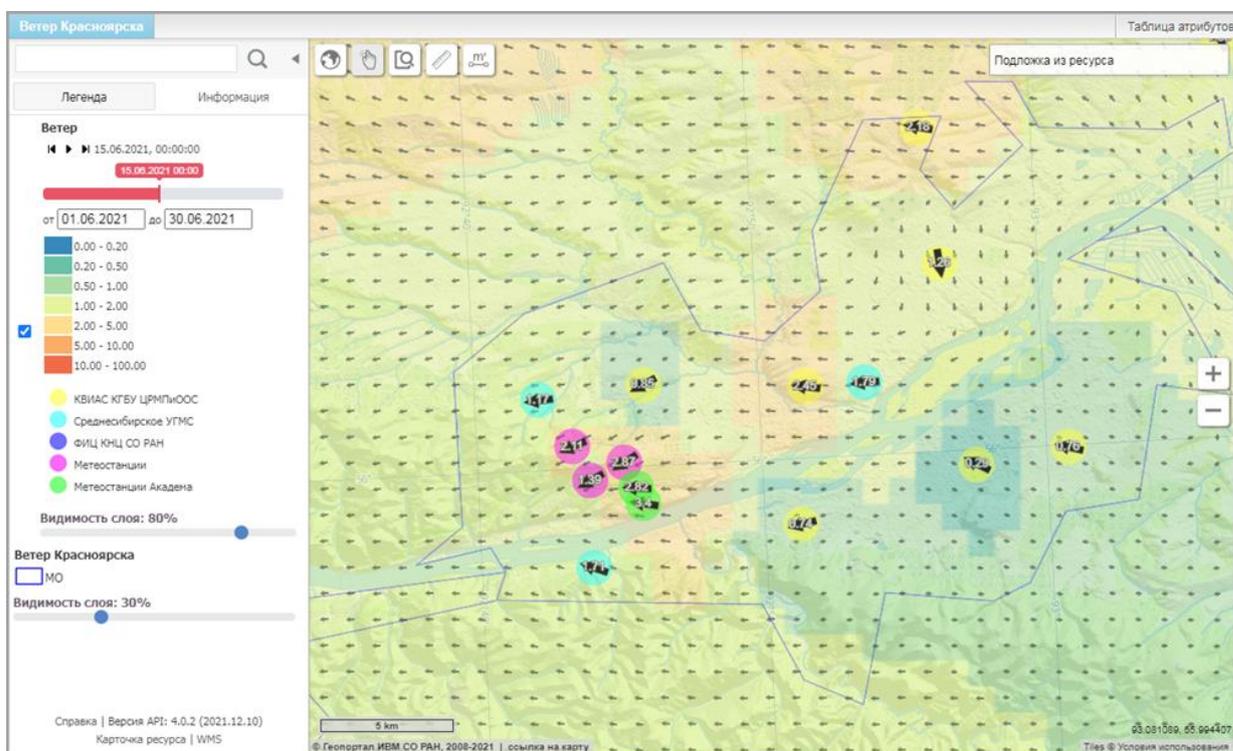


Рисунок 20 – Пример интерфейса веб-приложения на геопортале ИВМ СО РАН.

Еще один пример иллюстрирует прототип слоя с интерактивной картой ветра на выбранный момент времени (рисунок 7). Похожим функционалом обладают такие ресурсы, как Яндекс.Погода (<https://yandex.ru/pogoda/mir/maps/wind>), веб-приложение Ventusky (<https://www.ventusky.com>), проект Windy (<https://www.windy.com/>) и др. Существует небольшое количество готовых JavaScript веб-библиотек, позволяющих строить интерактивную карту ветра, но все они используют в качестве основы данные GFS (Global Forecast System) в различных форматах (растровые данные, бинарные файлы, json-формат). Разработанная библиотека позволяет строить такие карты на основе данных со стационарных постов, что отличает ее от существующих библиотек.

Разработанные программные инструменты позволяют существенно улучшить возможности геопортала ИВМ СО РАН при работе с данными, имеющими временное измерение. У пользователя появляются дополнительные возможности для анализа данных наблюдений, распределенных по времени, дополнительные возможности при работе с набором данных ДДЗ за выбранный период времени.

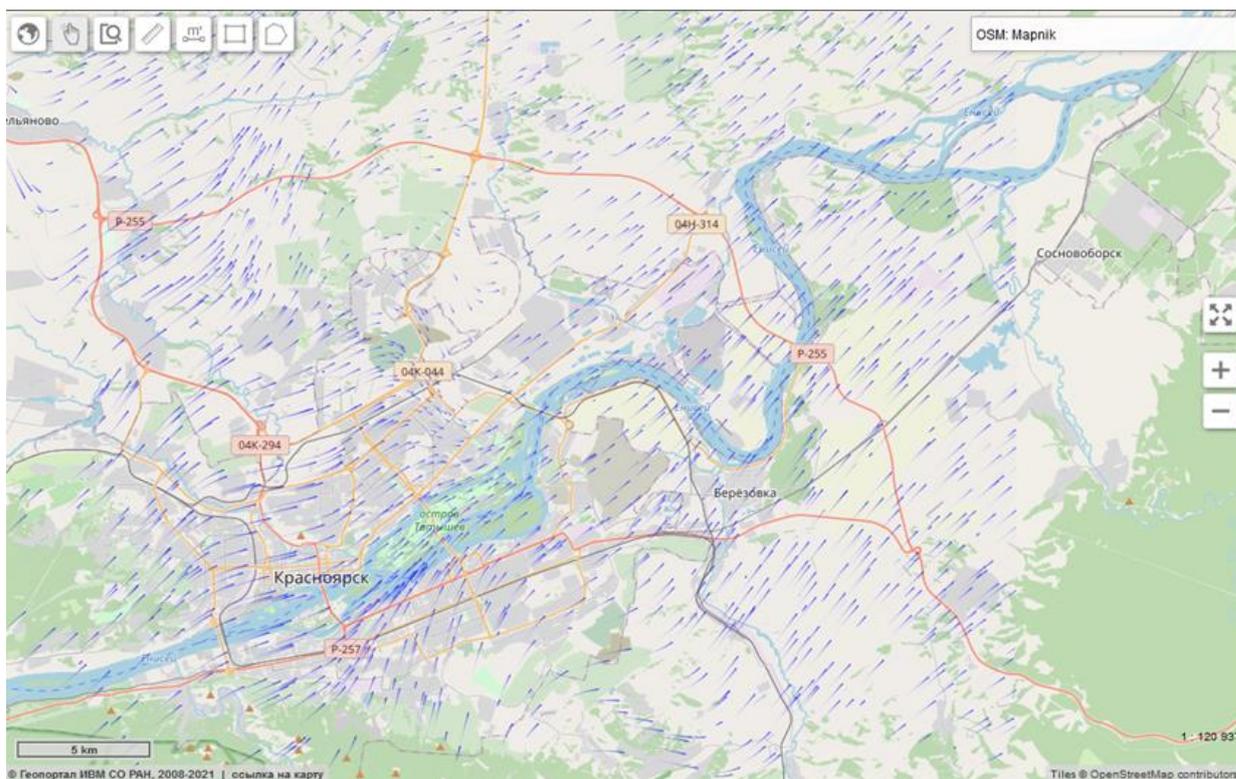


Рисунок 21 – Прототип интерактивной карты ветра на геопортале ИВМ СО РАН.

*Основные публикации по разделу:*

- Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Картографическое веб-приложение для визуализации состояния атмосферы г. Красноярска // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610487 от 12 января 2022 г.

### 2.3. Сервис индексации и поиска данных в слоях геопортала ИВМ СО РАН

Геопортал представляет собой распределенное хранилище пространственных данных и метаданных, программные средства для анализа пространственных данных с использованием открытых технологий и стандартов. Программные инструменты содержат средства для хранения цифровых картографических материалов, растровых снимков территории, сервисы для навигации по распределенному каталогу пространственных данных, сервисы для пространственного анализа и математического моделирования на унифицированных цифровых картах. Важным компонентом является каталог геоинформационных ресурсов. Он используется для формирования единого информационного пространства и содержит метаописания ресурсов, расположенных как локально, так и на сторонних серверах.

Одной из востребованных задач является поиск пространственных объектов внутри слоев по атрибутивным данным. Выявлены следующие особенности поиска для реализованной платформы геопортала:

- пространственные данные могут быть размещены на разных серверах, а также в разных базах данных;
- у слоя может быть несколько атрибутов для поиска;
- атрибуты могут содержать разные типы данных (строка, число, дата, ссылка на элемент справочника);
- в зависимости от задачи, требуется разный тип поиска (на точное значение, поиск по маске, полнотекстовый поиск).

Были рассмотрены существующие технологии и программные компоненты для реализации поиска (Sphinx, Elasticsearch, Apache Lucene, Apache Solr, Xapian), а также встроенные возможности PostgreSQL (типы данных tsvector и tsquery, индексы btree, GIN, GiST). В результате был выбран вариант без установки дополнительных сервисов и компонентов с использованием функций СУБД. Поддерживаются пространственные базы данных с пользовательскими слоями на основе PostgreSQL/PostGIS, при этом каждый слой должен размещаться в отдельной таблице или представлении, а также иметь целочисленный первичный ключ. Для поддержки поиска создается дополнительная схема данных со вспомогательными таблицами и функциями. Индексация и поиск реализован через дополнительную таблицу, в которую помещаются значения атрибутов всех объектов из всех слоев пространственной базы данных. При этом сохраняются ссылки на слой и объект, исходные таблицы слоев не затрагиваются. Значения атрибутов записываются в нескольких видах, подготовленных для точного и полнотекстового поиска с использованием индексов СУБД.

