

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)

УДК 004.9

Рег. № НИОКТР № АААА-А18-  
118011890026-9

Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ  
Врио директора ФИЦ КНЦ СО РАН,  
д.с.-х.н.

\_\_\_\_\_  
27 января 2021 г. Шпедт А.А.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ  
В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ  
(заключительный)

Направление фундаментальных исследований:  
IV.38. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-  
телекоммуникационных систем и сетей, развитие технологий и стандартов  
GRID  
(№ 0356-2019-0013)

Руководитель НИР

главный научный сотрудник

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Н.Я. Шапарев

Красноярск, 2021

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы г.н.с., д.ф.-м.н.	_____	Н.Я. Шапарев (Раздел 1,2)
	(подпись, дата)	
зав. отд., к.б.н.	_____	А.В. Андрианова (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
в.н.с., д.б.н.	_____	В.В. Заворуев (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
в.н.с., к.ф.-м.н.	_____	О.Э. Якубайлик (Раздел 1, 2)
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	П.В. Белолипецкий (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.т.н.	_____	А.А. Кадочников (Раздел 1, 2)
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.б.н.	_____	Г.В. Макарская (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	О.В. Тасейко (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.т.н.	_____	А.В. Токарев (Раздел 1, 2)
	(подпись, дата)	
м.н.с., к.б.н.	_____	Ю.В. Пономарева (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
инженер	_____	А.К. Матузко (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
Нормоконтроль	_____	Вяткин А.В.
	(подпись, дата)	

## РЕФЕРАТ

Отчёт 100 с., 54 рис., 8 табл., 14 источн., 2 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. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ, ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ....	8
1.1. Программы и вычислительные технологии для системы оперативного экологического мониторинга .....	8
1.2. Сервисы тематического картографирования данных оперативного мониторинга на основе геопортала.....	10
1.3. Подсистема визуализации экологических данных с использованием функционала JavaScript-библиотек.....	12
1.4. Методы и технологии геоинформационного моделирования региональных экосистем на основе бассейнового подхода .....	16
1.5. Анализ городских островов тепла и выявление изменений в городской среде по спутниковым данным видимого и инфракрасного диапазонов .....	22
1.6. Физико-математическая модель летнего гидротермического режима р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС .....	25
1.7. Исследование возможности применения данных дистанционного зондирования для поиска термобара на примере акватории Красноярского водохранилища .....	28
1.8. Анализ температурных инверсий в периоды неблагоприятных метеоусловий в Красноярске в зимний период 2019-2020 гг. по данным реанализа .....	34
1.9. Приборно-измерительное обеспечение для оценки загрязнения атмосферы взвешенными частицами .....	37
2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ (ГЕОПОРТАЛОВ) МОНИТОРИНГА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ.....	43
2.1. Информационно-вычислительное обеспечение задач оперативного мониторинга параметров природной среды.....	43
2.3. Редактор стилового оформления слоев и карт геопортала .....	47
2.4. Разработка подсистемы импорта данных реанализа для геопортала ИВМ СО РАН.....	49

2.5. Сервисы для мониторинга атмосферного воздуха (в развитие air.krasn.ru) /метеостанция, сбор данных/ .....	52
2.6. Разработка информационно-аналитической системы для визуализации состояния атмосферы в г. Красноярске.....	57
2.7. Пространственно-временной анализ загрязнения атмосферы Красноярска в период неблагоприятных метеоусловий.....	62
2.8. Анализ влияния метеоусловий на концентрацию PM2.5 в приземном слое атмосферы г. Красноярска .....	64
2.9. Анализ пространственного загрязнения взвешенными частицами приземного слоя атмосферы Октябрьского района г. Красноярска .....	67
2.10. Влияние дыма сибирских лесных пожаров на загрязнение атмосферы г. Красноярска в летний пожароопасный период .....	72
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ТРОФИЧЕСКИМИ ЗВЕНЬЯМИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ИХ ЗАВИСИМОСТИ ОТ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ. ....	78
3.1. Оценка биопродукционного потенциала и экологического статуса водных объектов бассейна Енисея.....	78
3.2. Формирование геопространственной базы данных, содержащей структурно- функциональные характеристики гидробиологических сообществ в разнотипных водных экосистемах бассейна Енисея.....	81
3.3. Биометрический анализ данных для выявления особенностей структурной и пространственно-временной организации гидробиологических сообществ .....	83
3.4. Исследования экосистемы Красноярского водохранилища .....	88
3.5. Оценка влияния разной минерализации природной воды на кинетику образования свободных радикалов у гидробионтов .....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	98

## ВВЕДЕНИЕ

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 геопро странственной 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 беспилотных летательных аппаратов (дронов), и проч. В сочетании со значительным прогрессом последних лет в области веб-технологий (новые инструментальные средства для разработки веб- и мобильных приложений, «облачные» сервисы, и т.д.), перечисленные тенденции создают основу для нового поколения систем мониторинга природной среды.

Представленные результаты научно-исследовательских работ – логическое продолжение ранее начатых исследований (2007 – 2013 гг.), 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.

Настоящий отчет является заключительным по теме 4-летнего научного базового проекта № 0356-2019-0013 «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ».

В соответствии с планом работ, исследования проводились по трем направлениям:

1. Разработка математического и программного обеспечения, вычислительных технологий, алгоритмов и моделей обработки, интерпретации и представления геопро странственных данных на основе методов геоинформационного анализа и математического моделирования.
2. Формирование информационно-вычислительного обеспечения для распределенных проблемно-ориентированных геоинформационных веб-систем (геопорталов) монито-

ринга социально-экономических процессов и состояния природной среды на основе сервис-ориентированной архитектуры.

3. Экспериментальное и вычислительное моделирование взаимосвязей между основными трофическими звеньями водных экосистем и их зависимости от абиотических факторов среды.

Полученные за отчетный 4-летний период основные результаты изложены в соответствующих разделах настоящего отчета.

Ранее, в 2017, 2018 и 2019 гг. были представлены промежуточные отчеты по этой теме.

Полученные в результате выполнения проекта результаты могут составить основу прикладных геоинформационных веб-систем (геопорталов) с развитыми информационно-аналитическими возможностями и картографическим интерфейсом. Эти системы имеют перспективы применения в органах исполнительной власти и на производстве как основа обеспечения для поддержки принятия управленческих решений. Информационно-аналитическое обеспечение необходимо для решения актуальных управленческих задач, в частности, в сфере экологического мониторинга, управления водными ресурсами, моделировании природных и природно-техногенных явлений.

# 1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ, ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

## 1.1. Программы и вычислительные технологии для системы оперативного экологического мониторинга

В отчетный период были продолжены исследования и разработки, направленные на развитие созданной в предыдущие годы подсистемы «Данные оперативного мониторинга» геопортала ИВМ СО РАН, в том числе – ее сервисов сбора, агрегации и визуализации данных оперативного мониторинга. Была существенно переработана и дополнена информационная модель системы, в рамках которой все ее компоненты были структурированы в отдельные элементы (модули), с формализованными программными интерфейсами (API) (рисунок 1). Был расширен перечень типов источников исходных данных, существенно переработаны (оптимизированы по времени вычислений, с минимизацией используемых ресурсов) сервисы вычисления их агрегированных значений. Каждый тип источника данных имеет свои особенности реализации – от элементарной последовательности операций для хорошо специфицированных XML-данных, доступных через документированные веб-сервисы, до нестандартного синтаксического анализа отдельных HTML-страниц Интернет, из которых периодическими запросами извлекаются нужные цифры.

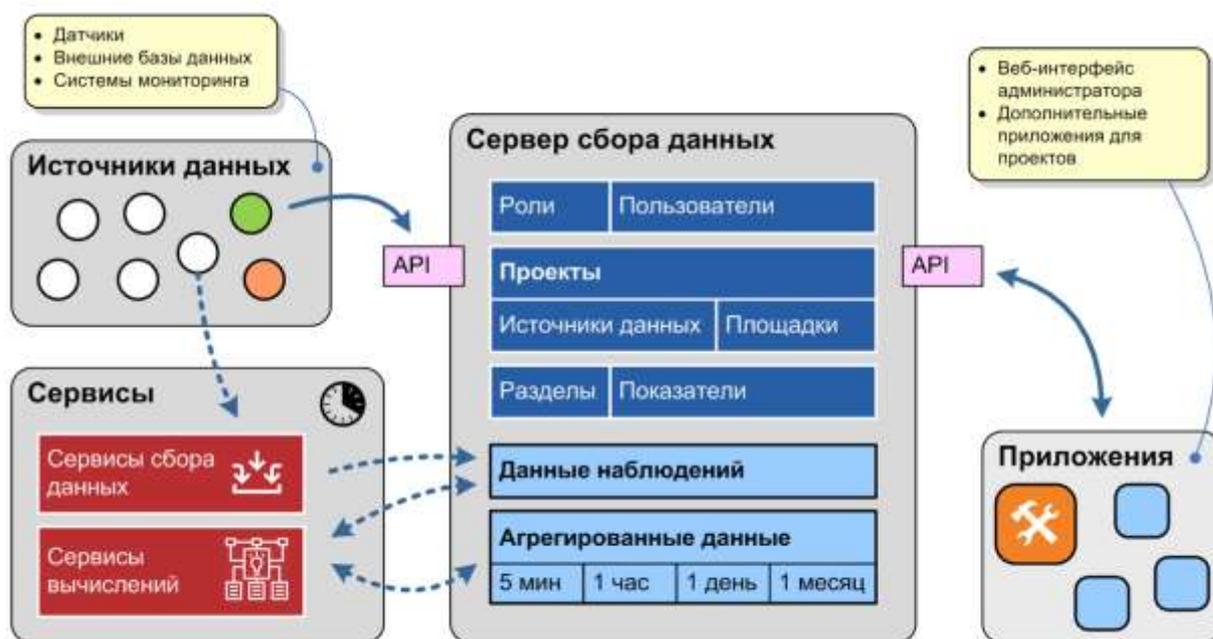


Рисунок 1. Подсистема «Данные оперативного мониторинга» геопортала ИВМ СО РАН.

Выполненная разработка основана на спецификациях Sensor Web Enablement (SWE) – наборе стандартов, разработанных международным Консорциумом геопространственных данных OGC (Open Geospatial Consortium), которые позволяют разработчикам сделать все типы датчиков, преобразователей и хранилищ данных датчиков доступными для обнаружения и использования через Интернет. Одним из основных используемых стандартов в системе «Данные оперативного мониторинга» геопортала ИВМ СО РАН теперь является OGC Sensor Observation Service (SOS), который определяет операции, предлагаемые каждым датчиком, при этом минимальный набор методов включает GetCapabilities, DescribeSensor и GetObservation, которые возвращают информацию о наблюдениях и измерениях, поддерживаемых SOS. Типы данных, предоставляемых датчиком, и сами типы датчиков могут быть получены из реестра датчиков. Разработанное на основе этих технологий, международных стандартов программное обеспечение значительно упростило сбор и анализ данных с распределенных по территории датчиков, показало свою эффективность в задаче формирования сети экологического научно-исследовательского мониторинга для г. Красноярска.

Были созданы новые пользовательские и программные интерфейсы (API) для наполнения и извлечения данных, реализован базовый веб-интерфейс для управления метаданными и навигации по хранилищу. Поддерживается разграничение доступа к объектам системы в зависимости от прав пользователя. Сервис реализован на языке сценариев PHP 5 с использованием фреймворка Yii, для хранения данных применяется СУБД PostgreSQL с модулем расширения PostGIS. Созданы новые веб-сервисы для интерактивного анализа данных накопленного архива наблюдений (рисунок 2).



Рисунок 2 – Интерфейс подсистемы анализа архива данных экологического мониторинга краевой ведомственной системы наблюдений Минэкологии Красноярского края.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A., Tokarev, A.V. WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(3), с. 243-249
- Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., Zavoruev V.V., Yakubailik O.E. Prototype of city environmental monitoring system based on geoportal technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062052.

### 1.2. Сервисы тематического картографирования данных оперативного мониторинга на основе геопортала

Для публикации поступающих с различных сенсоров данных наблюдений в каталог геопортала ИВМ СО РАН был добавлен новый тип ресурса «данные наблюдений». При публикации такого ресурса пользователю предоставляется ряд настроек, включающий выбор из списка доступных станций наблюдения и сенсоров. Каждая станция наблюдения имеет пространственную привязку и определенный набор сенсоров. При этом разные станции наблюдения, не относящиеся к одной группе, могут иметь несколько общих сенсоров. Для просмотра данных наблюдений были расширены возможности существующего картографического веб-интерфейса для пользователя. Основные элементы нового интерфейса: карта подложка и данные наблюдения в виде полупрозрачного слоя на выбранный момент времени для выбранного показателя. В левой части веб-приложения пользователю доступны элементы управления, включающие выбор одного из показателей и временного интервала.

Были расширены возможности существующего картографического веб-интерфейса подсистемы. Создан инструментарий для тематического картографирования данных массива неравномерно распределенных точек в двумерном пространстве с помощью интерполяции с помощью алгоритма обратно-взвешенных расстояний (IDW – Inverse Distance Weighting). Для исследуемой области формируется регулярная сетка, значения в ячейках которой заполняются по указанному IDW-алгоритму. Предусмотрена возможность использования альтернативных методов интерполяции данных, подключения внешних модулей для расчета значений в ячейках сетки. Простые алгоритмы могут быть также реализованы с использованием языка PHP. Более сложные и более требовательные к системе решения могут быть реализованы в виде исполняемых файлов для операционной системы Unix. В

дальнейшей работе планируется использовать алгоритмы отложенной обработки для сложных и длительных по времени процессов преобразования данных наблюдений. Для этой цели могут выступать вычислительные кластеры, сервисы предоставляющий доступ к «большим данным» и различные сервисы WPS, предоставляющие услуги геопроецирования растровых и векторных данных.

Также были исследованы методы динамического построения регулярной сетки небольшого размера (в пределах  $20 \times 20$  ячеек) в векторном формате на стороне клиента с последующим тематическим картографированием на ее основе. Такой подход обеспечивает возможность создания эффектных анимированных изображений для презентации изменения данных во времени с малой нагрузкой на Интернет-канал. Для ряда задач этот вариант является предпочтительным.

В основе реализации – средства отображения данных на стороне клиента в виде растровых изображений; все необходимые расчеты, необходимые для формирования регулярной сетки с данными, выполняются на сервере. При этом относительно большая нагрузка на канал (объем передаваемых данных) компенсируется использованием возможностей кэширования растровых изображений на стороне браузера и кэшированием растровых изображений после вычислений на стороне сервера при повторном использовании сформированных растров. В результате веб-приложение отображает всю тематическую информацию либо ее срез в зависимости от настроек пользователя в реальном времени без существенных задержек.

После настройки параметров ресурса типа «данные наблюдений» в подсистеме администрирования данных пользователи получают возможность управления параметрами отображения (рисунок 3):

- выбор одного из показателей для отображения из доступного перечня показателей;
- выбор временного интервала;
- построение тематической карты на всю исследуемую территорию по исходным данным с различных сенсоров в точках наблюдений с помощью интерполяции;
- анимированный просмотр динамики изменения данных во времени;
- объединение в одном представлении данных информации по станциям наблюдений из разных проектов.

*Основные публикации по разделу:*

- Kadochnikov A, Shaparev N, Tokarev A, Yakubailik O. Software tools for web mapping systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 516(1), 012007.

- Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. Development of computational technologies and software for assessment of air pollution in Krasnoyarsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1), 012080.

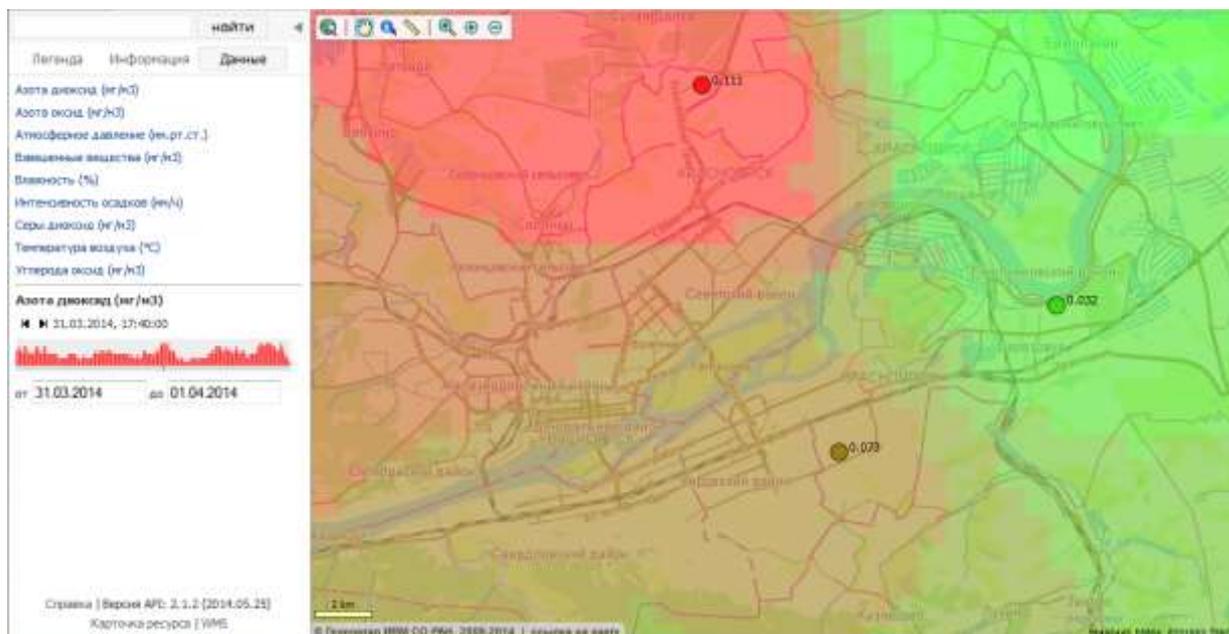


Рисунок 3 – Автоматическое построение тематических карт по данным подсистемы «Данные оперативного мониторинга» геопортала ИВМ СО РАН.

### 1.3. Подсистема визуализации экологических данных с использованием функционала JavaScript-библиотек

Предмет исследования – проектирование и разработка программно-технологического обеспечения для отображения данных оперативного мониторинга различного типа. Например – экологических данных, в том числе различных показателей состояния атмосферного воздуха: наличие загрязняющих веществ, температура, влажность, давление, скорость и направление ветра, концентрации взвешенных частиц, и т.д.

Решение задачи выполнено в сервис-ориентированной архитектуре, на основе существующих программных компонент и сервисов геопортала ИВМ СО РАН. Текущая версия разработки ориентирована на использование в составе комплекса программных средств для оперативного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в г. Красноярске.

Источником информации подсистемы является установленные по городу станции мониторинга атмосферы (около 25 шт.), которые регистрируют характеристики атмосферы и передают всю информацию в систему хранения данных на основе геопортала ИВМ СО РАН (сервер сбора данных). На рисунке 4 представлена модель работы сервера сбора данных, с которым взаимодействует подсистема визуализации экологических данных.

Разработанное программное обеспечение позволяет просмотреть данные с сервера сбора данных за определенных промежутков времени в виде карты, где подложкой является карта города, поверх которой размещаются сведения со станций мониторинга. Данные также можно посмотреть на графике.

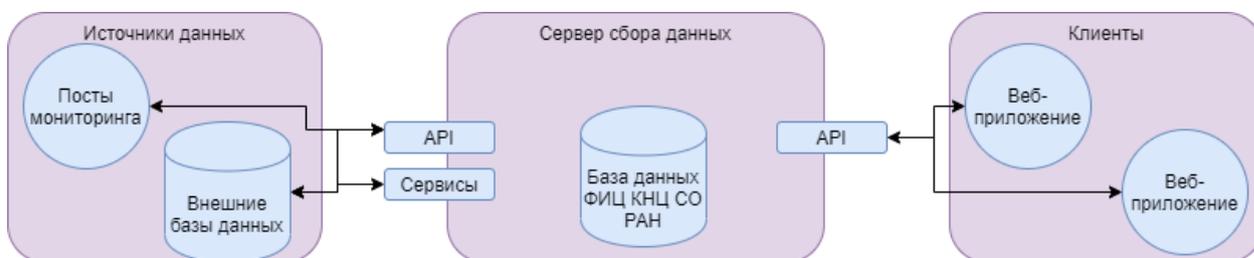


Рисунок 4 – Обмен информации между клиентами, сервером сбора данных и источниками данных.

Станции мониторинга отправляют данные измерений на сервер с различной периодичностью, которая зависит от соответствующих их настроек. Пользователь взаимодействует с веб-приложением через меню пользователя, в котором можно указать период и дату, за которую необходимо вывести данные, указать какие именно данные выводить и выбрать станции мониторинга для отображения.

При обновлении отображаемой информации происходит запрос данных при помощи разработанного оригинального программного интерфейса (API) к серверу с базой данных. Сервер отправляет ответ, и вся информация помещается в локальное хранилище на стороне клиента. При изменении даты слоя информация берется из локального хранилища. Для изменения даты/времени слоя необходимо передвинуть слайдер, находящийся в нижней части экрана. При обновлении слоя раскраска осуществляется в соответствии с легендой.

Все веб-приложение разбито на пять модулей, содержащие различные функции задачей которых является обработка данных. На рисунке 5 представлена модульная система подсистемы.

Модуль загрузки отвечает за загрузку данных с сервера. Он взаимодействует с модулем получения атрибутов, который возвращает установленные настройки в интерфейсе пользователя (какие посты и показатели необходимо отобразить и за какой период), на основе этих настроек и происходит запрос на сервер. После получения данных модуль загрузки обрабатывает данные с помощью модуля обработки. Данные поступают в формате XML и их следует превратить в массивы данных или объекты для дальнейшей работы, так как библиотеки требуют для своей работы определенные структуры данных. Каждая

функция в модуле отвечает за формирования определенного типа данных для отображения на карте или на графике. Далее сформированные данные передаются в локальную базу. Из локальной базы данные передаются в модули обновления данных: графический модуль, картографический модули и модуль атрибутивно информации. Графический модуль отвечает за инициализацию графиков и за обновление отображаемой информации на графиках. Картографический модуль отвечает за обновление слоев с информацией на карте. Модуль атрибутивной информации обновляет данные в интерфейсе пользователя (текущее время слоя, легенда).

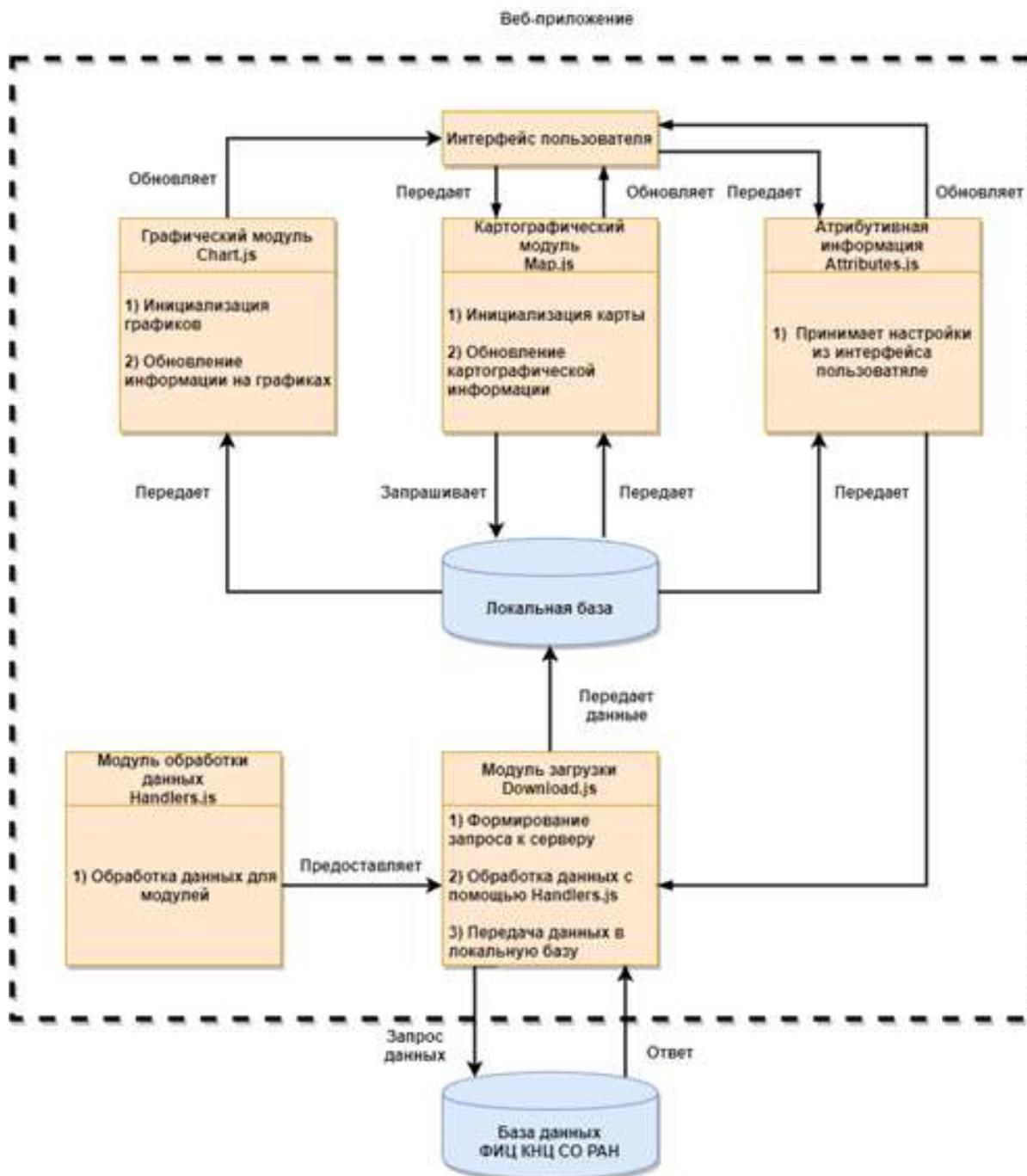


Рисунок 5 – Модульная система подсистемы визуализации данных мониторинга.

Используемое при разработке инструментальное программное обеспечение – JavaScript-библиотеки 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 – все веб-приложение разбито на отдельные файлы и эта библиотека позволяет все их скомпилировать в один файл. Библиотека openlayers.js реализует картографический веб-интерфейс, позволяет визуализировать геоданные популярных форматов ГИС. Библиотека nvd3.js обеспечивает построение графиков и гистограмм. Библиотека bootstrap.js – HTML/CSS/JavaScript фреймворк для быстрого создания адаптивного дизайна сайта – использовалась для создания пользовательского веб-интерфейса. На рисунке 6 представлены примеры пользовательского интерфейса подсистемы, созданного на основе перечисленных библиотек.

Разработанный интерфейс пользователя позволяет выбрать необходимые показатели и станции мониторинга для отображения на карте, «Настройки слоя» позволяют включать слои с дополнительной информацией, управлять режимами отображения данных на карте и графиках.

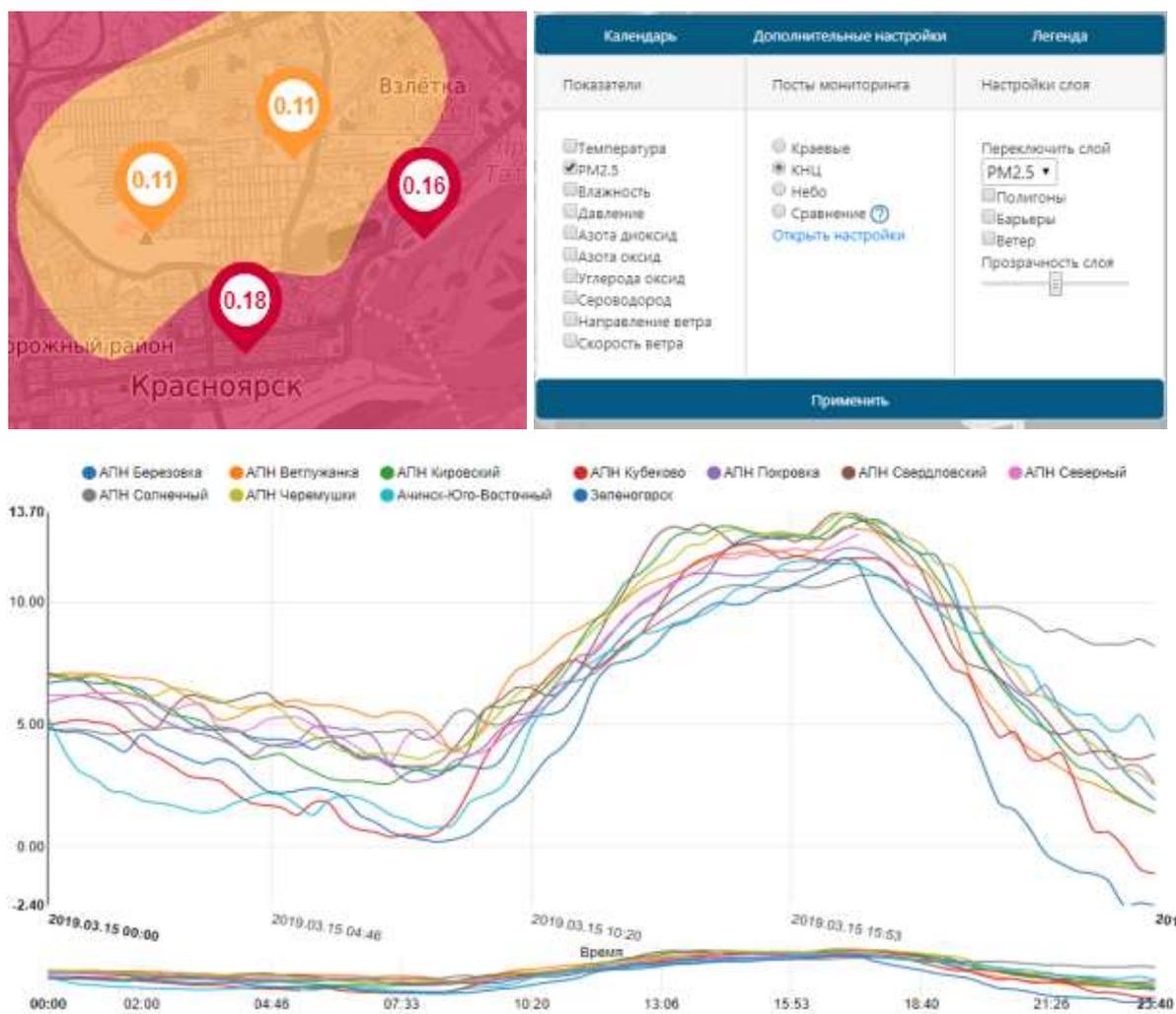


Рисунок 6 – Элементы пользовательского интерфейса подсистемы.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubailik O.E., Zavoruev V.V., Malimonov M.I., Pushkarev A.A. Spatial analysis of air pollution in Krasnoyarsk // CEUR Workshop Proceedings, 2019, 2534, pp. 491-496.

#### 1.4. Методы и технологии геоинформационного моделирования региональных экосистем на основе бассейнового подхода

Для территории Красноярского края на основе бассейнового подхода создана геопространственная база данных для оценки природно-ресурсного потенциала. Детальная многоуровневая иерархическая система водосборного деления территории состоит из неоднородных неделимых территорий бассейнов 4го уровня, где минимальный бассейн выступает в качестве элементарной территориальной единицы, с которой связан набор атрибутов-характеристик на основе рельефа, метеорологических, ландшафтных, почвенных и прочих данных, в том числе – данных ДЗЗ. Разнородная информация комплексного исследования территории в одной геопространственной базе данных позволяет проводить многомерный анализ природно-ресурсного потенциала территории в целом и выявлять неоднородные участки регионов для эффективного земледелия нашего края.

Бассейновое моделирование территории проводилось на основе цифровой модели рельефа MERIT DEM Hydro (пространственное разрешение 90 м) и векторный набор гидрографической сети ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского масштабов 1:10 00 000, 1:2 500 000 и 1:100 000.