Поиск может выполняться по всем слоям и по всем атрибутам слоев на одном сервере. Активация возможности поиска для слоя выполняется через веб-интерфейс администратора. Для этого необходимо у сервера с пространственными данными, на котором размещен слой, включить поддержку индексирования данных, а также указать атрибуты слоя, по которым планируется выполнять поиск. В зависимости от типа данных у атрибута и значения параметра «qm» в запросе, может выполняться разный тип поиска:

- *{текстовый}* – допускается выполнять полнотекстовый поиск, префиксный поиск, поиск по точному значению.
- *{число, дата}* – разрешен поиск по точному значению.

- *{справочник}* – разрешен точный поиск по идентификатору элемента справочника или полнотекстовый/префиксный поиск в тексте значения из справочника.

Веб-сервис для доступа к геопорталу реализован на основе REST подхода, запросы передаются HTTP методами GET/POST/DELETE с параметрами, результат формируется в формате JSON. Для поиска по атрибутам в пространственных данных был добавлен новый запрос «GET /api/2.0/search/?q=<q>&<params>». Поддерживаются следующие параметры:

- `server` – GUID сервера PostGIS, на котором выполняется поиск.
- `layer` – GUID слоя (или список слоев `guid, guid, ...`), в которых выполняется поиск. Слои должны быть размещены на одном сервере. Обязательно должен быть задан один из параметров, `server` или `layer`.
- `q` – текст для поиска.
- `qm` – режим поиска:
  - `fts` – полнотекстовый поиск (по-умолчанию);
  - `equal` – точное значение атрибута;
  - `prefix` – префиксный поиск по начальным символам слов, можно указывать несколько.
- `attr` – список атрибутов слоев для поиска, задается через запятую `attr1, attr2, ...`. Указываются кодовые названия атрибутов, если параметр не задан – выполняется поиск по всем атрибутам.
- `limit` – ограничение на количество объектов в ответе (по-умолчанию 10).
- `head` – выбор выделения найденного значения в контексте. Задается в виде строки `begin, end`, где:
  - `begin` - строка-выделитель начала
  - `end` - строка-выделитель конца
- `srid` – проекция, в которой будут выдаваться координаты геометрии объектов.
  - `default` – проекция 4326 (по-умолчанию);
  - `layer` – исходная проекция слоя;
  - `none` – не выдавать координаты;
  - `<integer>` – SRID идентификатор проекции.
- `fias` – выдавать код ФИАС, если он известен {0|1}?

После выполнения запроса сервер возвращает список найденных объектов. Каждая запись содержит следующие поля:

- `layerGuid` – GUID слоя.
- `layerName` – название слоя.

- attrCode – атрибут слоя, в котором найдено значение.
- attrName – название атрибута, в котором найдено значение.
- oid – ID объекта в таблице слоя.
- rank – релевантность в виде вещественного числа.
- geom – геоцентр найденного объекта, если в слое задана геометрия.
- head – найденное значение в контексте (если указан параметр head в запросе). В примере ниже был задан параметр head=<b>,</b>, а текст для поиска «снт». Если найдено значение в справочнике – то выдается текст из справочника.
- value – исходное значение атрибута объекта.

Пример ответа:

```
{
  "status": {
    "code": 1,
    "message": "OK"
  },
  "data": {
    "objects": [
      {
        "layerGuid": "17d12690-5f40-c4be-a204-d09eaa892a70",
        "layerName": "Слой №1",
        "attrCode": "address",
        "attrName": "Адрес",
        "oid": 140,
        "head": "<b>СНТ</b> Причал",
        "rank": 0.0607927,
        "geom": "POINT(93.333342142334 56.1613889475065)",
        "fias": "491cde9d-9d76-4591-ab46-ea93c079e686",
        "value": "СНТ Причал"
      },
      {
        "layerGuid": "17d12690-5f40-c4be-a204-d09eaa892a70",
        "layerName": "Слой №1",
        "attrCode": "address",
        "attrName": "Адрес",
        "oid": 142,
        "head": "<b>СНТ</b> Ветеран ост. Магазин",
        "rank": 0.0607927,
        "geom": "POINT(93.3380789234605 56.1674793767944)",
        "fias": "231cde9d-9d76-4591-ab46-ea93c079e681",
        "value": "СНТ Ветеран ост. Магазин",
      }
    ]
  }
}
```

Поддержку сервиса поиска на стороне сервера геопортала выполняет служба индексации. Служба запускается по расписанию, делает выборку серверов и слоев с измененными данными и выполняет переиндексацию, обновляя служебные таблицы.

#### 2.4. Средства автоматизации разработки проблемно-ориентированных веб-ГИС

С развитием веб-технологий рядовые пользователи получили возможность работать с различной информацией, используя программы и веб-приложения как инструменты анализа и просмотра. Основным приложением обычно является веб-браузер, который позволяет без предварительной установки пользоваться информационными системами. Веб-среда служит прекрасной основой для разработки, имея в своей области огромное количество библиотек, которые позволяют создавать пользовательские интерфейсы, компоненты и приложения.

Несмотря на разнообразие, существует немного решений для быстрой разработки геоинформационных веб-систем. Например, ESRI ArcGIS Web AppBuilder позволяет загружать различные ресурсы и взаимодействовать с ними, используя широкую библиотеку инструментов, а также настраивать интерфейс пользователя и изменять атрибутивную информацию слоя, и т.д. Можно также отметить ряд других систем, например, NASA Worldview, TerriaJS Terria. Перечисленные решения позволяют просматривать доступные готовые ресурсы, но вместе с тем имеют существенные ограничения, которые чаще всего не позволяют их использовать в качестве системной основы в своих разработках. В этой связи возникает необходимость в разработке инструментария для развертывания прикладных веб-ГИС. Речь идет о создании набора программных модулей, который должен обеспечить быстрое создание пользовательских интерфейсов прикладных геоинформационных веб-систем, с гибко настраиваемым доступом к сторонним информационным ресурсам и аналитическим сервисам на основе современных сервис-ориентированных технологий, доступных наборов пространственных данных.

В настоящей работе представлены результаты работ по созданию инструментальных программных средств для «быстрой разработки» ГИС-ориентированных приложений в веб-среде с гибко настраиваемым пользовательским интерфейсом, со следующими функциональными возможностями: создание и редактирование проектов, загрузка и редактирование различных ресурсов, подключение настраиваемых компонент для взаимодействия с данными различного типа.

Одна из основных решаемых задач данной разработки – оперативное создание проблемно-ориентированных веб-интерфейсов, информационных веб-ГИС на основе данных геопортала ИВМ СО РАН и прочих доступных через веб-сервисы геоданных. При этом предполагается, что для создания тематических веб-приложений совсем не потребуется программирования или оно будет минимальным.

В состав разработанных инструментальных программных средств входит несколько функциональных модулей, которые разделяются на более мелкие части. Первый модуль –

«Личный кабинет». Он отвечает за вход пользователя и редактирование данных о пользователе. Второй блок – «Менеджер проектов». «Менеджер проектов» позволяет пользователю просматривать существующие проекты, создавать новые, редактировать информацию о проектах. Третий модуль – «Рабочая область». «Рабочая область» позволяет отобразить различные картографические данные, например – доступные ресурсы с геопортала ИВМ СО РАН, изменить стилистику их отображения, задать классы со стилистикой и условиями отображения, добавить инструменты для управления данными и т.д.

Работа системы осуществляется с использованием Node, Vue и базы данных MongoDB. Node представляет собой программную платформу на движке V8, которая позволяет использовать язык программирования JavaScript, как язык общего назначения. Это означает, что JavaScript можно использовать не только для построения веб-страниц и взаимодействия с ними, но и для реализации сервера. Веб-приложение само по себе не может обратиться к базе данных и обработать различные обращения от пользователя. Для этого используется сервер, к которому от веб-приложения передаются различные запросы и действия пользователя. На рисунке 22 показано взаимодействие трех компонентов.

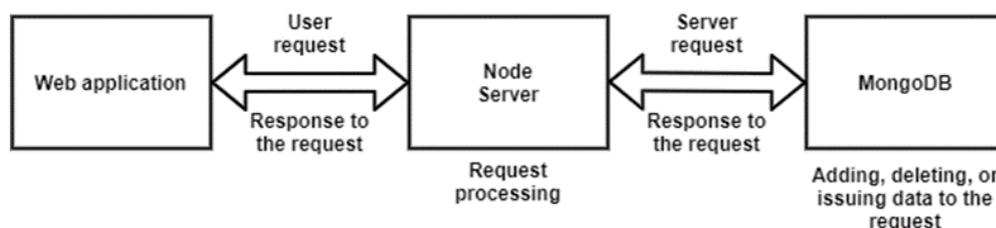


Рисунок 22 – Схема работы с сервером и базой данных для хранения проектов.

Веб-приложение передает серверу запросы от пользователя (Загрузить проект, сохранить проект, получить метаданные проекта, получить данные пользователя и т.д.), затем сервер обрабатывает запросы и формирует запрос к базе данных. Ответ возвращается по цепочке к пользователю. Запросы от пользователя формируются по архитектурному стилю взаимодействия компонентов REST, использующего запросы HTTP.

Сервер способен обработать следующие запросы:

- Запрос на регистрацию. В разработанном наборе программных средств используется общая система авторизации с геопорталом ИВМ СО РАН.
- Запрос на вход. Если вход успешен, и Вы раньше входили в систему, то Вас сразу перенаправит на страницу со всеми проектами.
- Запрос на проекты. Результатом запроса является список проектов из базы данных.
- Запрос на сохранение. В результате этого запроса осуществляется сохранение проекта из «Рабочей области» или из «Менеджера проектов».