Для отработки методики по созданию модели иерархической структуры водосборного деления были использованы исходные данные водосборы крупных рек Красноярского края – реки Кан, Манна, Туба и Оя. Получено 1105 бассейнов 4-го уровня, где р. Кан – 479 бассейнов 4-го уровня водосборного деления, Мана – 94 бассейна, Туба – 483, Оя – 49.

Расчет основных статистических показателей морфометрических характеристик рельефа для каждой водосборной территории осуществлялся в ГИС QGIS. С помощью инструмента «Зональная статистика» рассчитаны средние значения. Для каждого уровня иерархической системы водораздельного деления через «Запросы» и «Фильтры» рассчитаны значения статистических морфологических характеристик рельефа (высота, уклон, экспозиция склона). Проведен анализ основных морфометрических показателей рельефа бассейнов рек. Рассчитаны основные статистические показатели - минимум, максимум, среднее, среднееквадратическое отклонение. Получены тематические слои морфометрических показателей в соответствии с существующими классификациями (рисунок 7). Получены статистические распределения по каждому отдельному морфометрическому показателю на всех уровнях системы водосборного деления.

**Оценка теплообеспеченности.** Температура приземного слоя воздуха является одной из основных характеристик климата, которую необходимо учитывать в целом ряде отраслей экономики (строительство и эксплуатация зданий и сооружений, сельское хозяйство, рекреация и туризм).

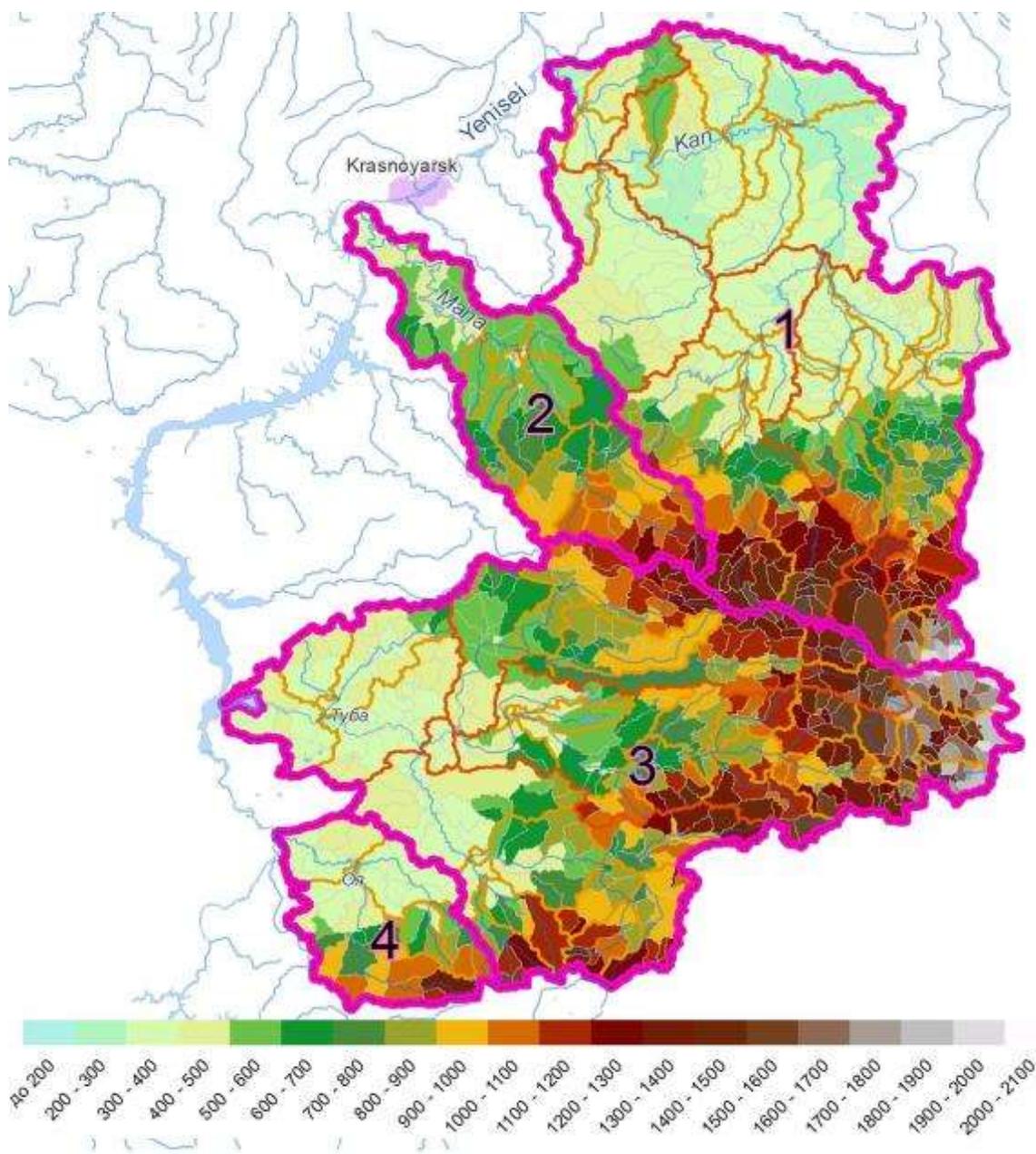


Рисунок 7 – Тематический слой ранжирования бассейнов по средней высоте

В исследовании динамики температуры 4-х водоразделов использовались данные Terra/MODIS продукта типа MOD11A2 – Land Surface Temperature & Emissivity 8-Day L3 Global 1km. Данные содержат 8-ми дневные осреднения температуры поверхности Земли в дневное и ночное время с пространственным разрешением 1 км при условии ясного неба, выполненные в синусоидальной проекции. Всего исследовано 46 сцены за 2019 г. Каждый день представлен данными ночной и дневной температуры поверхности Земли. В

ГИС QGIS были получены среднесуточные значения каждого дня. Далее посчитана сумма активных температур воздуха выше 10 °С. Сумма активных температур – показатель, характеризующий количество тепла и выражающийся суммой средних суточных температур воздуха или почвы, превышающий определённый порог: 0, 5, 10 °С или биологический минимум температуры, необходимой для развития определённого растения. Тематический слой суммы активных температур представлен на рисунке 9б.

Проведен анализ сезонной динамики температуры поверхности исследуемой территории, получены статистические распределения изменения температуры поверхности в течении 2019 года для каждого водораздела. Получены тематические слои температуры поверхности за 46 дат. Посчитана годовая амплитуда для всех уровней системы водосборного деления данной территории.

**Оценка влагообеспеченности.** В качестве показателя обеспеченности влагой используют количество выпавших осадков, выраженное обычно в миллиметрах слоя воды. Для получения годового хода накопления осадков 4-х водоразделов использовались данные реанализа NASA. Был получен набор тематических слоев накопленных осадков за период 2001-2019 г., построены графики накопленных осадков за 2019 год для каждого водораздела.

**Расчёт индексов вегетации.** Для определения вегетационных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) на территорию 4 водосборов (Кан, Мана, Туба и Оя) сформирован и проанализирован архив спутниковых данных, созданный на основе 8-дневных безоблачных данных. Terra MODIS MOD09Q1 (пространственное разрешение 250 м) за 2019 г. Получены тематические слои температуры поверхности за 46 дат (рисунок 8).

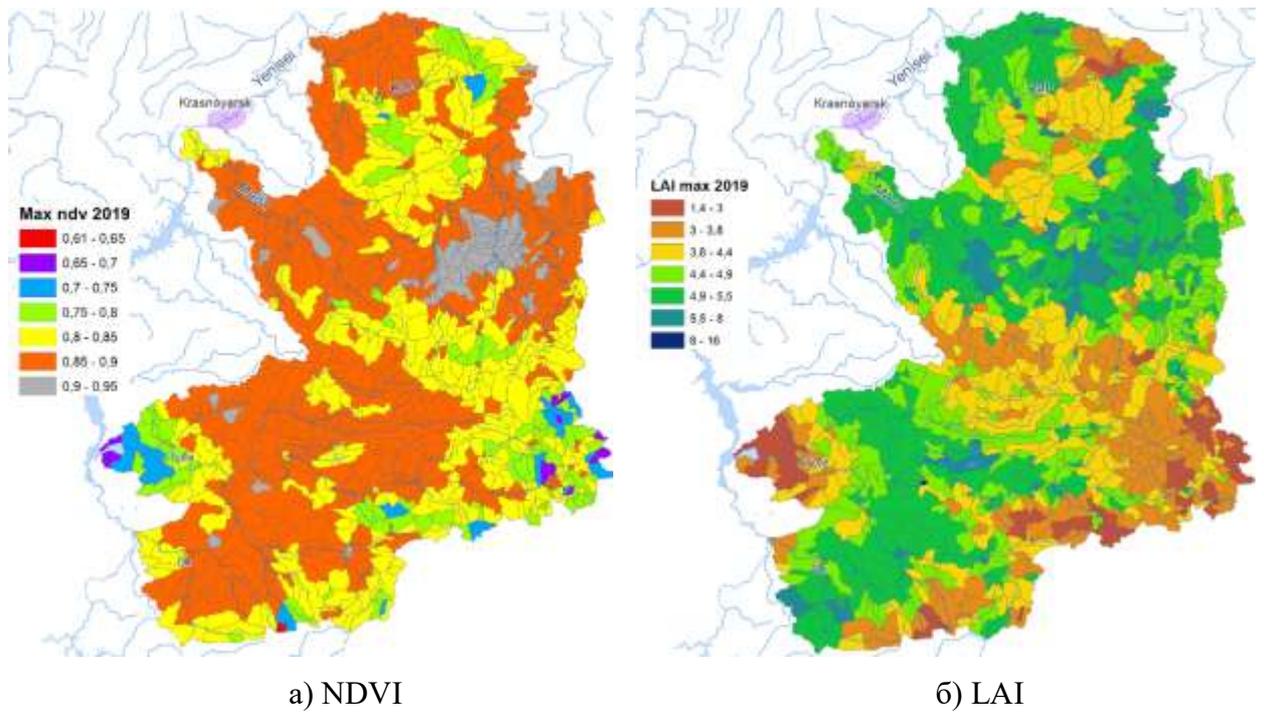
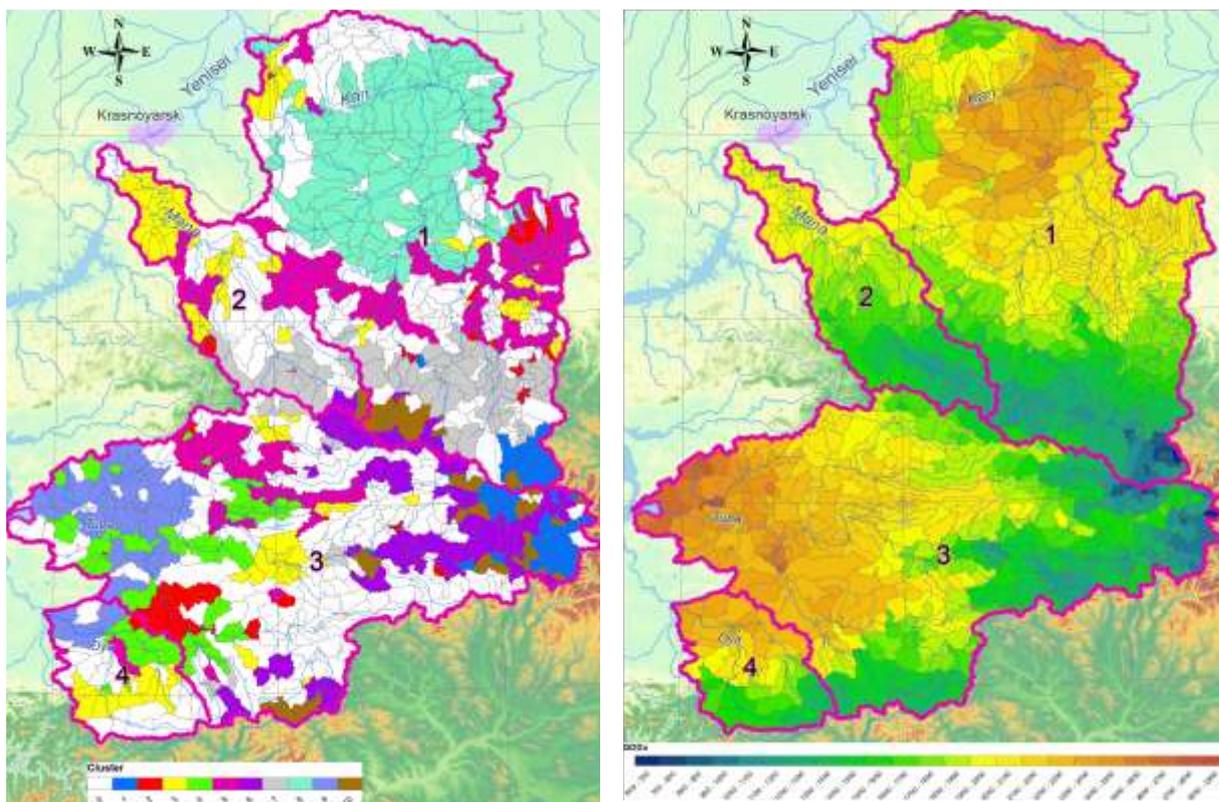


Рисунок 8 – Тематические слои ранжирования бассейнов по максимальному значению вегетационных индексов.

Для расчета вегетационного индекса LAI (Leaf Area Index) индекс листовой поверхности на территорию 4 водосборов (Кан, Мана, Туба и Оя) сформирован и проанализирован архив спутниковых данных, созданный на основе 8-дневных безоблачных данных Terra MODIS MCD15A2H (пространственное разрешение 500 м) за 2019г. Получены тематические слои температуры поверхности за 46 дат.

В результате 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.

Проведено исследования по выявлению взаимосвязей вегетационных индексов. Выявлена группа водоразделов, где вегетационные индексы коррелируют между собой. Так, например, для водораздела 2-го уровня (32 бассейна) притока Тубы корреляция между NDVI и LAI составляет 0.79, а NDVI и SAVI – 0.76.



а) Распределение десяти кластеров на географической карте

б) Распределение значений суммы активных температур.

Рисунок 9 – Тематические слои.

**Многомерный анализ.** Проведен кластерный анализ по выявлению однородных участков по данным температурного хода за 2019 год. Для каждого бассейна 4го уровня за 46 дат получены средние значения среднесуточной температуры. Ключевым результатом этой работы является то, что инструмент нелинейной кластеризации (метод эластичных карт) надежно выявляет кластеры, объединяющие небольшие водные бассейны в группы со схожими географическими, климатическими и землепользовательскими свойствами. Получено 10 классов, на рисунке 9а водоразделы, выпадающие из любого кластера, показаны белым цветом.

Проведен многомерный анализ для каждого кластера. Результат основных статистических показателей (высота, сумма накопленных осадков, сумма активных температур, вегетационные индексы NDVI, SAVI и LAI) для каждого кластера представлен в таблице 1.

Таблица 1. Статистические значения элементов геопространственной базы данных, сгруппированные по кластерам (минимум, максимум, среднее значение, стандартное отклонение)

C	Elevation				Precipitation				GDU			
	$h$	$H$	$\langle h \rangle$	$\sigma_h$	$p$	$P$	$\langle p \rangle$	$\sigma_p$	$g$	$G$	$\langle g \rangle$	$\sigma_g$
1	589.2	2021.3	1541.9	323.2	528.2	787.0	634.6	61.4	95.7	474.2	268.2	77.2
2	248.5	1080.9	611.9	244.0	485.2	895.8	718.2	116.4	354.8	945.5	681.2	174.5
3	292.2	1181.5	585.3	184.9	473.0	914.0	688.0	119.4	420.9	875.0	636.4	88.5
4	280.5	835.1	453.4	115.9	593.9	929.5	817.7	98.0	685.3	1226.9	880.3	93.7
5	274.9	1123.3	545.2	155.7	484.0	937.6	697.5	115.8	562.8	829.9	714.7	72.5
6	599.1	1862.2	1303.0	288.2	549.6	853.4	708.6	87.8	303.1	637.0	441.2	73.2
7	652.2	1566.9	1062.6	186.5	682.2	905.6	749.3	57.4	263.1	560.6	437.0	74.1
8	203.8	484.2	331.2	58.9	478.5	668.0	552.0	48.6	641.9	1162.9	891.5	124.7
9	285.9	470.4	392.8	47.6	596.0	848.0	733.9	70.0	814.4	1209.3	976.1	98.5
10	55.2	1927.5	1358.5	319.8	535.3	803.4	692.1	88.7	208.1	396.9	328.6	38.1

C	NDVI				SAVI				LAI			
	$n$	$N$	$\langle n \rangle$	$\sigma_n$	$s$	$S$	$\langle s \rangle$	$\sigma_s$	$l$	$L$	$\langle l \rangle$	$\sigma_l$
1	0.7	0.88	0.79	0.05	0.36	0.54	0.45	0.04	1.82	5.96	3.58	0.93
2	0.8	0.90	0.87	0.02	0.39	0.64	0.49	0.05	3.50	7.00	5.00	0.50
3	0.8	0.91	0.87	0.01	0.39	0.62	0.48	0.04	3.30	6.50	4.90	0.48
4	0.7	0.89	0.85	0.03	0.44	0.62	0.52	0.04	2.70	8.50	4.80	0.91
5	0.8	0.92	0.88	0.02	0.41	0.62	0.51	0.04	3.90	5.90	5.00	0.39
6	0.7	0.91	0.82	0.04	0.36	0.60	0.48	0.05	1.90	5.70	3.70	0.72
7	0.8	0.89	0.84	0.02	0.38	0.54	0.44	0.03	3.00	5.88	4.30	0.57
8	0.6	0.92	0.84	0.04	0.33	0.65	0.53	0.03	2.29	15.90	4.71	1.32
9	0.7	0.90	0.84	0.03	0.47	0.66	0.56	0.04	2.70	5.40	4.49	0.68
10	0.7	0.89	0.82	0.05	0.37	0.54	0.47	0.03	1.87	5.62	3.91	0.80

Проведен анализ взаимосвязей статистических показателей элементов геопространственной базы для оценки природно-ресурсного потенциала. Методы многомерного анализа данных позволяют выявлять закономерности распределения данных, определять взаимосвязи между ними.

Так, например, однозначно выделяются бассейны, используемые для сельского хозяйства, см. рисунок 9а, кластеры № 8 и № 9. В этих кластерах высокая сумма активных температур и средняя высота. В остальных кластерах не выявлено однозначных взаимосвязей, что говорит о недостаточной изученности данного вопроса.

*Основные публикации по разделу:*

- Erunova M.G., Yakubailik O.E. Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 421 (6), 062039.
- Erunova M.G., Sadovsky M.G. An interplay of annual temperature variation and NDVI figures in clustering of small watersheds // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 548(3), 032022.
- Erunova M.G., Yakubailik O.E. and Sadovsky M.G. Annual temperature variation reliably identifies different sites in a large water basin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862(6), 062060.

## 1.5. Анализ городских островов тепла и выявление изменений в городской среде по спутниковым данным видимого и инфракрасного диапазонов

Решение актуальных современных задач мониторинга территорий, городского кадастра и землеустройства базируется на использовании аэрокосмической информации. Спутниковые данные являются объективной и независимой от разных субъективных факторов информацией, которая может регулярно регистрироваться, охватывая при этом сразу всю исследуемую территорию. Предметом настоящего исследования стал анализ применимости различных доступных спутниковых данных теплового инфракрасного (ИК) диапазона для выявления антропогенных изменений ландшафта городской среды на примере г. Красноярска. Главная идея – в оценке возможностей полностью автоматизированного выявления изменений ландшафта. Если традиционный используемый подход опирается на сравнительный анализ разновременных спутниковых изображений с помощью визуального дешифрирования оператором, то в нашем случае предпринимается попытка значительную часть задачи переложить на компьютер, минимизировать «субъективный фактор».

Были рассмотрены безоблачные спутниковые данные ИК-диапазона Landsat-8 TIRS (пространственное разрешение 100 м) и Terra MODIS (разрешение 1000 м) за сентябрь 2016-го и 2018-го гг., выполнена их стандартная предварительная обработка. На те же даты были получены сцены Planet Score (разрешение 3 м), используя которые на всю территорию города были подготовлены карты вегетационного индекса NDVI, и затем, с их помощью – карты температуры поверхности Земли (LST – land surface temperature).

Методической основой рассмотренного подхода является классический алгоритм определения LST по спутниковым данным, предложенный разработчиками программы Landsat. Значения NDVI, которые основаны на данных видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, необходимы для вычисления коэффициента эмиссии (излучения), который в свою очередь нужен для расчета температуры поверхности LST. Ранее проведенные исследования показали, что сочетание спутниковых данных различного пространственного разрешения дает возможность проведения детального анализа температурных аномалий городской среды.

Были построены карты температуры поверхности земли Красноярска и его окрестностей. Было обнаружено, что на территории города выделяется несколько тепловых аномальных зон разного типа – природные возвышенности, территории около крупных торгово-развлекательных центров, промышленные зоны предприятий, участки теплового загрязнения сточными водами. Был сделан вывод о том, что интенсивное излучение тепла наблюдается от объектов, сделанных из плотных материалов с высокой теплоемкостью,

таких как асфальт, бетон и железобетон, камень. Результаты распределения температуры на уровне городских кварталов показаны на рисунке 10.



Рисунок 10. Комбинация данных теплового ИК-диапазона Landsat-8 с используемыми для вычисления NDVI данными PlanetScore позволяют получить детальную тепловую карту уровня отдельных городских кварталов.

Terra MODIS не имеет достаточного пространственного разрешения для изучения городской территории, поэтому основой исследования стала комбинация данных более высокого пространственного разрешения Landsat / Planet Scope, а данные MODIS использовались для контроля точности. Вычисленная температура LST на основе Landsat / Planet Score сравнивалась с температурой LST по Terra MODIS (ее не нужно вычислять, это один из стандартных продуктов) на соответствующие даты; получено хорошее соответствие результатов: коэффициент детерминации составил  $R^2 \sim 0,82$ .

Для определения изменений в городском ландшафте была вычислена разница нормированных значений температуры поверхности земли в сентябре 2016 и 2018 гг. Пиксели полученного изображения были разделены на 3 класса: без изменений, незначительные изменения при перепаде температур 1-3 градуса и значительные изменения при перепаде температур более 4 градусов. Результаты подтвердили исходную гипотезу – зоны значительного изменения температуры хорошо выделяют территории застройки или сноса зда-

ний, сооружений, и проч., и таким образом вполне могут служить индикатором изменений в городской среде.

На рисунке 11 представлены снимки построенного в рассматриваемый период спортивного кластера «Сопка» Универсиады-2019 в Красноярске, в котором прошли соревнования по фристайлу и сноуборду. Увеличение температуры поверхности земли LST связаны с созданием горнолыжных трасс, строительством прочих спортивных сооружений.



Рисунок 11 – Изменение ландшафта, связанные со строительством в период 2016-2018 гг. спортивного кластера «Сопка» Универсиады-2019 в лесном массиве Красноярска.

На рисунке 12 представлена обратная ситуация – уменьшение температуры LST. Обнаружен демонтаж производственных цехов предприятия, который привел к возникновению соответствующих аномалий изменения температуры поверхности земли.

Результаты показали, что использование сочетания спутниковых данных различного пространственного разрешения дает возможность проведения детального анализа температурных аномалий городской среды. Такая информация может быть использована при планировании развития города, освоении новых территорий, реконструкции жилых и производственных зон, для оценки комфортности условий жизни в различных городских районах.



Рисунок 12 – Изменение ландшафта, связанные со сносом цехов Красноярского завода

комбайнов с 2016 по 2018 год в центре г. Красноярска.

*Основные публикации по разделу:*

- Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2018, 11(8), 934-945.
- Matuzko AK, Yakubailik OE. Assessment of thermal conditions in Krasnoyarsk urban area with use of different satellite data and geographic information system // Thermal Science, 2019, Vol. 23, Suppl. 2, pp. S615-S621.
- Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062051.

#### 1.6. Физико-математическая модель летнего гидротермического режима р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Были проведены исследования температуры поверхности воды в р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (на расстояние от 35 до 124 км от плотины) на основе методов физико-математического моделирования, интерпретации данных дистанционного зондирования Земли и натурных наземных наблюдений.

Предметом анализа являлись все основные физические процессы, влияющие на изменение температуры воды, которая возникает в связи с обменом энергией между водой и окружающей средой. Результатом проведенного анализа стало создание физико-математической модели летнего гидротермического режима р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на основе детерминированного подхода. В этой модели учитываются следующие физические процессы: поглощение водой прямой и рассеянной солнечной радиации, поглощение поверхностью воды исходящей из атмосферы радиации в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне, излучение поверхностью воды радиации в ИК-диапазоне, испарительный и конвективный теплообмен.

Разработанная модель основана на вычислении температуры воды в движущейся вместе с водой системе координат и применена к р. Енисей. Рассматривался участок реки от плотины Красноярской ГЭС до точки, расположенной от нее на расстоянии 124 км; на этом участке было выбрано 4 створа, соответствующих расположению гидростов. Морфометрические характеристики реки формировались по данным спутниковых снимков высокого пространственного разрешения и лоцманским картам.

Определяющими в энергообмене являются солнечная радиация и тепловое инфракрасное излучение. Для всех основных физических процессов на основе фундаментальных физических законов построены физико-математические модели; характеристики некоторых моделируемых параметров представлены на рисунке 13.

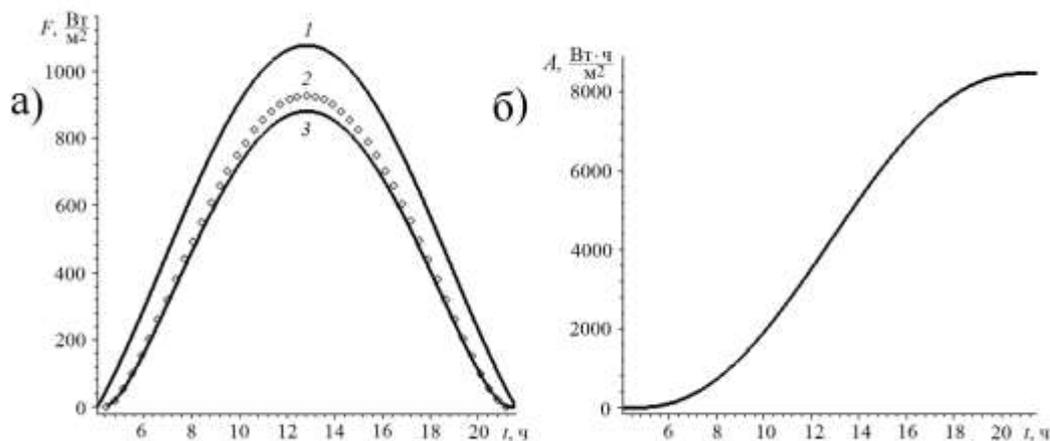


Рисунок 13. а) Зависимость мощности солнечного излучения от времени: 1 – падающего на атмосферу Земли, 2 – прошедшего через атмосферу, 3 – поглощенного водой; б) зависимость поглощаемой водой солнечной энергии от времени.

Был рассмотрен ряд модельных ситуаций, для которых были получены количественные оценки рассматриваемых параметров. Модельные данные сравнивались с результатами наземных натурных измерений – по данным с официальных гидропостов и самостоятельных непосредственных измерений температуры воды.

Также были проведены исследования температуры воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС по данным дистанционного зондирования ИК-диапазона спутника Landsat-8. Эти ИК-данные использовались для вычисления температуры поверхности воды, на основе общепринятых методов ее оценки по спутниковым данным, с учетом атмосферной коррекции.

Результаты сравнения данных по температуре на основе физико-математической модели с данными на основе дистанционного зондирования Земли показаны на рисунке 14.

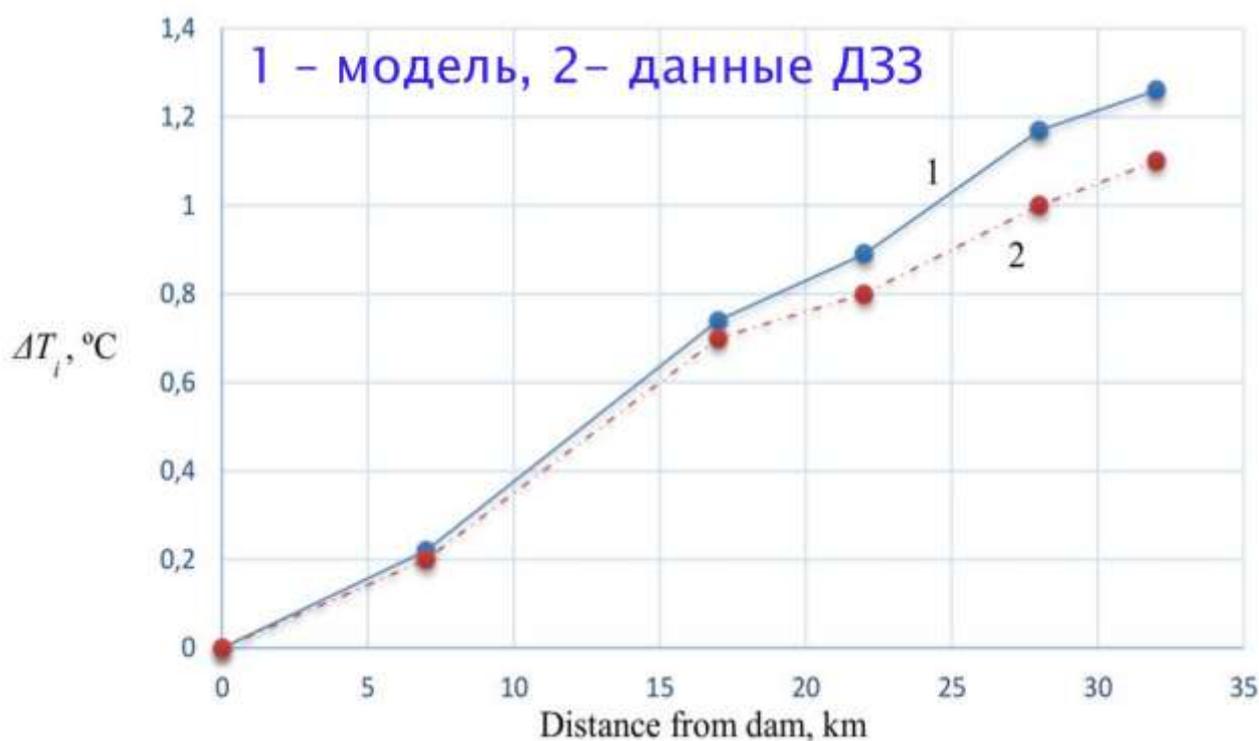


Рисунок 14 – Изменение температуры поверхности воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС по данным физико-математического моделирования и дистанционного зондирования.

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

*Основные публикации по разделу:*

- Shaparev N.Y. Modelling summer water temperature on the Yenisei River // Thermal Science, 2019, Vol. 23, Suppl. 2, pp. S607-S614.
- Shaparev N.Y., Shokin Y.I., Yakubailik O.E. Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei river (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1), 012022.
- Шапарев Н.Я., Шокин Ю.И. Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 6. С. 108–115. DOI:10.25743/ICT.2018.23.6.010

### 1.7. Исследование возможности применения данных дистанционного зондирования для поиска термобара на примере акватории Красноярского водохранилища

Цель работы заключается в том, чтобы проверить возможность использования данных дистанционного зондирования Земли для обнаружения термического бара в весенний период и отследить его движение по Красноярскому водохранилищу.

Термобар (термический бар) – явление, наблюдаемое во многих глубоких озерах и водохранилищах, когда водоем по температурным условиям делится на две части: теплоактивную область (весной она расположена в прибрежье, а осенью – в открытой части водоема), и теплоинертную область (весной в открытой части водоема, а осенью – в прибрежье), и между этими частями находится слой с наибольшей плотностью воды. Термобар в крупных водоемах может существовать от нескольких дней до 2-3 месяцев, и за этот период идет интенсивное перемешивание водных слоев, вентиляция глубоких слоев воды. Скорость передвижения термобара составляет от сотен метров за сутки до 2-3 км в сутки.