Построение пользовательского интерфейса осуществляется на JavaScript-фреймворке Vue.js. Внутри этого фреймворка вся работа и общение между компонентами осуществляется на основе шаблон проектирования архитектуры приложения MVVM (Model–View–ViewModel).

Реализованная текущая версия разработки позволяет выполнять различные запросы на получение данных, доступных на геопортале ИВМ СО РАН. Во-первых, это картографические данные – карты и отдельные слои пространственных данных. Во-вторых, это информация из подсистемы геопортала «Данные оперативного мониторинга», например – данные с постов экологического мониторинга: скорость и направление ветра, температура, влажность, давление, концентрации PM2.5, и проч. Фрагменты интерфейсов системы показаны на рисунке 23.

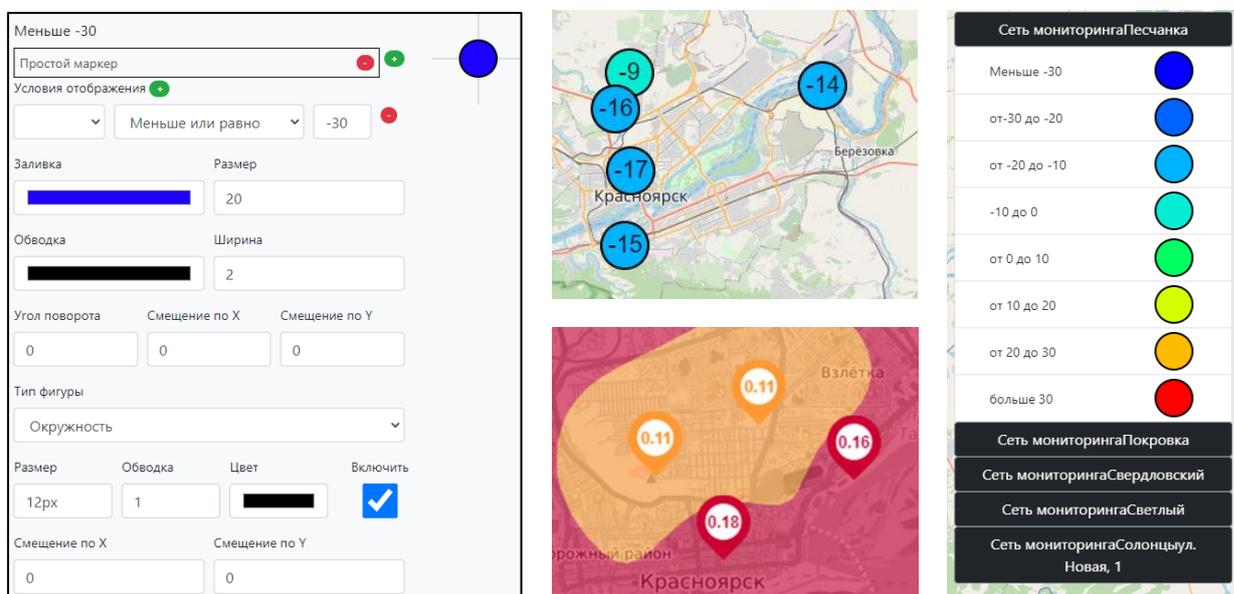


Рисунок 23 – Элементы интерфейса пользователя комплекса программных средств.

На основе созданного набора инструментов разработан прототип системы представления данных экологического мониторинга в г. Красноярске. Модульная система его организации обеспечивает гибкость настройки различных параметров, модернизации и развития системы (Рис. 24).

В разработке был использован ряд библиотек на языке JavaScript, в том числе – dline.js, rollup.js, openlayers.js, nvd3.js и bootsrapt.js – библиотека dline.js, строит изолинии или полигоны, отображающие относительный градиент параметра, библиотека rollup.js позволяет собирать модули воедино, библиотека openlayers.js предназначена для создания веб-карт. Работа над этим приложением будет продолжена.

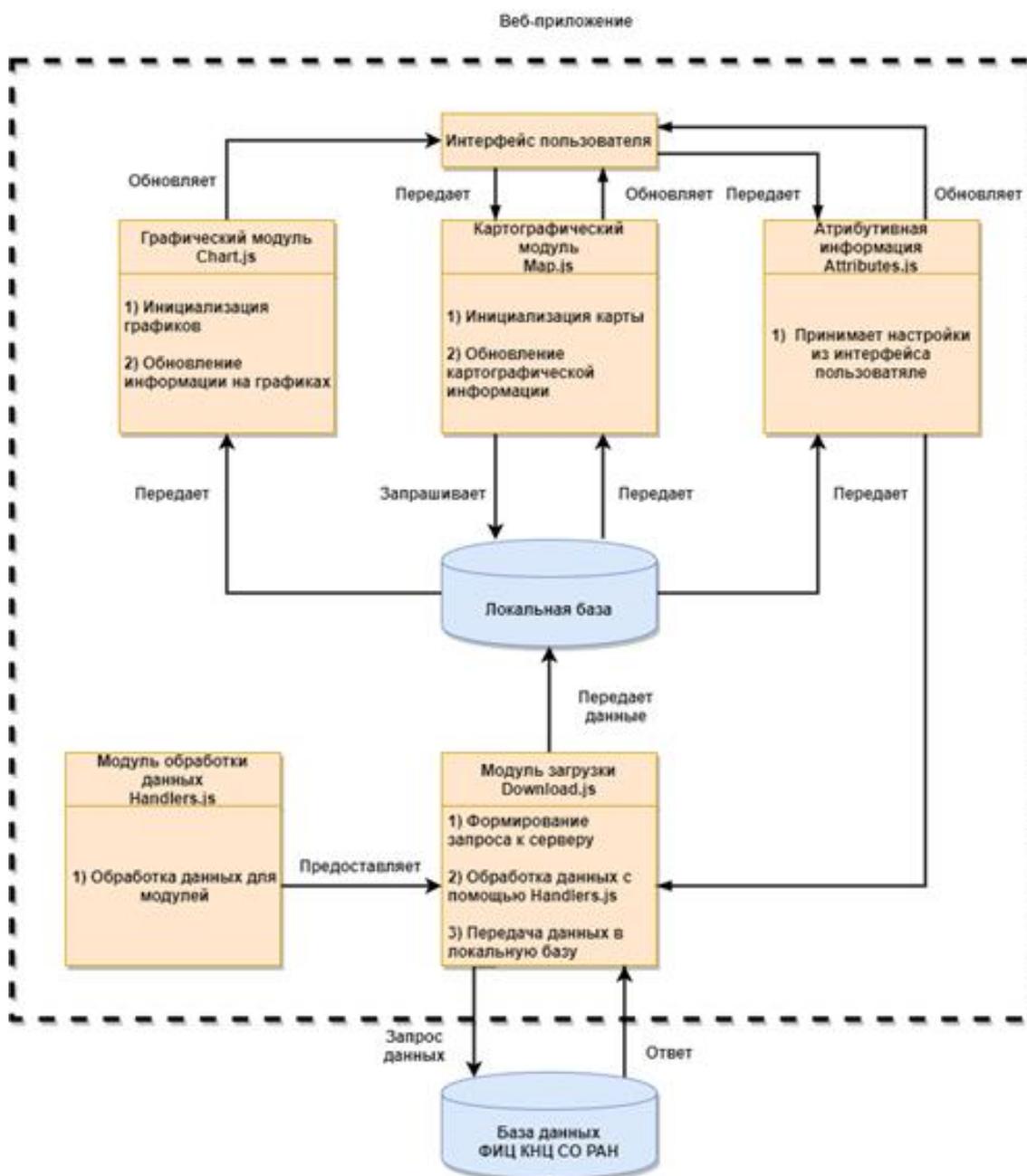


Рисунок 24 – Модульная система веб-приложения для представления оперативных данных экологического мониторинга Красноярска.

*Основные публикации по разделу:*

- Pushkarev A., Malimonov M., Yakubailik O. Development of JavaScript library for visualization of operational environmental monitoring data // AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2402, 050052. DOI: 10.1063/5.0074012
- Malimonov M.I., Yakubailik O.E. Cloud-based software tools for the rapid development of web GIS // CEUR Workshop Proceedings, v. 3006, 2021. pp. 172-179. DOI: 10.25743/SDM.2021.92.65.022

## 2.5. Веб-приложение для визуализации, анализа и обработки пространственно-временных данных аграрного мониторинга

Построение программных решений для визуализации, обработки и анализа пространственно-временных данных постепенно меняет свой вектор развития от десктопных программ в сторону веб-технологий и облачных вычислений. Развитие вычислительных мощностей персональных компьютеров и увеличение пропускной способности глобальной сети Интернет позволяют выполнять сложные операции прямо на клиентской части веб-приложений. В данной работе рассматривались методы и технологии для визуализации и анализа разнородных пространственно-временных данных для задач аграрного мониторинга с применением JavaScript библиотек React и OpenLayers.

Задачей исследований были проектирование и разработка прототипа информационно-аналитической системы дистанционного агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения на основе геопортальных технологий.

Основными источниками данных для этой системы являются ресурсы геопортала ИВМ СО РАН, каталог многоканальных растровых изображений, сформированный по спутниковым данным MODIS, избранные данные из архивов данных реанализа NASA GFS, GPM, и т.д. – по температуре, осадкам, и проч.