В период весеннего прогревания, когда температура воздуха устойчиво держится выше нуля, лед начинает таять. В это время имеет место прямая стратификация, при которой температура воды убывает с глубиной. Вода обладает наибольшей плотностью при температуре 4°C. Когда поверхностный слой нагревается до этой температуры нарушается устойчивость стратификации в водоеме и появляется термический барьер. Термический барьер – это фронтальный раздел, который отделяет теплую воду с температурой выше 4°C и холодную с температурой ниже 4°C. Это явление возникает в водоемах в периоды весеннего прогрева и осеннего охлаждения. Термический барьер отделяет теплоактивную и теплоинертную области водоема и в результате затрудняется тепло- и водообмен. Разделенные термическим баром воды резко различаются не только по температуре, но также по цвету прозрачности и химическому составу. Изучение термобара в Красноярском водохранилище важно для представления его общей гидротермической картины, а также исследования особенностей режима рек после строительства ГЭС.

Для анализа термобара на Красноярском водохранилище использовались долговременные наборы данных о температуре поверхности Земли, полученные благодаря наблюдениям со спектрорадиометра Terra MODIS. Контроль качества, проверка спутниковой информации осуществлялась по данным наземных пунктов мониторинга гидрологических показателей водохранилища (гидропостов), данные с которых доступны на геопортале ИВМ СО РАН авторизованным пользователям.

Использовались продукты MOD11A1 и MOD11A2, содержащие ежедневные и усредненные за 8 дней безоблачные данные по яркостной температуре LST (land surface

temperature). На их основе проведены исследования изменения температуры в весенний период времени от южной части водохранилища к северной, до Красноярской ГЭС, это движение соответствует явлению термобара. Обработка данных проводилась в геоинформационной системе QGIS.

В настоящей работе рассматривались данные за период 2016-2019 гг. В первой декаде апреля отмечается переход температуры воздуха через 0°C, лед на водохранилище начинает таять, наступает период весеннего прогрева воды. Поэтому для изучения возможности отслеживания термобара был выбран период с первой декады апреля до середины июня за указанные годы. Для визуальной оценки изменения дневной температуры с апреля по июнь построены тематические карты, показывающие распределение температуры по поверхности водохранилища. Тематические карты, иллюстрирующие местоположение предполагаемого фронтального раздела представлены на рисунках 15 – 18.

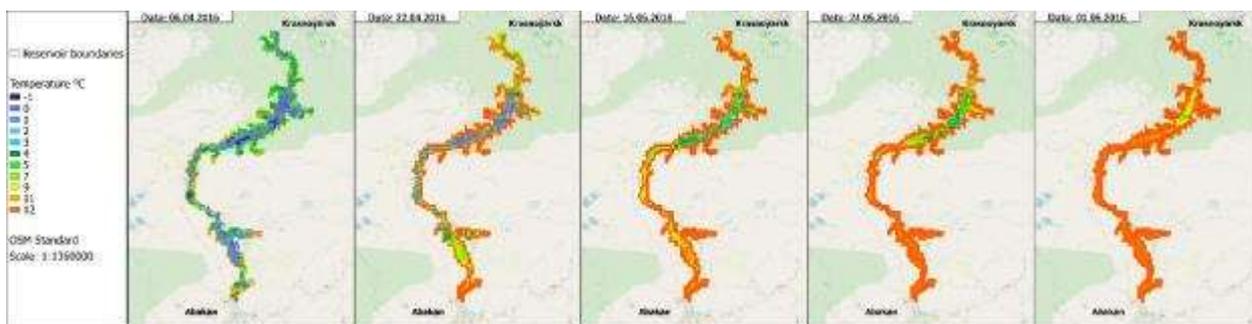


Рисунок 15. Движение температурного фронта с апреля по июнь в 2016 г.

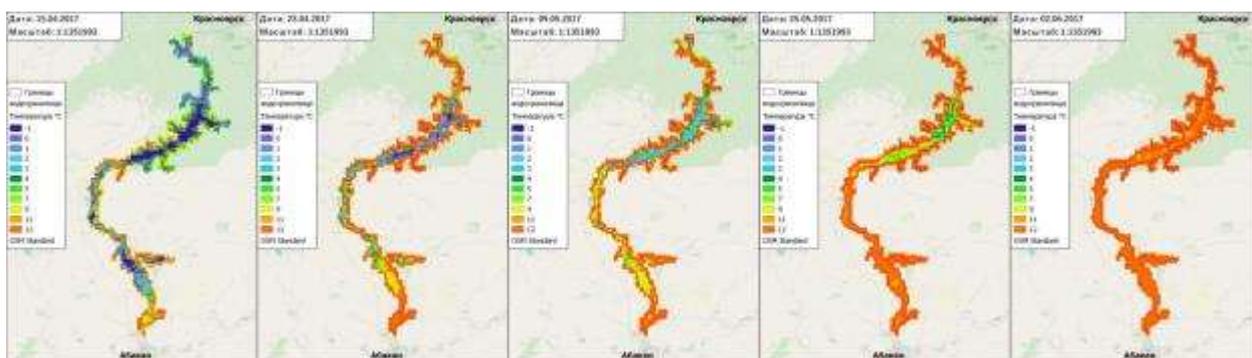


Рисунок 16. Движение температурного фронта с апреля по июнь в 2017 г.

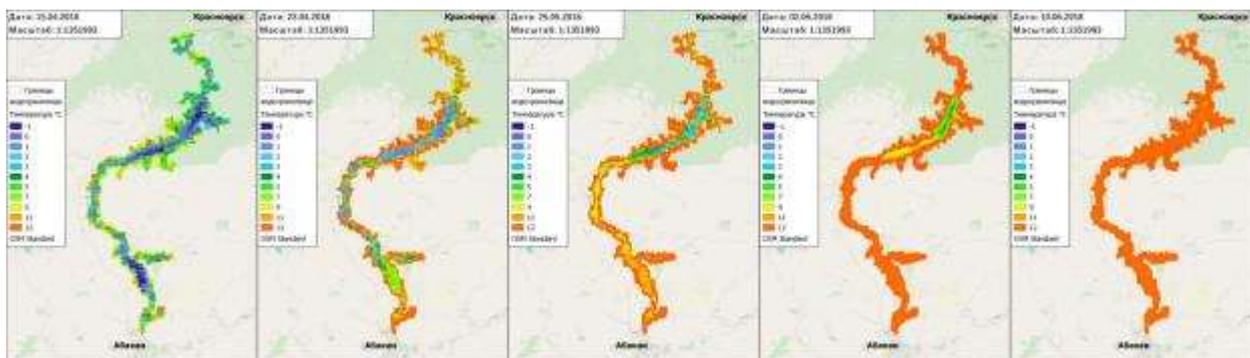


Рисунок 17. Движение температурного фронта с апреля по июнь в 2018 г.

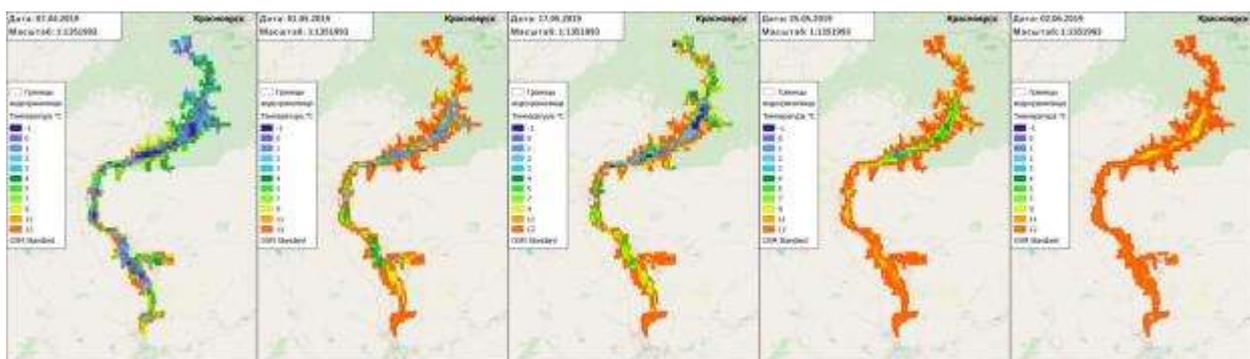


Рисунок 18. Движение температурного фронта с апреля по июнь в 2019 г.

Анализ результатов показывает, что каждый год в начале апреля в районе Усть-Абаканского плеса можно наблюдать появление фронтальной зоны, которая разделяет теплую и холодную воду. В 2016 эта зона появилась к 14 апреля. Из всех рассматриваемых годов, прогревание водохранилища раньше всего (в начале первой декады апреля) началось в 2017. В 2019 появление фронтальной зоны пришлось на вторую декаду апреля, позже по сравнению с остальными годами. Это связано с тем, что температура воздуха в 2019 была самой низкой, а в 2017 самой высокой.

В конце апреля заканчивается прогревание Краснотуранского плеса. В начале мая теплая вода начинает движение по узкой части водохранилища вытесняя холодную воду по поршневому принципу, в то же время, в области Щетинкинского плеса водохранилище все ещё покрыто льдом. В середине мая теплая вода продвинулась до с. Новоселово, водохранилище полностью освободилось ото льда. С конца мая по мере общего нагревания водоема термический бар в районе Приморского и Щетинкинского плёса движение термобара происходит по озерному типу, нагретая вода у берегов и движение теплой воды по течению смещают холодную воду к центру Щетинкинского плёса. Температура воды по всему водохранилищу выровнялась к 10 июня. Начало прогревания воды зависит от погодных условий это видно при сравнении температурных карт на начало апреля 2016-2019, однако во все рассмотренные годы прогревание воды завершается уже к 10 июня.

По полученным изображениям можно оценить скорость перемещения теплых вод. По узкой зоне до центра водохранилища фронтальный раздел продвигается в среднем на 161 км за 44 дня. Примерная оценка скорости перемещения фронта вдоль водохранилища без учета данных по скорости ветра равна 0,15 км/ч.

Сравнивая полученные данные с 2016 по 2019 годы, можно сказать, что начало движения теплой воды и завершение прогрева воды до температуры наибольшей плотности происходит примерно в один и тот же промежуток времени.

### **Ежедневные данные по температуре MODIS**

В отчетный период также выполнен первый этап работ по автоматизации обработки данных по температуре Красноярского водохранилища всего существующего массива данных MODIS – с 2000 по 2020 гг. В отличие от представленных выше результатов по температуре водохранилища в весенний период 2016-19 гг., основанных на 8-дневных данных MOD11A2, ежедневные данные позволяют отследить движение термобара более детально. Приведенные выше полученные оценки скорости движения термобара весной в Красноярском водохранилище составляют порядка 3,5 км/сутки, т.е. около 30 км за 8 дней. Очевидно, что в этих условиях ежесуточные данные гораздо информативнее 8-дневных.

Основной проблемой при работе с ежедневными данными является облачность – практически на каждой сцене она закрывает значительную часть водохранилища, возникают «пробелы данных». Другая особенность используемой информации связана с относительно низким пространственным разрешением данных по температуре MODIS – 1 км/пиксел. такое пространственное разрешение содержит ошибки в расчете температуры вдоль берегов водохранилища, а также в узких частях и заливах, когда часть пиксела попадает на участок прибрежной суши.

Для создания массива данных значений температуры поверхности водохранилища в период весеннего прогрева по данным Terra/Aqua MODIS LST MOD11A1/MYD11A1 в период с 2000 по 2020 гг. была написана программа, в результате работы которой на каждый год был сформирован файл со значениями температуры в расположенных вдоль осевой линии водохранилища (равноудаленной от берегов) точках наблюдений, с шагом 500 метров. Т.к. ширина Красноярского водохранилища меняется от нескольких сотен метров до 6-7 километров, часть этих точек на узких участках водохранилища (где в пиксель размером 1 км частично попадает суша) может содержать некорректные данные. Однако такие точки могут быть отфильтрованы, а по остальным может быть выполнен пространственно-временной анализ перемещения термобара.

Также был проведен сравнительный анализ данных по температуре MODIS с данными температуры, вычисленной по данным инфракрасного канала спутника Landsat-8, которые имеют пространственное разрешение 100 м. Снимки Landsat-8 могут быть использованы для анализа одномоментного пространственного распределения температуры воды в водохранилище, но частота съемки не дает возможности их использования для анализа данных по времени. На рисунке 19 представлены результаты расчетов температуры воды в Красноярском водохранилище по данным Landsat-8.

Коэффициент корреляции между данными по температуре воды MODIS и Landsat-8 для разных точек водохранилища находился в пределах 0,8 - 0,9.

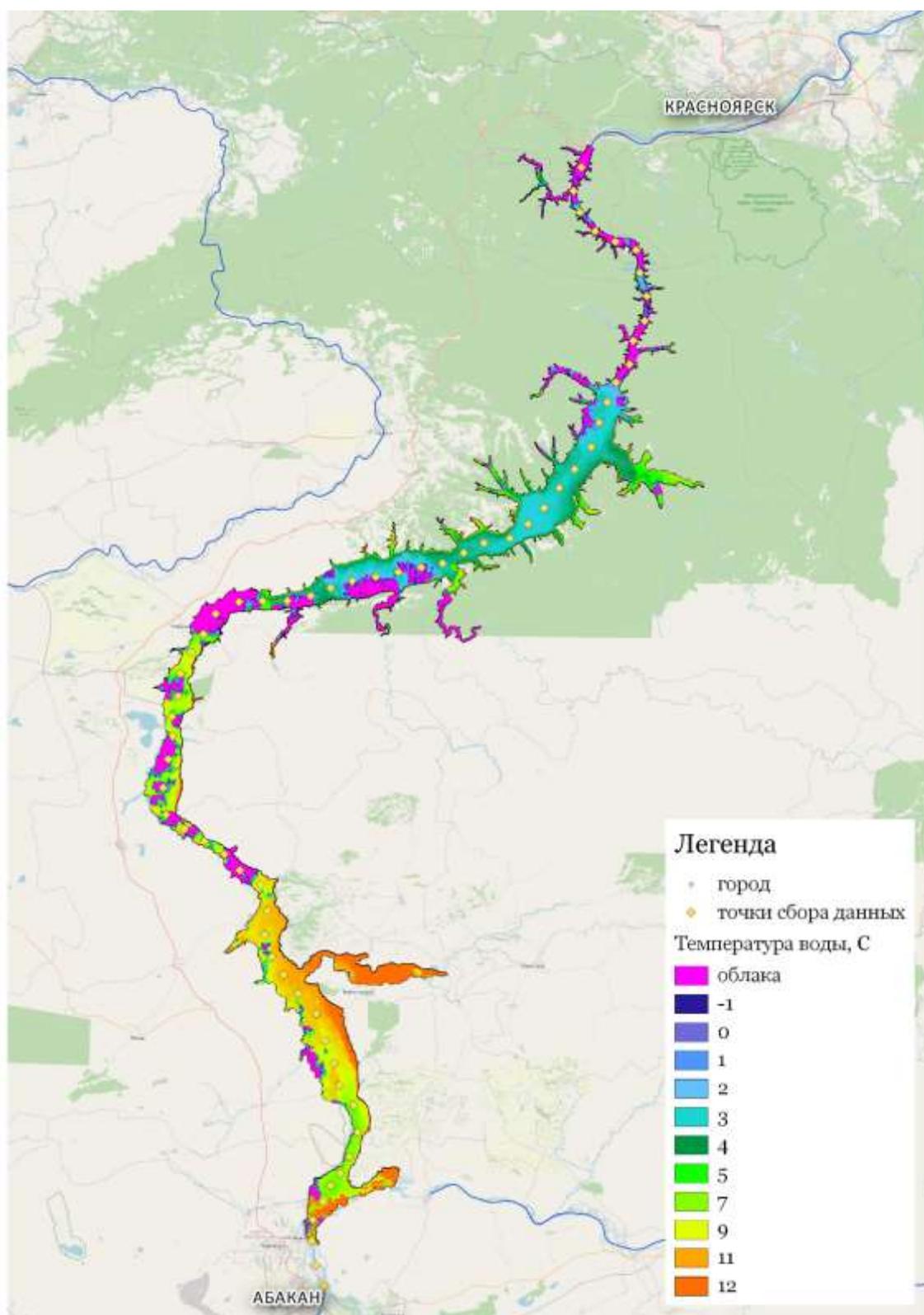


Рисунок 19 – Температура воды в водохранилище 19.05.2017 по данным Landsat-8.