Архитектурно система представляет из себя веб приложение и различные источники данных, предоставляющие пространственную информацию по специализированным программным интерфейсам – API (рис. 25).

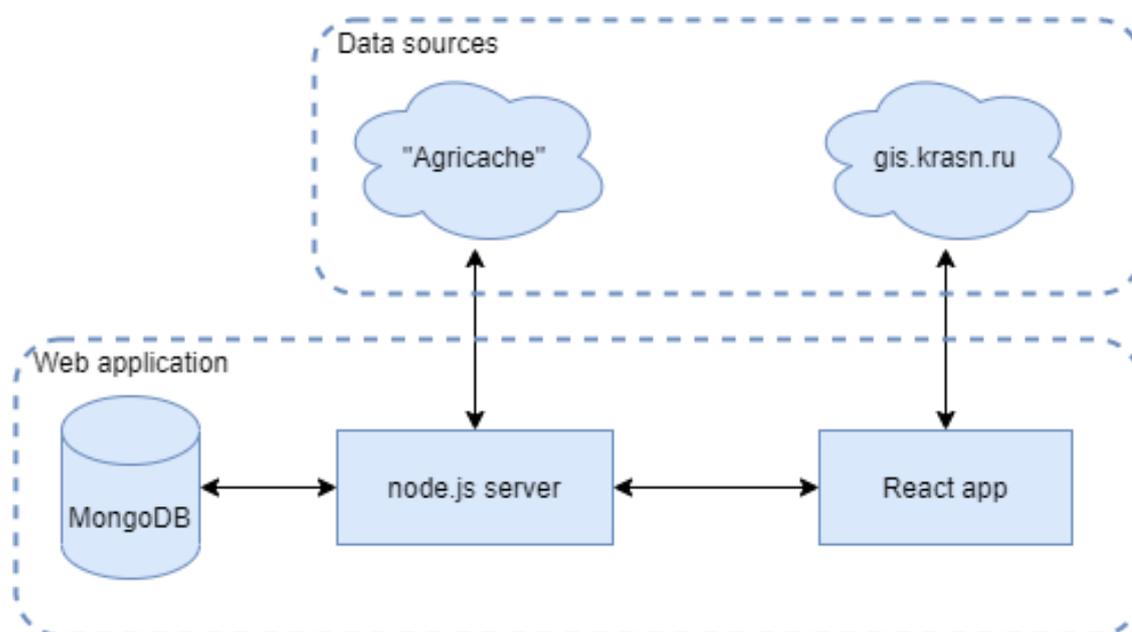


Рисунок 25 – Общая схема проектируемой системы.

Серверная часть веб-приложения написана на node.js с использованием фреймворка express, а клиентская часть реализована при помощи библиотеки React с использованием технологии Redux для хранения состояния приложения. В качестве базы данных для хранения разделов и проектов, которые можно создавать и просматривать в приложении используется NoSQL база данных MongoDB.

### *Серверная часть веб-приложения*

Сервер написан на Node.js, что позволяет использовать один язык программирования во время всей разработки веб-приложения – это значительно ускоряет и облегчает разработку, т.к. в данном приложении не требуется построение сложной архитектуры хранения и доступа к данным, систем сложной математической обработки данных, и других задач, которые требовали использование более сложных технологий построения серверной части, как например ASP.NET или Java, которые используются для построения крупных и сложных серверных архитектур с большим количеством сложных взаимодействий между множеством баз данных и других серверов, или же Python, который хорошо подходит для обработки данных и машинного обучения.

Основной функцией сервера веб-приложения является обработка запросов с клиента, т.к. основная бизнес-логика сосредоточена именно на клиентской части, что позволяет сохранить серверные вычислительные ресурсы и не использовать дорогостоящее серверное оборудование для данной системы.

Сервер содержит в себе схемы структур данных, хранимых в базе данных MongoDB, а именно схему разделов, содержащую название и описание разделов, и схему проектов, в которой помимо названия и описания содержится начальное состояние карты (уровень зума, центр координат), а также ограничивающая область для слоёв, изначальное состояние временной шкалы и список ресурсов проекта, который сам по себе является отдельной схемой. В схеме отдельного ресурса хранится его название, уникальный идентификатор, использующийся для формирования WMS-запроса к геопорталу ИВМ СО РАН (в случае если это ресурс геопортала), а также исходные параметры самого слоя, такие как видимость, прозрачность и позиция относительно других слоев. Данные схемы необходимы для хранения разделов и проектов в базе данных MongoDB, доступ к которой реализован при помощи библиотеки Mongoose, которая предоставляет удобное API для взаимодействия с MongoDB из Node.js.

Одним из важнейших модулей сервера является маршрутизатор. Маршрутизатор обрабатывает HTTP-запросы с клиента и осуществляет взаимодействие с базой данных, на основе этих запросов. Запросы бывают 4 типов: GET, POST, PUT, DELETE, каждый из ко-

торых используется для определенной процедуры (на рисунке 26 схематично изображено взаимодействие модулей сервера между собой).

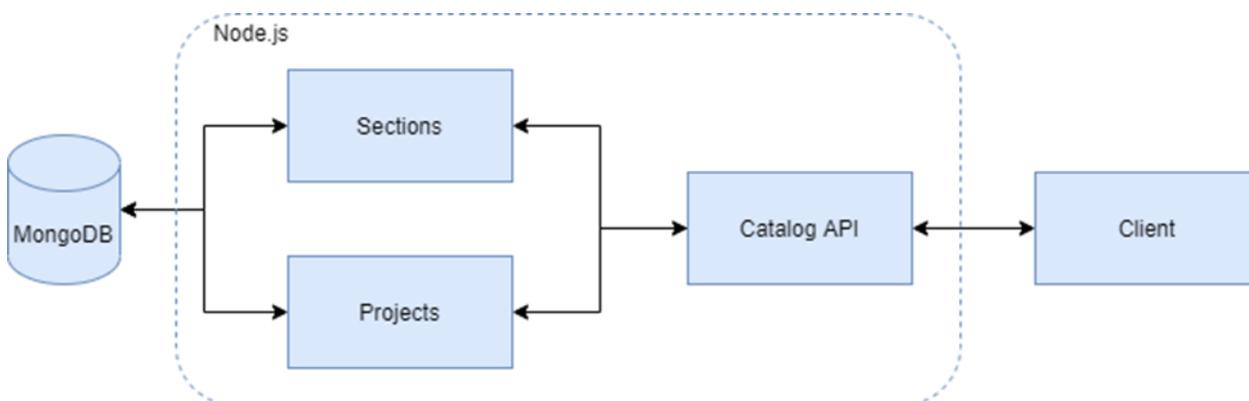


Рисунок 26 – Схема серверной части веб-приложения.

Обработчик каждого запроса сопровождается валидацией входящих в запросе данных, а также проверкой прав доступа пользователя, эти процедуры необходимы для того, чтобы защитить базу данных от попадания в нее нежелательной информации, и ограничить доступ к ней, от пользователей с недостаточным количеством прав.

#### *Клиентская часть веб-приложения*

Клиентская часть веб-приложения является лицом всей системы, именно с ней взаимодействуют пользователи системы. С развитием производительности персональных компьютеров и появлением новых стандартов сети интернет, акцент в разработке небольших и средних проектов стремительно смещается в сторону одностраничных веб-приложений (SPA), такие приложения зачастую выполняют большое количество функций, которые ранее было принято выполнять на сервере, например, различные математические расчеты, рендеринг веб-страниц и т.д.

В данном проекте для быстрой и качественной разработки используется библиотека React, эта библиотека разрабатывается компанией Facebook и является самым популярным решением для построения одностраничных клиентских веб-приложений. В силу своей гибкости (React является библиотекой и не диктует жестких правил разработки, как например такие фреймворки как Angular и Vue) React позволяет быстро разрабатывать небольшие и средние по масштабам проекты, которые в дальнейшем будет достаточно поддерживать и расширять.

Клиентское приложение включает несколько страниц с реактивным переключением (без перезагрузки страницы), в данной статье подробно будут рассмотрены страницы каталога и редактора карт (упрощенная схема React приложения изображена на рисунке 27).

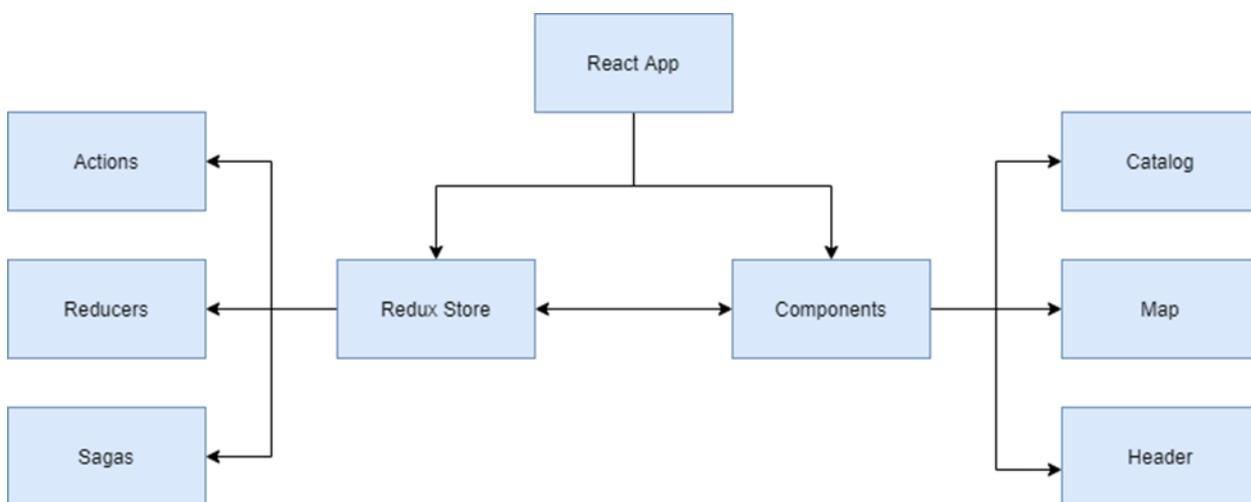


Рисунок 27 – Схема клиентской части веб-приложения.