*Основные публикации по разделу:*

- Bondarenko E.V., Gosteva A.A., Shaparev N.Y. Thermal bar studies in the Krasnoyarsk Reservoir based on remote sensing datasets // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862(5), 052039

## 1.8. Анализ температурных инверсий в периоды неблагоприятных метеоусловий в Красноярске в зимний период 2019-2020 гг. по данным реанализа

Предметом исследования в настоящей работе поиск взаимосвязи загрязнением атмосферы г. Красноярска взвешенными частицами и температурной инверсией – увеличением температуры с высотой в приземном слое атмосферы. Исследования проводятся на основе данных реанализа метеорологической модели NASA GFS (Global Forecast System) по температуре воздуха на разных высотах атмосферы и результатов измерений концентраций взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> в системе мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН, сведений об официально объявленных Росгидрометом (Среднесибирский УГМС) периодах неблагоприятных метеоусловий (НМУ) в г. Красноярске.

Температурные инверсии возникают в связи с тем, что в приземном слое атмосферы на разных высотах располагаются слои большей или меньшей толщины, в которых убывание температуры очень сильно замедляется, прекращается или наоборот вместо убывания температуры с высотой происходит её увеличение. Их свойствами являются высота нижней и верхней границы, вертикальная мощность (толщина слоя) и интенсивность (величина инверсии). Температурные инверсии делят на 3 типа: приземные (нижняя граница расположена на уровне земли), приподнятые (нижняя граница расположена на некоторой высоте от поверхности) и инверсии свободной атмосферы (высота может сильно различаться).

По данным Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края в г. Красноярске с января 2019 года по февраль 2020 года было установлено 8 периодов НМУ: в 2019 году – с 8 по 13 февраля, с 26 по 28 ноября, с 5 по 6 декабря, с 23 по 24 декабря и с 27 по 30 декабря; в 2020 году – с 10 по 13 января, с 14 по 18 февраля и с 25 по 27 февраля. Эти периоды характеризуются низкой скоростью ветра и повышенными значениями взвешенных в воздухе твердых частиц (PM), относительно предельно допустимой среднесуточной концентрации, равной 0,035 мг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 1 представлено изображение района исследования, а именно, г. Красноярск и прилегающие окрестности. Желтыми треугольниками обозначены 17 наземных постов экологического мониторинга сети ФИЦ КНЦ СО РАН, красным цветом приведены две ячейки, соответствующие регулярной сетки модели прогноза погоды NASA GFS.

Модель GFS – это система численного прогнозирования погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и вариационный анализ, выполняемые Национальной метеорологической службой США (NWS). Данная модель является совокупностью четырех отдельных моделей: атмосферы, океана, суши/почвы и морского льда. Это одна из самых известных мировых метеорологических моделей. Глобальный анализ данных и прогнозирование осуществляется 4 раза в сутки. Прогноз погоды доступен вплоть до 16 дней впе-

ред [8]. С января 2015 года горизонтальное разрешение данных модели GFS составляет 0.25 градуса (около 25 км). В данной работе использовались фактические данные анализа температуры воздуха на уровне поверхности земли, а также на высотах 750 и 1500 м.

Результаты проведенного исследования состоят в следующем. Был сформирован и проанализирован архив данных за период с 1 января 2019 года по 30 апреля 2020 года, содержащий информацию о температуре воздуха на уровне поверхности и высотах 750 и 1500 метров, усредненные среднесуточные концентрации частиц PM2.5 и информацию о скорости ветра для города Красноярска. На рисунке 1 представлены вариации концентрации PM2.5 и скорости ветра над городом Красноярском в период с 1 ноября 2019 года по 29 февраля 2020 года.

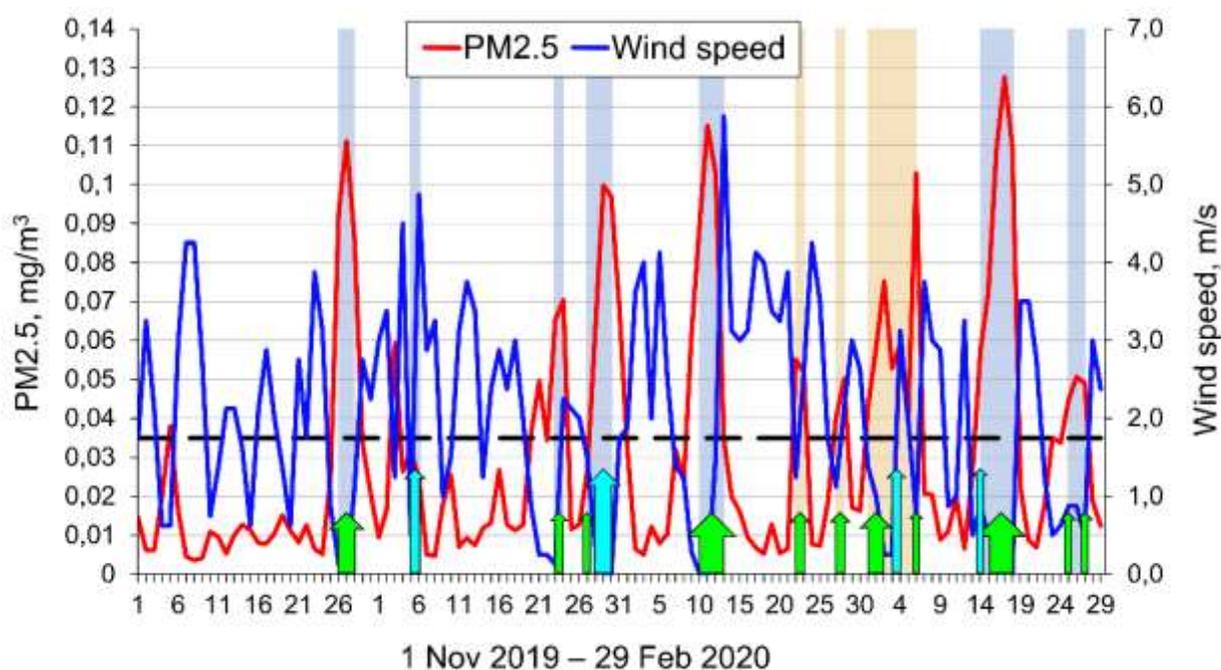


Рисунок 20 – Изменения среднесуточных значений концентрации PM2.5 и скорости ветра в городе Красноярске зимний период 2019-2020 года. Пунктирной линией обозначено значение среднесуточной предельно допустимой концентрации PM2.5, равной 0.035 мг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 20 вертикальные полосы голубого цвета обозначают официальные периоды НМУ в Красноярске, а оранжевые вертикальные полосы обозначают выявленные на основе анализа данных периоды вне диапазонов объявленных НМУ, когда среднесуточные концентрации PM2.5 значительно превышали предельно допустимую концентрацию, равную 0.035 мг/м<sup>3</sup>. На ось абсцисс нанесены стрелки: зеленые стрелки обозначают периоды, когда присутствовала приземная или приподнятая температурная инверсия; голубые стрелки обозначают периоды, когда присутствовала мощная инверсия. Здесь на рисунке на себя обращают внимание три особенности. Во-первых, связь значений среднесуточной концентрации PM2.5 и скорости ветра. Всегда, когда значения концентрации PM2.5 значи-

тельно превышали предельно допустимое значение, скорость ветра была крайне низкой или отсутствовала. Во-вторых, во все периоды, когда значения концентрации PM2.5 значительно превышали предельно допустимое значение, наблюдались температурные инверсии над городом. В-третьих, помимо официальных режимов неблагоприятных метеоусловий, характеризующихся повышенными значениями концентрации PM2.5, в период с 1 ноября 2019 года по 29 февраля 2020 года были выявлены еще 3 периода с похожим характером метеоусловий и уровнем загрязнения воздуха.

В таблице 2 представлены результаты анализа атмосферы города Красноярск в зимний период 2019-2020 гг. по полученным данным.

Таблица 2. Данные о состоянии атмосферы г. Красноярск в зимний период 2019-2020 гг.

Дата	PM2.5, мг/м <sup>3</sup>	Скорость ветра, м/с	Температурная инверсия
1-5 янв. 2019 г.	0,029-0,175	0,125-2,75	Все дни. Приземная или приподнятая
11-13 янв.2019 г.	0,048-0,073	0,875-1,125	12 и 13 января. Приземная или приподнятая
23-25 янв.2019 г.	0,057-0,106	0-0,75; 2,4 – 25 янв.	24 и 25 января. Приземная или приподнятая
08-13 фев. 2019 г.	0,064-0,165	0,25-0,8 11,625 – 13 фев.	Все дни. Приземная или приподнятая
26-28 ноя. 2019 г.	0,085-0,111	0-0,125	26 и 27 ноября. Приземная или приподнятая
05-06 дек. 2019 г.	0,025-0,032	0,5; 4,9 – 6 дек.	Все дни. Мощная
23-24 дек.2019 г.	0,065-0,07	0,125-2,25	Все дни. Приземная или приподнятая
27-30 дек.2019 г.	0,026-0,099	0-1,5	Все дни. Мощная
10-13 янв.2020 г.	0,035-0,115	0-1,5; 5,9 – 13 янв.	Все дни. Приземная или приподнятая
22-23 янв.2020 г.	0,052-0,055	1,25-2,6	Все дни. Приземная или приподнятая
27-28 янв.2020 г.	0,04-0,05	1,125-2,125	Все дни. Приземная или приподнятая
31 янв.- 06 фев.2020 г.	0,039-0,075	0,25-3,125	Все дни. 31 января, 1, 2, 5, 6 февраля приземная или приподнятая. 3 и 4 февраля мощная
14-18 фев.2020 г.	0,057-0,127	0-0,87	Все дни. Приземная или приподнятая
25-27 фев.2020 г.	0,045-0,05	0,5-0,87	Все дни. Приземная или приподнятая

В таблице восемь периодов из четырнадцати являются официальными периодами неблагоприятных метеоусловий в городе. Остальные шесть периодов – выявлены в процессе анализа данных. Все представленные периоды характеризуются среднесуточными значениями концентрации PM<sub>2.5</sub>, превышающими предельно допустимую концентрацию, а также низкой скоростью ветра в городе и присутствием температурных инверсий. В четырех случаях скорость ветра резко увеличивалась в последний день периода, при этом значение концентрации PM<sub>2.5</sub> в этот день значительно падали. Преобладающий тип обнаруженных инверсий – приземная или приподнятая. В период с 5 по 6 декабря 2019 года среднесуточное значение концентрации PM<sub>2.5</sub> в городе не превышало среднесуточное значение предельно допустимой концентрации.

Таким образом, в результате проведенной работы была показана связь между высокими значениями среднесуточной концентрации PM<sub>2.5</sub> и скоростью ветра в Красноярске. Выявлено присутствие температурных инверсий в периоды неблагоприятных метеорологических условий, обнаружены дополнительные шесть периодов, когда среднесуточные значения концентрации PM<sub>2.5</sub> значительно превышали предельно допустимое значение, помимо официальных восьми периодов неблагоприятных метеоусловий. Преобладающий тип выявленных температурных инверсий – приземная или приподнятая. Анализ метеоданных высокого пространственного разрешения, например по модели GFS, способствует решению задач, связанных с изучением нижнего слоя атмосферы и его загрязнения, а также может сыграть важную роль в более точном выявлении периодов НМУ и их прогнозировании.

*Основные публикации по разделу:*

- Dergunov A., Yakubailik O. Analysis of temperature inversions during periods of adverse weather conditions in Krasnoyarsk in the winter period of 2019-2020 // E3S Web of Conferences, 2020, 223, 03021.

#### 1.9. Приборно-измерительное обеспечение для оценки загрязнения атмосферы взвешенными частицами

Твердые частицы относятся к наиболее распространенным загрязняющим веществам, поступающим в атмосферный воздух городов в основном в результате выбросов предприятий теплоэнергетики и автотранспорта. Наиболее опасной для здоровья является мелкая фракция – мелкодисперсная пыль PM<sub>2.5</sub> (взвешенные частицы размером до 2,5 мкм), однако в настоящее время в г. Красноярске мониторинг этого показателя официальными структурами недостаточно развит. Краевая система наблюдений за состоянием

окружающей имеет очень ограниченное число датчиков, измеряющих концентрации PM2.5.

Системы мониторинга состояния загрязнения атмосферного воздуха в настоящее время создаются и внедряются во многих городах мира как за рубежом, так и в России. Одним из последних трендов стало внедрение веб-ориентированных решений, основанных на распределённой сети относительно дешёвых датчиков. В ИВМ СО РАН также ведутся исследования и разработки в этом направлении.

В связи с тем, что в настоящее время ряд китайских компаний (PLANTOWER, и проч.) недавно освоил производство относительно дешёвых датчиков PM2.5 (~20\$), которые обеспечивают проведение измерений с хорошей точностью, стало возможным создание систем мониторинга на их основе. Себестоимость готового прибора, который обеспечивает регулярное измерение и передачу данных на сервер сбора, составляет всего несколько тысяч рублей, при этом погрешность измерений не превышает 10%. Это позволяет говорить о потенциальной возможности развертывания/установки достаточно большого количества устройств в городе (десятки – сотни). В результате может быть создана уникальная научно-исследовательская сеть наблюдений за загрязнением атмосферы мелкодисперсным аэрозолем (PM2.5). Такая сеть позволит выявлять проблемные участки и моменты времени в пространственно-временном распределении загрязнений, может стать хорошей «исследовательской основой» для последующего детального анализа сертифицированными приборами, соответствующими экологическими организациями.

В рамках настоящего проекта были выполнены проектирование и разработка устройства для регистрации концентраций PM2.5. В его основе – доступные на рынке электронные компоненты. Системной основой прибора стал микроконтроллер Arduino – электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки устройств, которая пользуется огромной популярностью во всем мире благодаря удобству и простоте языка программирования, а также открытой архитектуре и программному коду.

Было выполнено программирование микроконтроллера на языке Wiring (упрощенная версия C++), в среде разработки Arduino IDE. Для создания прототипа прибора для измерения концентраций PM2.5 использовались: плата Arduino Nano 3.0, модуль сотовой связи GSM SIM800L, дисплей OLED SSD1306, линейный стабилизатор AMS1117 на 3.3в, преобразователь логических уровней, блок питания. Основным элементом созданного устройства является модуль PMS7003 – универсальный цифровой датчик для измерения концентрации взвешенных частиц в воздухе компании Plantower, в основе работы которого лежит измерение рассеивания лазерного излучения на взвешенных частицах.

Предусмотрено несколько режимов работы устройства с разными периодами отображения и передачи данных на сервер – (время обновления экрана/передачи данных): 5s/off, 5s/20s, 5s/20m, 20m/20m. В режимах с большим периодом ожидания между измерениями выполняется временное выключение внутреннего вентилятора датчика пыли для экономии его ресурса работы.

Использован ряд open source библиотек для программирования устройства: Agenda – для реализации планировщика задач, SSD1306Ascii – для работы с OLED дисплеем на контроллере SSD1306, TinyGSM – для передачи данных через сотовую сеть. На основе программного кода от Martin Falatic была разработана собственная библиотека для получения данных с датчика PMS7003.

Разработанное устройство находится в опытной эксплуатации (рисунок 21).



Рисунок 21 – Прибор для измерения концентрации взвешенных частиц PM2.5 в воздухе.

Для сбора и обработки данных о загрязнении воздуха взвешенными частицами используется сервис SensorCollector геопортала ИВМ СО РАН. API сервиса построено на основе REST подхода, запросы передаются HTTP методами GET/POST/DELETE с параметрами. Например, передача текущих значений показателей выполняется следующим запросом:

```
http://gis.krasn.ru/sc/api/1.0/projects/<project_id>/values/send?  
key=<key>&site=<site_id>&<values>, где:
```

- *key* – ключ пользователя для доступа к сервису;
- *project\_id* – идентификатор проекта, в рамках которого собираются данные;
- *site\_id* – идентификатор площадки, на которой размещен датчик;

- *values* – значения показателей передаются отдельными параметрами в виде: `<code>=<value>&...<code>=<value>`, где `code` – код показателя в системе, `value` – его численное значение.