На странице каталога представлены карточки разделов, в которых содержатся названия и описания этих разделов. Пользователи с достаточным количеством прав могут создавать и изменять разделы, при помощи специальных диалоговых окон. При переходе в отдельный раздел, отображаются карточки проектов, которые так же содержат название и описание. Пользователи с достаточным количеством прав могут создавать новые проекты, а обычные пользователи и гости могут только просматривать существующие проекты, без возможности изменения.

На странице проекта располагается карта с различными инструментами для обработки слоев и боковая панель, на которой расположены слои карты и инструменты для включения/отключения этих слоев, изменения видимости, а также выстраивания порядка отображения всех слоев.

При редактировании или создании проекта доступно добавление новых слоев на карту. При нажатии на соответствующую кнопку открывается всплывающее окно, в котором необходимо выбрать источник данных (на данный момент доступны только данные геопортала ИВМ СО РАН). При переходе на источник данных геопортала ИВМ СО РАН отображается дерево каталогов геопортала, доступное текущему пользователю, при выборе определённого ресурса из каталога, можно посмотреть его мета информацию и изменить название слоя в системе. После добавления слоя он отображается в боковом меню,

где можно проводить различные манипуляции для изменения параметров его визуализации.

Все слои, находящиеся на карте, хранятся как в состоянии приложения, за которое отвечает библиотека Redux. Данная библиотека позволяет удобно манипулировать с локальными данными приложения из любого React Компонента, что значительно упрощает разработку и повышает читаемость кода и дальнейшее масштабирование.

В системе доступен просмотр данных, которые изменяются со временем (при условии, что такие данные имеются). Перемещая бегунок на временной шкале, данные, имеющие временную привязку, будут автоматически изменяться в зависимости от выбранного интервала времени.

Также стоит отметить сохранение всех слоев и параметров карты в строке HTTP-запроса в query параметрах, что позволяет сохранять текущее состояние проекта при перезагрузке страницы, данная возможность позволяет сохранить состояние проекта в случае закрытия браузера или случайного перехода на другую страницу, а также позволяет обмениваться пользовательскими настройками проекта, отправляя всего лишь ссылку на проект.

Разработанный на данный момент функционал веб приложения позволяет создавать картографические проекты, основанные на данных геопортала ИВМ СО РАН, с возможностью интерактивного взаимодействия со слоями карты (включение/выключение слоя, изменение прозрачности, порядка слоев и др.). Также реализована система каталогизации проектов по разделам, с возможностью создания, удаления и изменения разделов и проектов. В дальнейшем планируется добавить поддержку других источников данных для системы, для создания более подробных и комплексных картографических проектов.

На рисунке 28 изображен интерфейс страницы создания/просмотра проекта, на который добавлено 3 слоя и выставлены определённые параметры отображения каждого слоя отдельно. Также выбрана область отображения, которая ограничивает отображение всех слоёв прямоугольной областью.

На данном этапе система не обладает возможностью совершения сложных операций над слоями карты, однако в дальнейшем после того, как в систему будут добавлены другие источники данных, которые будут предоставлять векторную информацию, в системе появятся инструменты, позволяющие рассчитывать различные интерполяции по точечным данным, производить математические расчёты над grid-данными, а также совершать статистические операции над данными и визуализировать результаты на графиках.

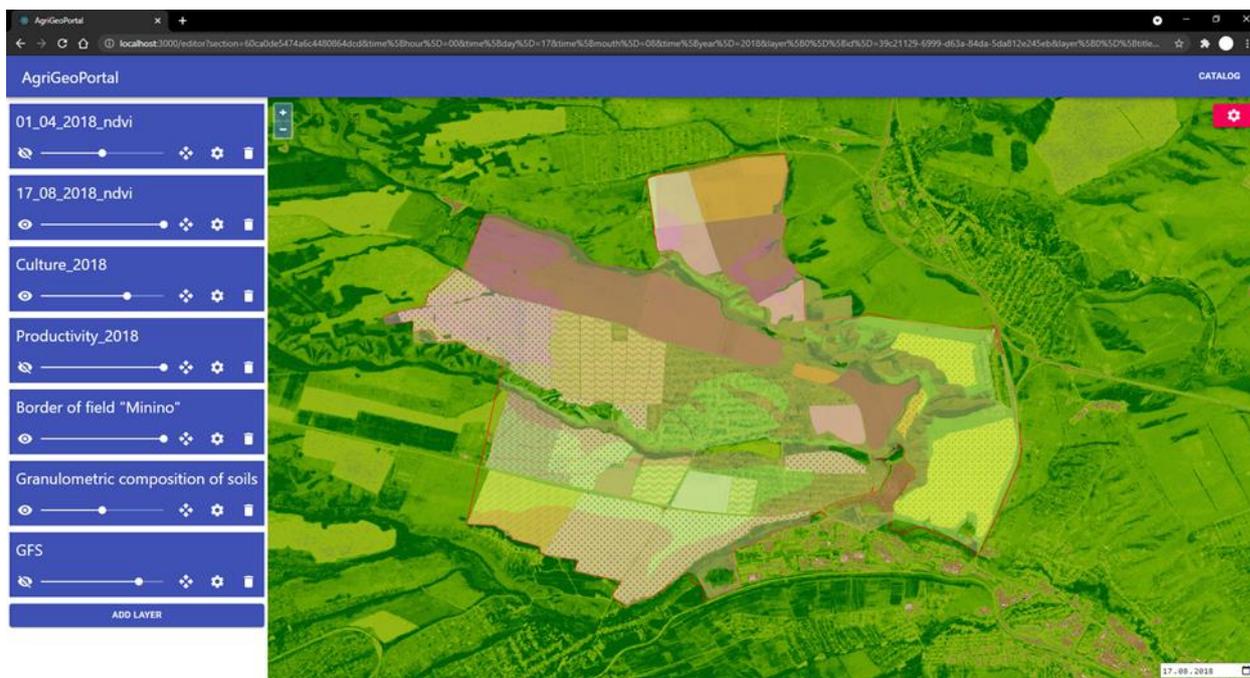


Рисунок 28 – Интерфейс прототипа веб-приложения для агромониторинга.

*Основные публикации по разделу:*

- Pushkarev A.A., Yakubailik O.E. A web application for visualization, analysis, and processing of agricultural monitoring spatial-temporal data // CEUR Workshop Proceedings, v. 3006, 2021. pp. 231-237. DOI: 10.25743/SDM.2021.20.11.028
- Pushkarev A., Malimonov M., Yakubailik O. Development of JavaScript library for visualization of operational environmental monitoring data // AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2402, 050052. DOI: 10.1063/5.0074012

### 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 реше-

ния 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<sub>d</sub>* – данные об опасностях, включающие результаты мониторинга, прогнозы, модели ситуаций; *I<sub>v</sub>* – сведения об уязвимостях реципиентов риска (территорий, объектов, инфраструктуры, населения); *I<sub>s</sub>* – информация о защищённости (характеристики сил и средств); *EE* – экспертные оценки, учитывающие особенности *I<sub>x</sub>*. 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 информационного 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. p. 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 5.

Таблица 5 – 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 цифро-

вым 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 29).

Хранилище режиме 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, аварий-

ным ситуациям и проч. доступны в озёрах данных МЧС России. Данная технология позволяет использовать распределённые данные ограниченного доступа без владения ими.

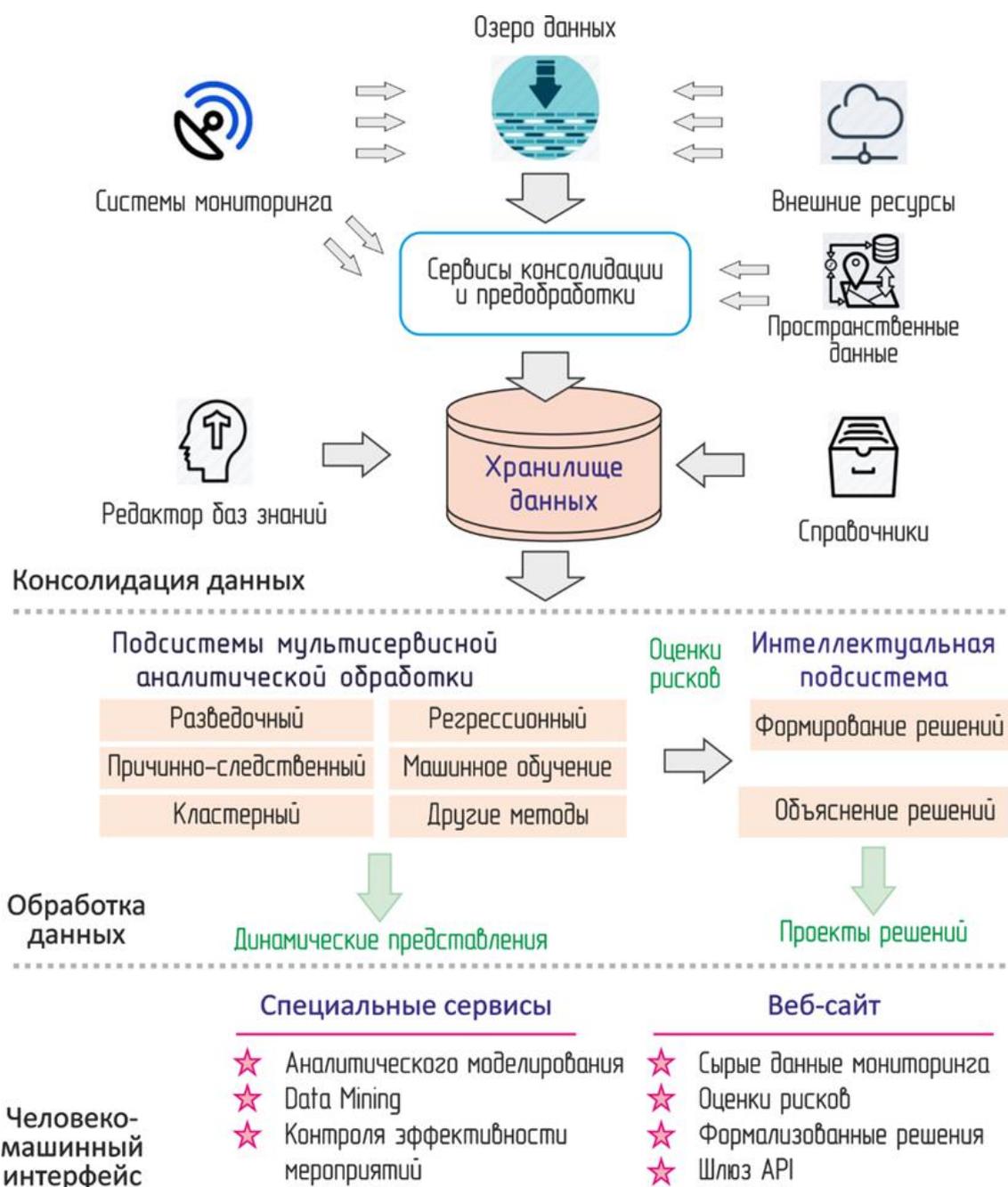


Рисунок 29 – Схема архитектуры сервисов и ресурсов цифрового паспорта безопасности территории.

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 ве-

личины базовых территориальных рисков. Кластерный анализ позволяет группировать территории по многомерным 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 определить 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 разные 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 30 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.

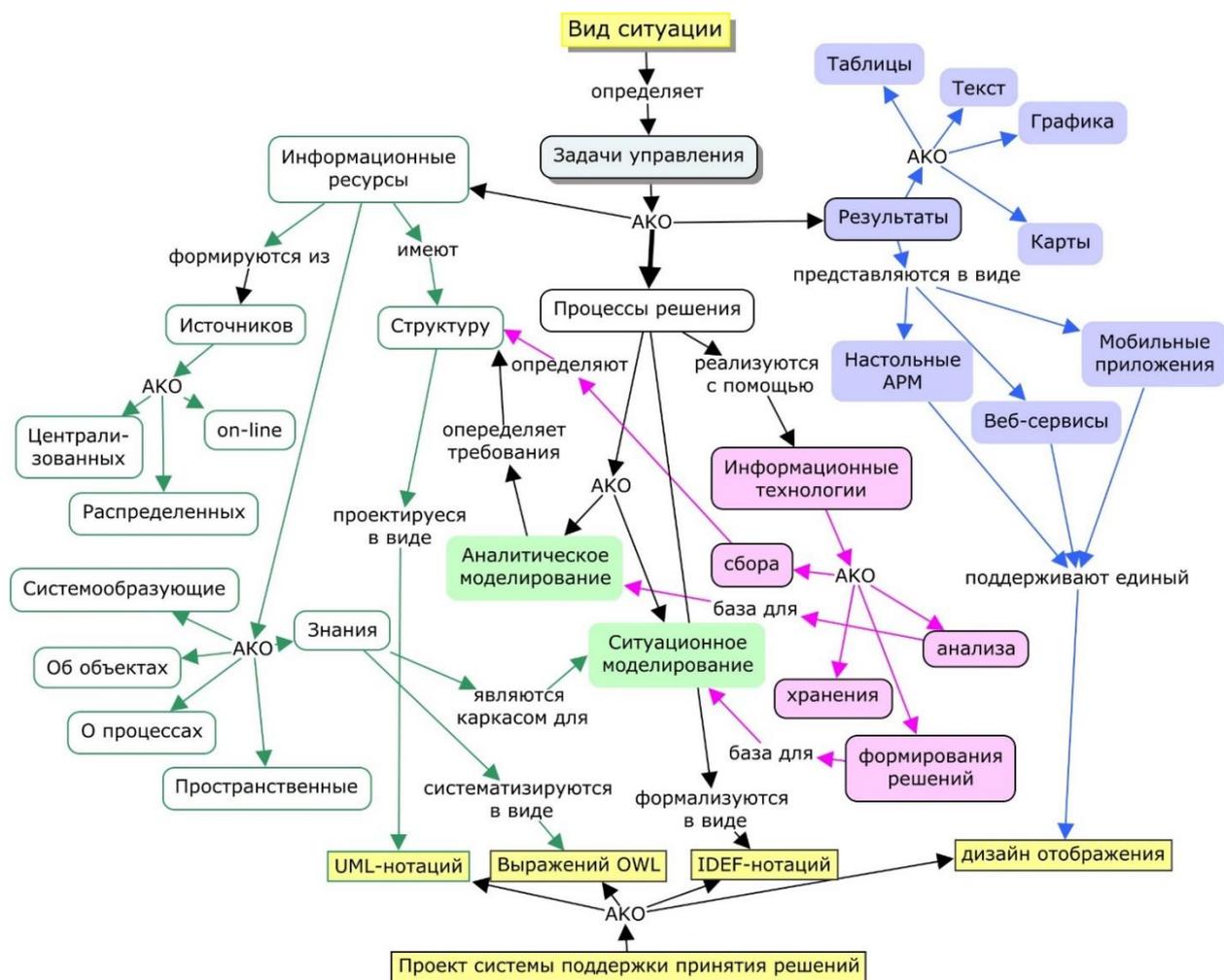


Рисунок 30. Онтология модульной разработки системы поддержки принятия решений.

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 показаны 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 SMarTools. 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. Разработка и тестирование алгоритмов анализа и построения тепловых пространственно-временных карт по данным моделирования 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.

Речь идет о процессах, наблюдаемых или воспроизводимых с помощью имитационного подхода, реализуемого методами численного моделирования. 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. Моделирование пешеходного движения используется в решении задач пожарной безопасности, организации массовых мероприятий на открытом воздухе, проектировании/изучении объектов массового пребывания [1, 2], включая задачи оценки вероятности распространения вирусных инфекций [3]. Организация масштабных мероприятий требует усиленных мер и новых концепций безопасности, адаптированных к большому количеству людей. Спортивная арена и прилегающая территория должны быть устроены так, чтобы обеспечивать комфортное пребывание зрителей, не допускать возможности образования плотных скоплений людей, а в чрезвычайной ситуации обеспечивать безопасную эвакуацию с объекта. Решить эти задачи можно с помощью имитационного (агентного) моделирования движения людей. Имитационные модели могут наглядно демонстрировать движение людей на стадионе и на прилегающей территории, 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 создаться опасная ситуация, каковы предпосылки ее развития, давать оценку (качественную и количественную) 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 полю 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)  $\Omega$ . 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;

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

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

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

$\Omega^{ij}$  – 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



Приведем примеры применения тепловых карт для анализа объемно-планировочного решения, влияние которого на процесс движения людей не может быть идентифицировано и оценено без анализа характеристик протекающих процессов.

В данном случае идет речь об особенностях планировки здания, которые могут создавать затруднения для движения людей за счет формирующихся потоков, препятствующих движению друг друга.

В силу естественного рельефа местности и других ограничений стадион имеет такое планировочное решение, что неизбежно круговое движение по внешнему стилобату. Условно схема движения с трибун представлена на рисунке 33а. При круговом движении «включается» стратегия кратчайшего пути, которая реализуется в тяготении траектории движения к центру поворота. И тем самым, люди, идущие по внешнему стилобату, препятствуют выходу находящимся в здании, что приводит к существенным скоплениям у выходов на внешний стилобат.