В текущей версии прибора реализована передача значений PM1, PM2.5, PM10 на сервер. В дальнейшем список показателей планируется расширить, добавив общее количество взвешенных частиц в единице объема, температуру, влажность, атмосферное давление.

### **Модификация прибора для установки на квадрокоптер**

Второй разработкой стало создание модифицированной облегченной версии прибора, предназначенной для установки в составе навесного оборудования на квадрокоптер. Такое решение может использоваться в качестве ключевого компонента мобильной системы мониторинга, которая предоставляет возможность получение данных о распределении концентрации примесей в атмосфере на разных высотах, а также выполнение измерений в труднодоступных местах. Развитие технологий зондирования с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволит не только получить значительный объем качественных данных для исследований, но и позволит проводить валидацию данных на новом уровне.

Для решения поставленной задачи была выполнена разработка прототипа прибора для оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью на базе популярной модели квадрокоптера DJI Phantom 3 (рисунок 22). Основные характеристики БПЛА: рама – 350 мм, вес – 1280г, скорость подъема – до 5м/с, горизонтальная скорость – до 15 м/с, высота полета – до 6000 м, время полёта – до 23 мин. Квадрокоптер поддерживает как ручное управление полетом с радиопульта, так и интеллектуальные режимы полета по заданному маршруту.



Рисунок 22 – Внешний вид прибора для измерения характеристик атмосферы на базе квадрокоптера и его отдельных элементов.

Аппаратное обеспечение разработанного прибора построено на базе платы WeMos D1 Mini. Это платформа для разработки устройств на основе WiFi модуля Ai-thinker ESP-12E со встроенным микроконтроллером Espressif ESP8266 и микросхемой flash-памяти 4Мб. Для микроконтроллера была разработана внутренняя микропрограмма на языке Wiring в среде Arduino IDE.

В качестве измеряющего элемента для определения концентрации взвешенных частиц в воздухе выбран успешно себя зарекомендовавший модуль PMS7003 – универсальный цифровой датчик компании Plantower. В основе работы датчика лежит измерение рассеивания лазерного излучения на взвешенных частицах. Текущие метеоусловия (атмосферное давление, температура и влажность) регистрируются с помощью цифрового датчика на основе чипа Bosch BME280. Для определения географических координат и высоты использован GPS модуль с керамической антенной U-blox NEO-6M. Текущий режим работы и показания датчиков выводятся на OLED дисплее. Сохранение данных выполняется в CSV формате на карту памяти microSD с заданным периодом. Для настройки прибора и выбора режимов работы используется веб-интерфейс, который доступен при подключении по сети Wi-Fi.

На этапе предварительного исследования устройство собиралось и отлаживалось на макетной плате, в дальнейшем прототип был собран в компактном корпусе с креплением к

подвесу квадрокоптера и питанием от его основного аккумулятора. Размер устройства (без модуля крепления): 76x76x30мм, вес: 115 г.

Таким образом, на основе доступных комплектующих собран прототип прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью PM1, PM2.5, PM10, а также давления, влажности и температуры. Размещение его на БПЛА позволяет выполнять измерения на разных высотах и в труднодоступных местах. Замеры выполняются с заданным периодом, при этом сохраняется привязка данных к географическим координатам, высоте и времени. Устройство находится в опытной эксплуатации, выполнено несколько успешных тестовых полетов.

*Основные публикации по разделу:*

1. Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A., Tokarev, A.V. WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(3), с. 243-249.
- Токарев А.В. Приборно-измерительное обеспечение для оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью на базе БПЛА // Решетневские чтения, 2018, т. 1., с. 376-378.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ (ГЕОПОРТАЛОВ) МОНИТОРИНГА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ.

### 2.1. Информационно-вычислительное обеспечение задач оперативного мониторинга параметров природной среды

В течение отчетного периода создан новый тематический раздел геопортала ИВМ СО РАН (<http://gis.krasn.ru/sc/>) с коллекцией данных оперативного мониторинга. На данный момент в системе реализован сбор оперативных данных с нескольких источников и созданы следующие разделы (рисунок 23):

- Подсистема мониторинга атмосферного воздуха КВИАС КГБУ «ЦРМПиООС».
- Данные системы мониторинга ФГБУ «Среднесибирское УГМС».
- Данные гидрологических наблюдений в Красноярском крае.
- Климатические данные GSOD на территорию Красноярского края.
- и др.

Ведется сбор и загружен архив данных об атмосферном воздухе из Краевой ведомственной информационно-аналитической системы о состоянии окружающей среды Красноярского края (КВИАС).

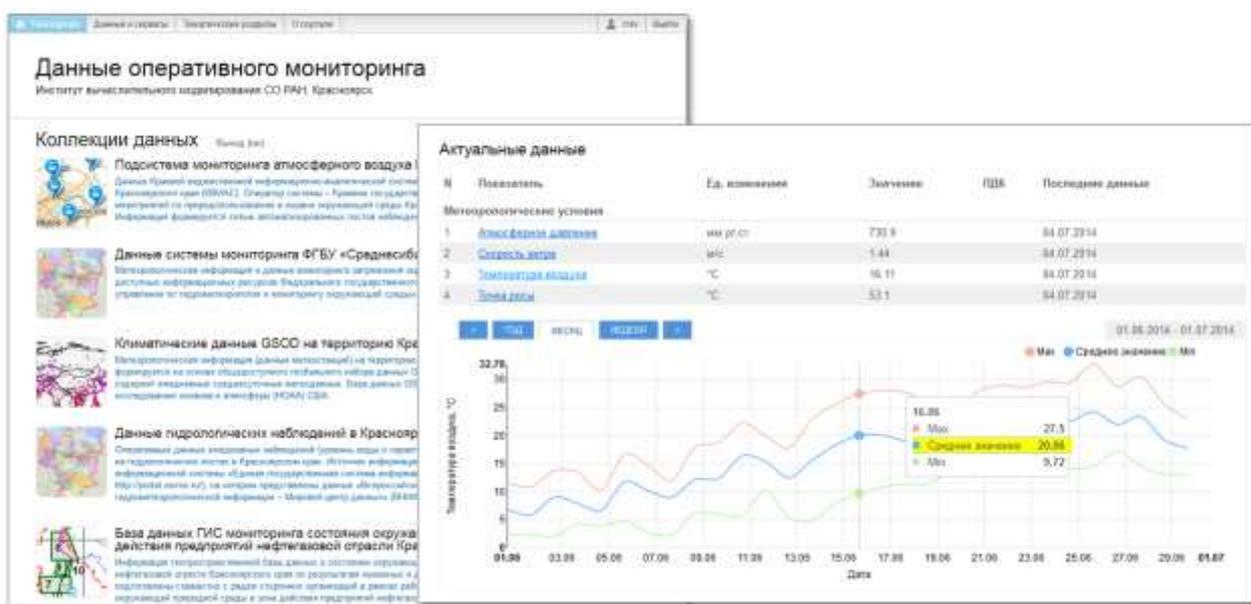


Рисунок 23 – Раздел с данными оперативного мониторинга геопортала ИВМ СО РАН.

Для загрузки данных с сайта КВИАС подготовлен программный модуль для обработки и преобразования входных данных, обеспечивающий периодическую загрузку данных наблюдений от этой системы через веб-сервис. Веб-сервис предоставляет доступ к данным в JSON-формате и содержит три раздела информации: посты наблюдения и их координаты, список показателей (загрязняющие вещества и метеоданные), значение показателей с привязкой ко времени.

Была выполнена загрузка архива данных наблюдений с 2009 по 2017 год. Импорт этих данных в фоновом процессе на сервере геопортала занял несколько дней. После импорта архива данные загружаются с периодом раз в час. Данные передвижных лабораторий загружаются раз в несколько дней. При возникновении проблем импорта с удаленного веб-сервиса разработанное программное обеспечение автоматически находит дату последних полученных данных и формирует запрос для загрузки новых данных.

Сформирован архив оперативных данных ежедневных наблюдений (уровень воды и характеристики его изменения, температура воды и воздуха) на гидрологических постах (пункты стационарных гидрологических наблюдений, прикрепленные к гидрологическим станциям) в Красноярском крае. Этот архив сформирован на основе следующих данных:

- Данные автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО, <https://gmvo.skniivh.ru>).
- Портал федеральной межведомственной информационной системы «Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане» (<http://portal.esimo.ru/>).

Раздел «Данные системы мониторинга ФГБУ «Среднесибирское УГМС» формируются на основе сайта ФГБУ Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (<http://meteo.krasnoyarsk.ru/>). Данные собираются по следующим показателям: атмосферное давление, влажность, направление ветра, скорость ветра, температура воздуха. Архив ведется с начала 2013 года.

Из дополнительных особенностей разработанного программного обеспечения для импорта данных наблюдений с различных ресурсов стоит отметить:

- автоматический импорт данных с внешних веб-сервисов;
- загрузка архива данных порциями, для уменьшения нагрузки на удаленный сервер;
- оповещение по электронной почте об ошибках импорта данных (такие ошибки чаще всего связаны с недоступностью удаленного сервиса, из-за проблем каналов связи);
- ведение лог-файла с отчетом об этапах импорта;

- при любом изменении числа показателей, их характеристик и постов наблюдений система информирует об этом администратора.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubailik O. Backbone mapping resources, services and applications for information support of regional management // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(2.2), pp. 103-110.
- Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., Yakubailik O.E. Geoinformation technologies and software for operational assessment of air pollution // CEUR Workshop Proceedings, 2019, 2534, pp. 109-113.

## 2.2. Сервисы геопортала для обработки и визуализации меняющихся во времени геопространственных данных

В течение отчетного периода выполнялись исследования и разработки, направление на создание технологий, инструментов и сервисов для работы с меняющимися во времени геопространственными данными, т.е. данными, которые содержат время как одно из измерений. В системах оперативного мониторинга подобные «многомерные» данные возникают регулярно, но, к сожалению, к настоящему времени не выработано единых правил, стандартов для хранения и операций с такого рода информацией.

Рассматривались важные частные случаи меняющихся во времени геопространственных данных, например, данные для постоянной во времени геометрии объектов с изменяющейся атрибутивной информацией, данные на регулярных сетках (например, поле температуры). Изменяемая во времени информация может быть представлена как в отдельных файлах, так и в атрибутике одного файла, если это не противоречит ограничениям используемого формата геопространственных данных.

Программная реализация средств для обработки и визуализации данных рассматриваемого типа выполнялась на основе технологической платформы геопортала ИВМ СО РАН. Был модернизирован ряд его программных блоков и библиотек; в геопортал добавлены 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.

Реализованы три режима представления данных, имеющих параметр времени:

- Режим с поддержкой стандартов Консорциума открытых геопространственных данных (OGC) для просмотра данных в соответствии со спецификацией WMS Time. Стандарт OGC WMS Time поддерживает атрибут TIME в запросах GetMap для слоев, которые

правильно настроены и содержат в исходных данных поле времени. При указании в параметре запроса времени в формате ISO-8601 выполняется фильтрация по значению этого поля. Такой режим позволяет работать с ресурсами геопортала через стандартный картографический веб-интерфейс с инструментами навигации по времени, а также позволяет подключать ресурсы геопортала по WMS протоколу из стороннего программного обеспечения, имеющего инструменты для работы с временным измерением.

- Второй режим позволяет в одном ресурсе осуществлять навигацию по архиву растровых и векторных файлов, каждый из которых содержит информацию на заданный момент времени. Имена таких файлов должны иметь общий формат, содержащий точку времени для каждого файла. Для таких ресурсов формируется шаблон имени файлов, которой в дальнейшем позволяет выполнять навигацию по файлам с помощью картографического веб-интерфейса. Для такого режима можно настроить интервал времени данных, шаг времени для инструментов навигации, начальный интервал и значение по умолчанию. Такой режим позволяет просматривать архивы данных ДЗЗ на выбранную территорию или, например, карты температур на основе данных глобальной модели прогнозов погоды GFS (Global Forecast System)..
- Третий режим позволяет выполнять навигацию по полям атрибутивной таблицы, каждое из которых содержит данные на заданный момент времени. Количество полей и их название задает оператор. Данный режим существенно экономит дисковое пространство, т.к. пространственные данные не дублируются по сравнению с первым режимом. Но при таком формате данные не доступны через стандарты OGC.

Новые инструменты позволяют существенно улучшить возможности геопортала при работе с данными имеющими временное измерения, а у пользователя появляются дополнительные возможности для анализа данных наблюдения, распределенных по времени и дополнительные возможности при работе с набором данных ДДЗ за выбранный период времени. На рисунке 24 представлен пример веб-интерфейса картографического веб-приложения с температурой поверхности земли по модели GFS с шагом 6 часов за 13 октября 2018 года.

*Основные публикации по разделу:*

- Kadochnikov A., Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O. Software tools for web mapping systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 516(1), 012007.
- Kadochnikov A.A. Experience in the development a regional geoportals for the Krasnoyarsk region // InterCarto, InterGIS, 2020, 26, pp. 203-214

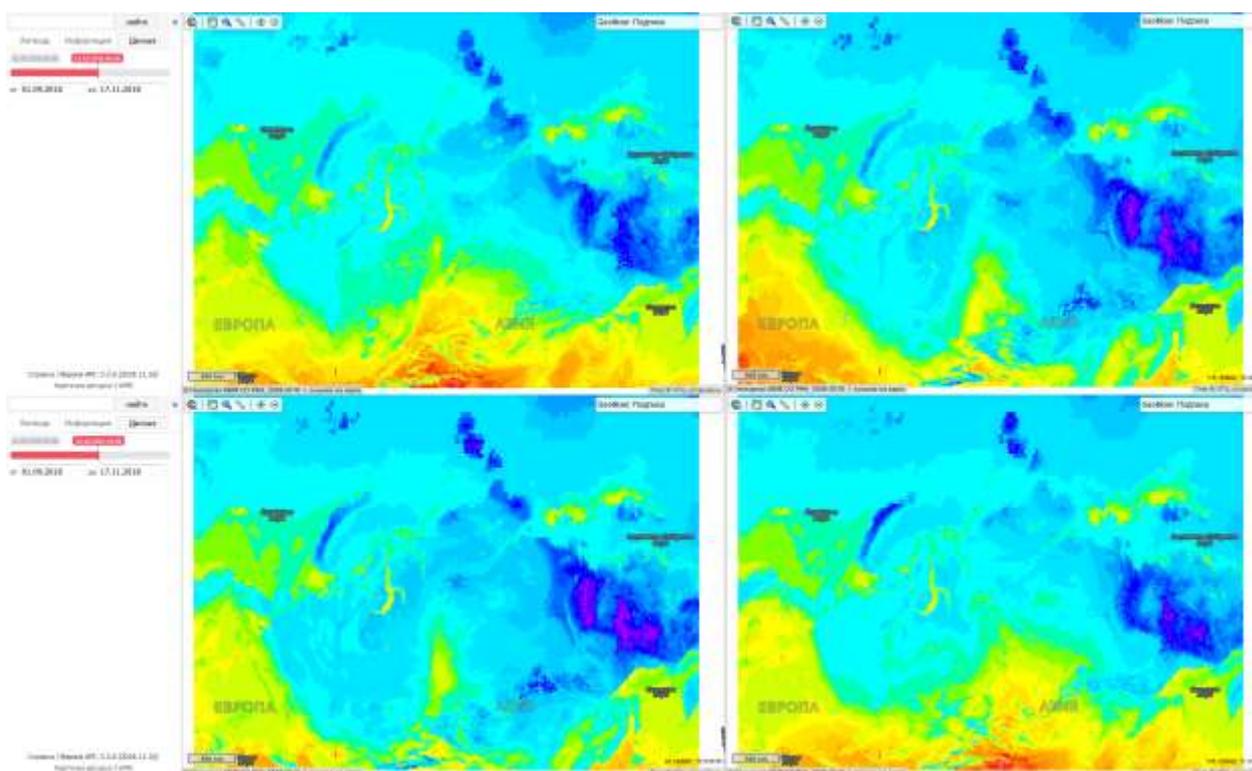


Рисунок 24 – Веб-интерфейс картографического веб-приложения с примером карты температуры поверхности Земли.