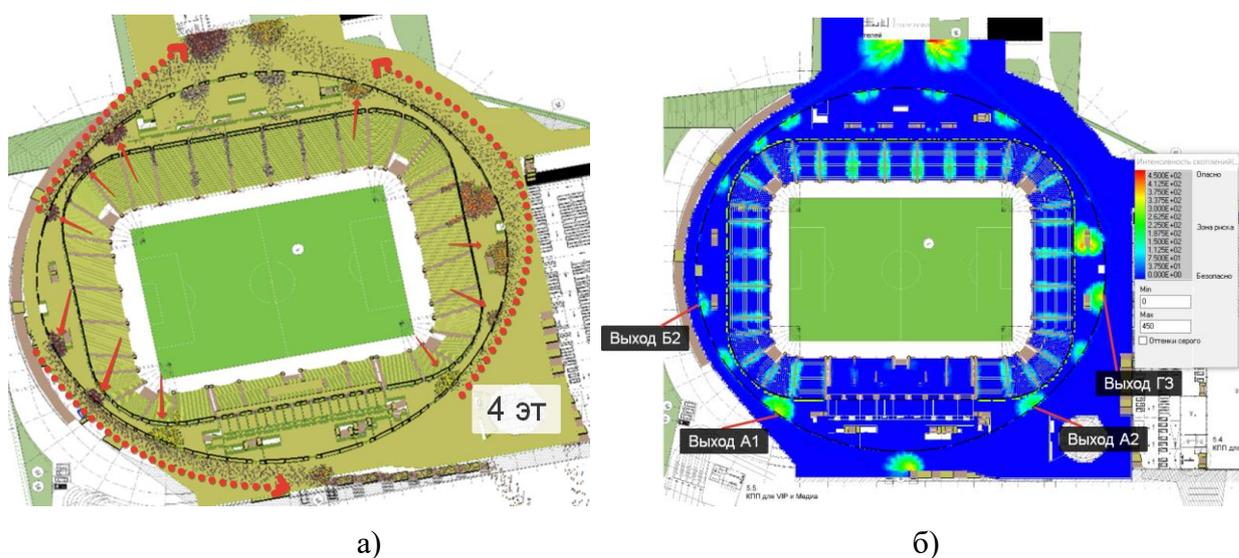


Рисунок 33 – а) Положения людей через 200 секунд от начала единовременной разгрузки стадиона, образовавшиеся скопления на выходах из здания стадиона; б) поле интенсивности скоплений  $I_c$  (530) на 4-м этаже к 530 секунде

Идентифицировать последствия/влияние такого объемно-планировочного решения на процесс эвакуации можно за счет построения тепловых карт по данным моделирования. На рисунке 33б представлено поле интенсивности скоплений  $I_c$  (530), по которому видно, что наиболее продолжительные скопления имеют место на выходах А1 и Г3 – причиной этого является описанное круговое движение. Так, выходы А1 и А2 симметрично расположены и имеют одинаковую нагрузку (1130 человек), но выход А2 освобождается за 290 секунд, А1 – за 410 секунд – что превышает допустимую продолжительность скоп-

лений с критической плотностью (Рис. 34а). Симметричные выходы Б2 и Г3 с нагрузкой примерно 900 человек на каждый освобождаются за 270 секунд (Б2) и 420 секунд (Г3). Результаты анализа легли в основу оргмероприятий, направленных на снижение напряженности на выходе Г3: например, выставление рассечек (барьеров). На рисунке 34б представлен вариант установки барьеров для разделения потоков. Эта мера также улучшит ситуацию на выходе Г4. В то же время аналогичные меры нельзя применять для северного стилобата, поскольку его ширина не превышает 5 м. В этом случае решением может быть только поэтапная выгрузка трибун северной и северо-западной частей чаши. Поэтапная выгрузка также решит вопрос скопления в створе западной лестницы, которое образуется в силу меньшей пропускной способности лестницы по сравнению с интенсивностью подходящего потока. Ширина лестницы не превышает 3,5 метров.

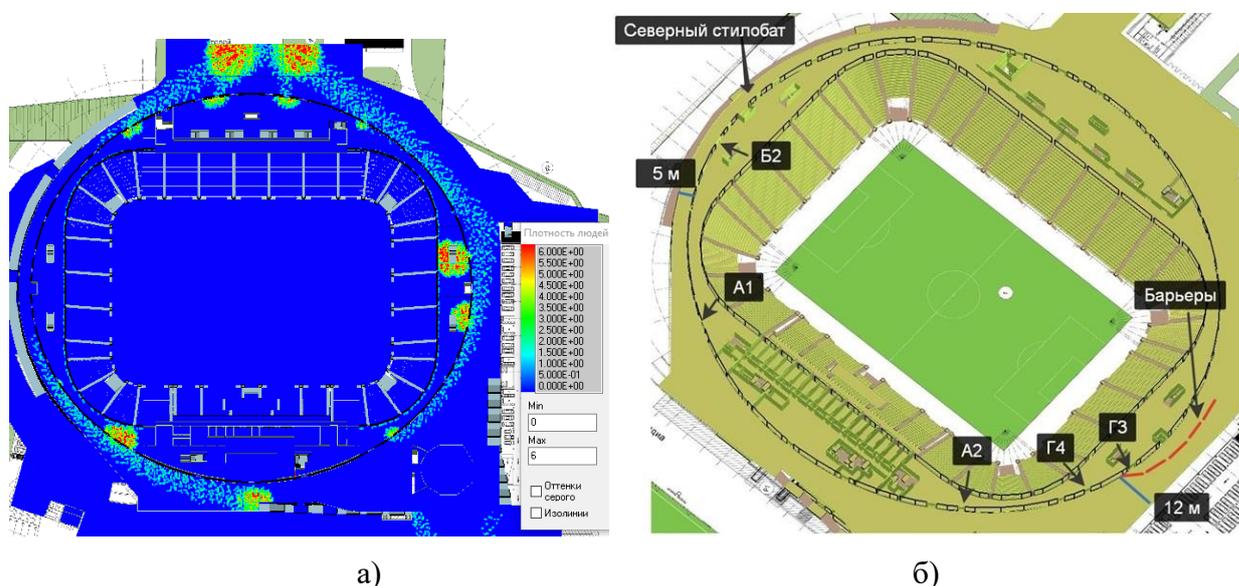


Рисунок 34 – а) Поле плотности скопления на момент 270 секунд; б) расположение барьеров на южном стилобате, ширина внешних южного (12 м) и северного (5 м) стилобатов, обозначение выходов на внешний стилобат

Приведенный пример анализа людских потоков на стадионе позволил вскрыть еще одну проблему, связанную с размещением гостевых болельщиков на трибунах и организации их выхода со стадиона. Футбольные игры клубного уровня предполагают выделение специальной зоны на трибунах для болельщиков домашней и гостевой команд (так называемых фан-зон). Под фан-зоны команд выделяются трибуны, максимально удаленные друг от друга, с непересекающимися маршрутами. На рисунке 33б рядом с выходом Г3 видно скопление, которое вызвано неправильной организацией геометрии пути гостевых болельщиков. Для болельщиков гостевой команды (примерно 1600 человек), преду-

смотрен отдельный маршрут внутри стадиона – через зрительское фойе на 3-м этаже, куда они попадают, спускаясь по внутренней лестнице с 4-го этажа (рис. 35). Особенности данного пути следующие: направление движения по маршруту не сонаправлено с выходом с 3-го этажа (требуется поворот на 180 градусов), сумма ширин проходов трибун (источников) больше ширины маршрута лестницы (4,8 м против 3 м соответственно). Наличие поворота на 180 градусов влечёт замедление потока в районе поворота на 3-м этаже. Это приводит к максимальной плотности на лестнице и, как следствие, снижению скорости, продолжительному скоплению на 4-м этаже с максимальной плотностью, (рис. 34а).

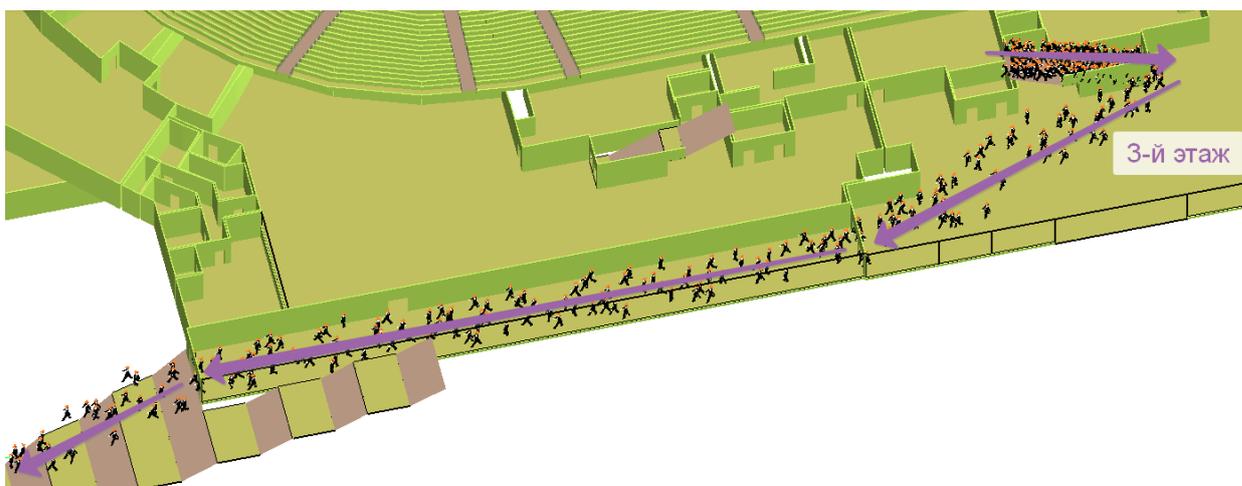


Рисунок 35 – Маршрут болельщиков гостевой команды по лестнице с 4-го на 3-й этаж, по 3-му этажу до выхода из здания стадиона

*Основные публикации по разделу:*

- 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
- 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
- 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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Проведены исследования и разработки методического и вычислительного обеспечения для задач оценки состояния экосистем на основе бассейнового подхода с использованием методов и технологий геоинформационного моделирования. Разработана детальная многоуровневая иерархическая система водосборного деления территории Красноярского края. Разработаны необходимые методы и технологии по созданию, хранению и обработки данных о каждом водоразделе.

Выполнен анализ подходов и методов анализа построения различных интегрированных показателей, характеризующих состояние экосистем, в том числе природно-климатические, географические и антропогенные характеристики территорий, данные о различных биотопах (территориальных единицах) и природных объектах.

Исследованы основные характеристики и особенности формирования туманов над Енисеем в нижнем бьефе Красноярской ГЭС. Показано, что в пределах Красноярска чаще всего наблюдаются адвективные туманы охлаждения (в летние месяцы) и адвективные туманы испарения (зимой, ранней весной и поздней осенью).

Проведен анализ влияния температурных инверсий в приземном слое атмосферы на загрязнение атмосферы Красноярска по метеоданным модели реанализа NCEP Global Forecast System и данным наземного экологического мониторинга. Показана прямая взаимосвязь между ними – неблагоприятные метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в атмосфере, как правило обусловлены возникающими над городом температурными инверсиями. Также исследовано влияние скорости ветра и высоты пограничного слоя атмосферы на ситуацию.

Выполнены оценки среднегодового уровня загрязнения приземного слоя атмосферы Красноярска и пригорода взвешенными частицами. Показано, что уровень загрязнения города находится в пределах нормативов по российским стандартам, но превышает рекомендуемые нормы Всемирной организации здравоохранения.

Проведены мониторинговые исследования биологических ресурсов в водоемах и водотоках на территории Красноярского края. Выполнена оценка экологического статуса водных объектов методами биоиндикации по структуре донных сообществ; наиболее значимые результаты достигнуты на реках бассейна Енисея и р. Чулым.

В отчетном году значительно расширена система сбора оперативной информации о состоянии атмосферного воздуха в Красноярске – добавлено много новых источников исходной информации, модернизирована и оптимизирована структура хранения данных.

Выполнены работы по развитию комплекса программных средств геопортала ИВМ СО РАН. В частности, переработана визуальная часть картографического интерфейса и переработана легенда. В легенду добавлены инструменты навигации по данным наблюдения, добавлено тематическое оформление дополнительных слоев, настройка прозрачности каждого слоя, вложенность более одного уровня, и др.

Созданы новые программные инструменты для каталога пространственных данных геопортала ИВМ СО РАН – сервисы визуализации данных, индексации и поиска пространственных объектов внутри слоев по атрибутивным данным. Поисковый сервис, реализованный на основе REST подхода, позволяет значительно сократить время поиска.

Разработаны программные компоненты визуализации, обработки и анализа пространственно-временных данных для задач аграрной тематики. Они обеспечивают средства представления информационных продуктов на основе оперативного архива спутниковых снимков, например – вегетационного индекса NDVI. Клиентская сторона системы реализована на базе JavaScript библиотеки React, серверная – на базе Node.js с использованием фреймворка Express, в связке с NoSQL базой данных MongoDB.

На основе опыта реализации комплексной системы мониторинга природно-техногенной безопасности в Красноярском крае и других регионах проанализированы методы организации информационного пространства данных мониторинга. 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.

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. На основании предложенного метода сформирована архитектура информационных ресурсов для создания цифрового паспорта безопасности территорий. В центральном блоке цифрового паспорта безопасности территории реализовано несколько независимых аналитических сервисов, ориентированных на решение задач управления.

Предложены новые способы конструирования, создание систем обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. На примере Красноярского края построена онтология системы поддержки управления пожарной безопасно-

сти. Реализовано наполнение баз данных на уровне муниципальных образований, апробирован процесс аналитического моделирования на уровне региона.

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

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 крайне необходимо для осуществления широкого спектра мероприятий, организации систем поддержки принятия управленческих решений. Очевидна востребованность средств оперативного информирования населения Красноярска и пригородов о качестве атмосферного воздуха и временных трендах его изменения.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Научные публикации по проекту за 2021 год

Статьи

1. 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
2. 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
3. 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. p. 110-132. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.008
4. 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.2021.26.4.008y
5. Kostyukov A.S., Rasskazov I.L., Gerasimov V.S., Polyutov S.P., Karpov S.V., Ershov A.E. Multipolar lattice resonances in plasmonic finite-size metasurfaces // *Photonics*. 2021. 8 (4). 109. DOI: 10.3390/photonics8040109
6. 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
7. 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
8. 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
9. Ерунова М.Г., Гостева А.А. Применение снимков высокого разрешения в задачах управления локальной территорией // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*, 2021, т. 27, № 1, с. 263-266. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-263-276

10. 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
11. Dergunov A., Yakubailik O. Influence of temperature inversions on air pollution in Krasnoyarsk // E3S Web of Conferences 333, 02002 (2021). DOI: 10.1051/e3sconf/202133302002
12. 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
13. 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
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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.
18. 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.
19. 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

20. 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
21. Molyavko A.A., Karepova E.D., Borovikov I.A., Mutovina O.A., Sadovsky M.G. Comparison of search efficiency in symbol sequences with mismatches between alignment and Shaidurov's method // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3047, 2021, pp. 93-97.
22. Dokuchaev D.V., Sadovsky M.G. Comparative Analysis of the Tsarev Combined Algorithm // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3047, 2021, pp. 104-106.
23. Abramov V., Alekhina A., Dorrer M., Tunik M., Tutsenko K., Khoroshavina A., Sadovsky M. Application of convolution neural networks of the DeepLabv3 architecture for preprocessing of magnetic resonance imaging for the differential diagnosis of Parkinson's disease and essential tremors // CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3047, 2021, pp. 107-114.
24. 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
25. 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
26. Kalach A.V., Arifullin E.Z., Nicheporchuk V.V., Kalach E.V., Oblienko A.V. Support technologies for management of the land flood protection // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1902(1), 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012072

#### Программы для ЭВМ

1. Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Картографическое веб-приложение для визуализации состояния атмосферы г. Красноярска // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610487 от 12 января 2022 г. (Заявка № 2021682040 от 29 декабря 2021 г.)
2. Пушкарев А.А., Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Веб-каталог картографических материалов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610596 от 13 января 2021 г. (Заявка № 2021682027 от 29 декабря 2021 г.)

## Доклады

1. Алехина А.Е., Доррер М.Г., Садовский М.Г., Феллер А.А. Применение моделей YOLOV4 в задачах кинематики человека в области спортивной медицины // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXIX Всероссийского семинара, 24 – 26 сентября 2021 года. Красноярск: ИВМ СО РАН. 2021. с. 3-14.
2. Арутюнян А.Г., Туценко К.О., Хорошавина А.А., Похабов Д.В., Абрамов В.Г., Туник М.Е., Садовский М.Г. О робастности данных ботулинотерапии спастики у больных с последствиями острого очагового поражения головного мозга // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXIX Всероссийского семинара, 24 – 26 сентября 2021 года. Красноярск: ИВМ СО РАН. 2021. с. 15-18.
3. Недорез Я.В., Садовский М.Г. Внутренняя структурированность ансамбля генов тРНК человека по частотам триплетов // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXIX Всероссийского семинара, 24 – 26 сентября 2021 года. Красноярск: ИВМ СО РАН. 2021. с. 93-97.
4. Розов А.П., Гравит М.В., Кирик Е.С. Цифровая модель Зимнего дворца Государственного Эрмитажа для расчета эвакуации // Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. с. 305-307.
5. Савченко Е.Т., Гравит М.В., Кирик Е.С. Цифровая модель Римского Колизея для расчета эвакуации // Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. с. 91-94.
6. Грязин И.В., Ничепорчук В.В. Реализация метода оценки рисков социально-природно-техногенных систем на примере природного парка «Ергаки» // В сборнике: Лесной и химический комплексы – проблемы и решения. Красноярск, 2021. С. 257-261.
7. Ничепорчук В.В., Калач А.В. Информационно-аналитическая система природно-техногенной безопасности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции РАН, т. 2, 2021. – Москва: ФГБУ «Российской академии ракетных и артиллерийских наук». с. 130-133.
8. Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э. Методы и технологии геоинформационного моделирования региональных экосистем на основе бассейнового подхода // В сборнике: Экологический мониторинг: методы и подходы. Материалы Международной сателлитной конференции «Экологический мониторинг: методы и подходы» и XX Международного симпозиума «Сложные системы в экстремальных условиях». Красноярск, 2021. С. 60-62.

9. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Температурные карты для экологического мониторинга городской среды // В сборнике: Экологический мониторинг: методы и подходы. Материалы Международной конференции «Экологический мониторинг: методы и подходы» и XX Международного симпозиума «Сложные системы в экстремальных условиях». Красноярск, 2021. С. 53-54.
10. Ничепорчук В.В. Проблемы интеллектуализации геоинформационного моделирования чрезвычайных ситуаций // XXV Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения-2021», 2021, т. 1, с. 448-449.
11. Molyavko A., Karepova E., Sadovsky M., Borovikov I. Convolution and Fast Fourier Transform to Compare Symbol Sequences // 17th international conference Computational Intelligence Methods for Bioinformatics and Biostatistics, CIBB 2021 (November 15-17, 2021). <https://davidechicco.github.io/cibb2021/>.
12. Molyavko A., Sadovsky M., Karepova E., Borovikov I. Novel alignment-free highly parallel method to compare symbol sequences of an arbitrary length // The Society for Mathematical Biology Virtual Meeting – 2021. (June 13-17, 2021). <https://www.smb2021.org/>.
13. Токарев А.В., Кадочников А.А. Заворуев В.В., Якубайлик О.Э., Краснощеков К.В., Дергунов А.В. Мониторинг и оценка состояния атмосферы над руслом р. Енисей с применением квадрокоптера // Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2021), г. Новосибирск, 24-27 августа 2021 г.
14. Ничепорчук В.В. Об интеллектуальном анализе данных мониторинга безопасности территорий // Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2021), г. Новосибирск, 24-27 августа 2021 г.
15. Матузко А.К., Гостева А.А., Ильина С.П. Исследование экологической составляющей качества городской среды на основе доступных пространственных данных // Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2021), г. Новосибирск, 24-27 августа 2021 г.