### 2.3. Редактор стилового оформления слоев и карт геопортала

Были выполнены работы по модернизации программного обеспечения для создания и редактирования стилового оформления тематических карт в веб-интерфейсе. Разработанный новый редактор формирует XML-описание стилового оформления слоев и карт геопортала, сохраняет его в каталоге ресурсов. Ранее эта задача решалась с помощью отдельного windows-приложения «ГеоЭкспресс». Реализованное новое решение значительно упрощает процесс настройки параметров представления пространственных данных на геопортале.

Реализация выполнена в концепции одностраничного веб-приложения (single-page application, SPA). Используется единственный HTML-документ – как оболочка для всех веб-страниц, с организацией взаимодействия с пользователем через динамически подгружаемые HTML, CSS, JavaScript посредством AJAX. Все визуальные элементы интерфейса конструируются прямо в браузере с помощью JavaScript путем манипуляций с DOM-структурой документа. Разработка выполнена с использованием клиентского JavaScript-фреймворка AngularJS. Фреймворк работает с HTML, содержащим дополнительные поль-

звательские атрибуты, которые описываются директивами, и связывает ввод или вывод области страницы с моделью, представляющей собой обычные переменные JavaScript. Значения этих переменных задаются вручную или извлекаются из статических или динамических JSON-данных. Библиотека обладает гибкостью в выборе шаблонов проектирования, можно выбрать модели MVC (Model-View-Controller) или MVVM (Model-View-ViewModel). Фреймворк адаптирует и расширяет традиционный HTML, чтобы обеспечить двустороннюю привязку данных для динамического контента, что позволяет автоматически синхронизировать модель и представление. В результате AngularJS уменьшает роль DOM-манипуляций и улучшает тестируемость.

Основное веб-приложение для настройки и управления геопорталом было доработано в части настройки стилового оформления. Разработаны редакторы стилей для слоев и карт в виде SPA-приложений, встроенных в основной пользовательский интерфейс (рисунок 25).

Редактор стиля слоев поддерживает несколько видов оформления: тематическая раскраска, круговые диаграммы, столбчатые диаграммы, накопительные гистограммы. Стилиевые классы определяются для диапазона масштабов и условиям на атрибуты пространственных объектов. Все изменения можно сразу посмотреть на карте во вкладке предварительного просмотра.

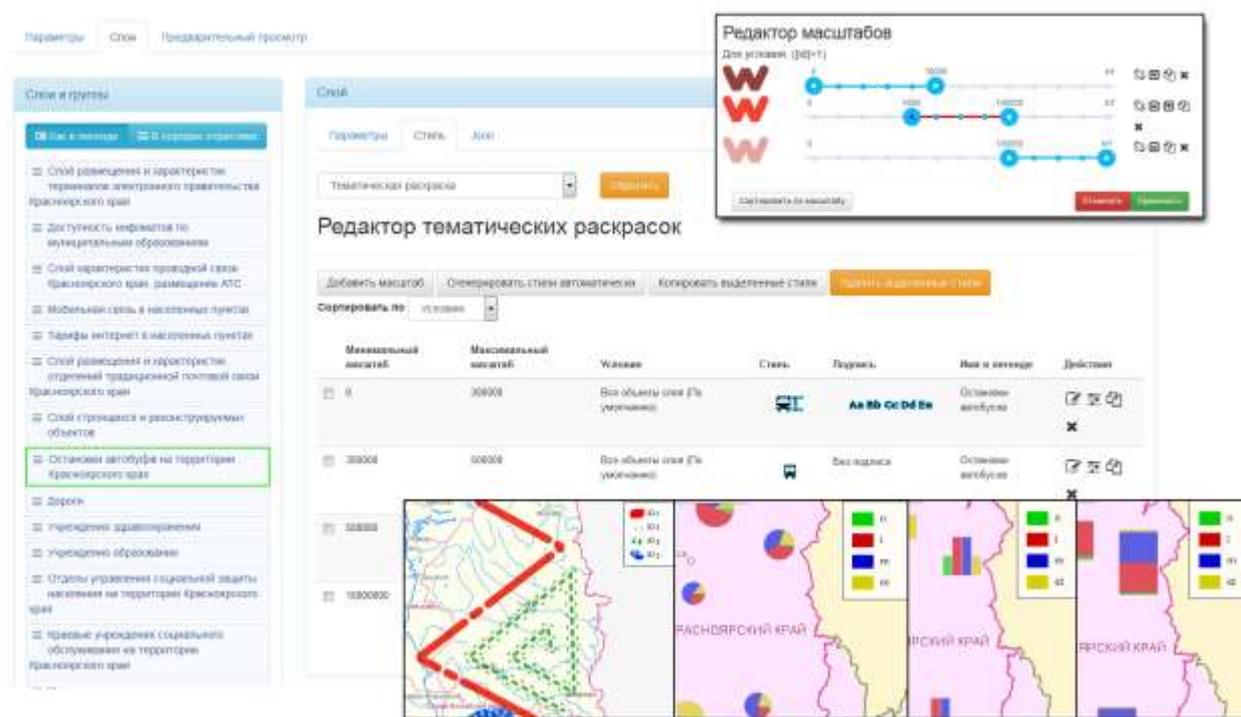


Рисунок 25 – Пользовательский интерфейс веб-редактора стилового оформления тематических карт на геопортале.

Для полноценного функционирования клиентской части редакторов стилей необходима серверная поддержка в виде набора служебных сервисов. Решаются такие задачи:

- Навигация по дереву ресурсов каталога для выбора слоя. Получение значений заданного атрибутивного поля слоя.
- Получение списка доступных библиотек символов и шрифтов, а также их элементов.
- Формирование изображения таблицы шрифтов и отдельных символов.
- Предварительный просмотр слоя или карты с текущими стилевыми настройками.
- Преобразование проекции для массива точек.

Реализованы все основные возможности windows-приложения «ГеоЭкспресс» на веб-платформе. Веб-приложение работает в тестовом режиме на геопортале ИВМ СО РАН.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubaylik, O.E. Kadochnikov, A.A. Tokarev, A.V. Web technologies for the geoinformation system of rapid assessment of atmospheric pollution and climatic conditions in Krasnoyarsk // CEUR Workshop Proceedings, 2017, 2033, pp. 44-48

#### 2.4. Разработка подсистемы импорта данных реанализа для геопортала ИВМ СО РАН

В некоторых системах дистанционного мониторинга возникает потребность в использовании метеорологических данных и создания удобных методов и инструментов, обеспечивающих возможность их совместного анализа с другими пространственными данными. Одним из важных классов метеоинформации являются данные реанализа. Это данные фактических измерений, прошедшие через физические модели, согласованные между собой и пересчитанные на регулярную пространственную и временную сетку. Одним из основных достоинств данных реанализа является наличие устойчивых, очищенных от ошибок многолетних рядов данных. Это позволяет использовать их при анализе как текущей спутниковой информации, так и долговременных архивов данных ДЗЗ.

Геопортал ИВМ СО РАН создавался как платформа для построения распределенных информационно-аналитических геоинформационных систем и сервисов. Одним из ее блоков является подсистема оперативного научно-исследовательского мониторинга за состоянием окружающей среды. В настоящее время уже созданы адаптеры для регулярного автоматического импорта данных из различных источников, в том числе:

- Ежедневные сводки глобального покрытия (GSOD) Национального климатического центра США с метеорологических станций всего мира, в том числе – с российских.

- Данные по загрязнению атмосферного воздуха из «Краевой системы наблюдений за состоянием окружающей среды» с автоматизированных постов наблюдений.
- Оперативные данные ежедневных наблюдений (уровень воды и характеристики его изменения, температура воды и воздуха) на гидрологических постах в Красноярском крае из федеральной системы информации об обстановке в мировом океане ЕСИМО.
- Выборочная метеорологическая информация системы мониторинга ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (Росгидромет).

Добавление данных реанализа на геопортал существенно расширяет возможности платформы в части представления и анализа данных. Одним из этапов реализации этой задачи является разработка подсистемы регулярного получения данных. К ней можно сформулировать следующие требования: автоматизация процессов получения и обработки данных, ведение архива данных, поддержка нескольких источников данных, возможность регулярного отслеживания наличия обновлений, поддержка запросов к базе метео данных для получения как единовременных показателей, так и временных рядов.

На сегодняшний день в мире существует несколько основных глобальных численных моделей прогнозирования погоды: американская GFS, английская UKMet и европейская модель ECMWF. Global Forecast System – одна из широко используемых численных моделей прогноза погоды, созданная National Centers for Environmental Prediction (NCEP). GFS модель обновляется четыре раза в день (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC) и выдает прогнозы до 16 суток (на 384 часа). Данные формируются по регулярной сетке с несколькими пространственными разрешениями (0.25°, 0.5°, 1°) на весь земной шар. Исходные данные GFS находятся в открытом бесплатном доступе на американских серверах в формате GRIB2 за 7 последних дней (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>). Доступ к архиву за предыдущее время свободно предоставляет Национальный центр атмосферных исследований (NCAR) (<http://rda.ucar.edu/>).

На первом этапе был разработан прототип сервиса для автоматического импорта данных реанализа, который поддерживает работу с данными модели GFS из нескольких источников – серверов NCEP и NCAR. Реализация сервиса выполнялась на языке сценариев PHP 5 с использованием фреймворка Yii. Это высокоэффективный PHP-фреймворк для разработки веб-приложений реализующий парадигму MVC. Он основан на компонентной структуре и позволяет максимально применить концепцию повторного использования кода, существенно ускоряя процесс веб-разработки. Для обработки файлов формата GRIB использовалась специализированная утилита wgrib2, разработанной NOAA.

Обработка данных выполняется в несколько этапов:

- Загружается GRIB2 файл с пространственным разрешением  $0.25^\circ$  с данными реанализа (пример: gfs.0p25.2018010100.f000.grib2, 184 Мб).
- Из покрытия всего земного шара вырезается только область с Россией.
- Из 354 доступных показателей сохраняются: TMP, PRES, GUST, VIS, WEASD, SNOD, RH, DPT, SUNSD, PWAT, CWAT, ICEC, TSOIL, SOILW.
- Результат записывается в GRIB2 файле (~2 Мб), дополнительно генерируется JSON файл с метаданными.

Первичный архив ведется в файловой системе, с заданной структурой папок и правил наименования файлов (/YYYY-MM/gfs.YYYYMMDDHH.0p25.f000.grib2). Запуск процедуры импорта происходит по расписанию 4 раза в сутки из планировщика задач. Кроме этого, поддерживается ручной импорт из архива NCAR с указанием периода времени.

Возможности геопортала ИВМ СО РАН позволяют выполнять регистрацию внешних источников пространственных данных, в том числе и в формате GRIB2. После этого растровые слои можно использовать для создания тематических карт и анализа данных.

Для наглядной визуализации временных рядов по данным реанализа было создано тестовое приложение на платформе геопортала (рисунок 26). Пользовательский интерфейс содержит фильтры для выбора момента времени и одного из показателей, в результате отображается тематическая карта с подходящей цветовой палитрой. Поддерживаются пространственные запросы для выбора всех доступных показателей в конкретной точке карты.

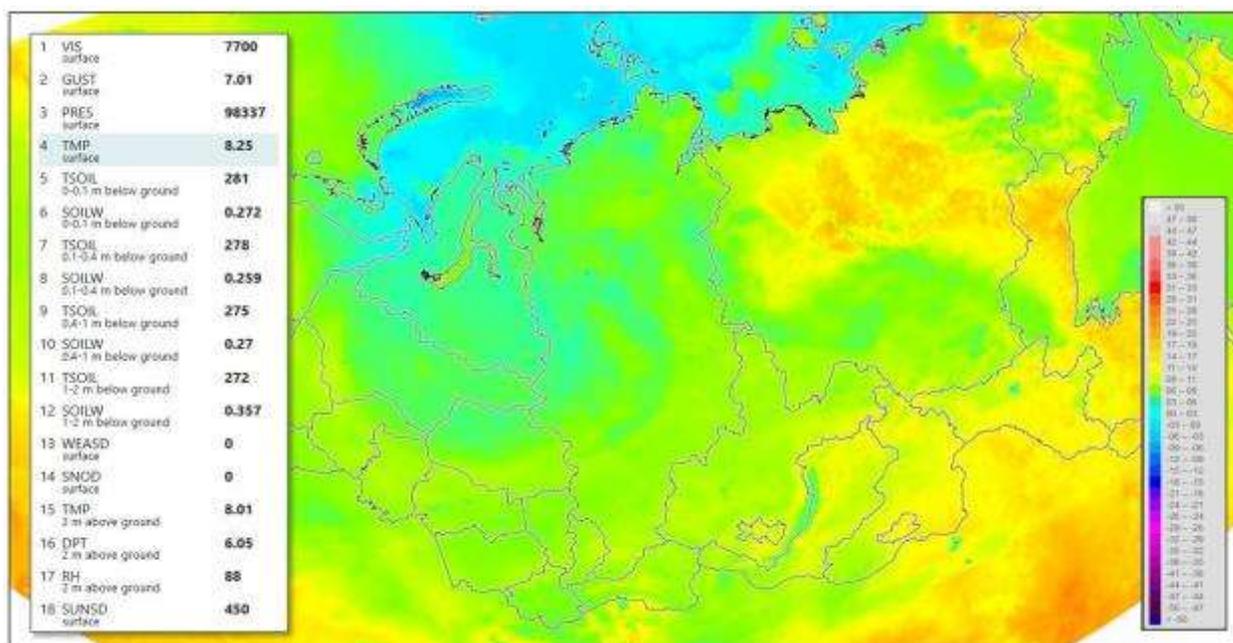


Рисунок 26 – Пример отображения температуры поверхности Земли на 01.08.2018.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubailik O.E., Yakubalik T.V. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 548(3), 032025.
- Kadochnikov A.A. Application of geoinformation technologies for arranging a satellite monitoring system // Geodezia i Kartografia, 2019, 80(1), pp. 110-118.

2.5. Сервисы для мониторинга атмосферного воздуха (в развитие [air.krasn.ru](http://air.krasn.ru)) /метеостанция, сбор данных/

В отчетном периоде была продолжена работа по поддержке и развитию системы сбора оперативной информации о состоянии атмосферного воздуха в городе Красноярск 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://gis.krasn.ru/sc/>), работающего на базе геопортала Института.

Осуществляется сбор данных измерений содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) и основных метеорологических параметров: температуры, влажности и давления с приборов Федерального исследовательского центра «КНИЦ СО РАН». Сбор данных осуществляется на протяжении двух лет и в декабре 2019 был запущен сайт с оперативной информацией по состоянию атмосферного воздуха, доступный по адресу <http://air.krasn.ru/>.

На рисунке 27 представлена диаграмма посещаемости сайта. С момента первого запуска и до окончания зимы в 2020 году наблюдался интерес к сайту со стороны обычных пользователей. В основном это связано с установкой неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) в городе Красноярск. Периоды режима НМУ в основном объявлялись в зимние месяцы. В 2020 году предупреждения были объявлены 10.01, 14.02, 17.02, 25.02, 27.04, 16.11, 27.11 (<http://www.admkrsk.ru/citytoday/ecology/Pages/NMU.aspx>).



Рисунок 27 Посещаемость сайта проекта air.krasn.ru.

Определение периода действия и категории (режима) НМУ находится в ведении Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в обязанность которой входит оповещение предприятий о наступлении и завершении периода НМУ и категории (режима) НМУ. В соответствии со статьей 19 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» № 96-ФЗ юридические лица, имеющие источники выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, при получении прогнозов НМУ обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух. На диаграмме посещаемости сайта проекта видно совпадение интереса со стороны пользователей к проекту в дни НМУ.

Начиная с первого сентября 2020 года оперативные данные с сайта ежедневно в будние дни транслирует одна из телекомпаний города Красноярск в рубрике после вечерних новостей. Однако это никак не отразилось на посещаемости сайта.

Недостатком существующей сети станций ФИЦ КНЦ СО РАН для дальнейших научных исследований является отсутствие метеорологических данных по ветру (скорость и направление). В связи с этим был организован сбор метеорологических данных, включающих данные о ветре. Была установлена и организован сбор данных с метеостанции DAVIS Vantage Pro2, купленной в конце 2019 года. Разработан комплекс новых модулей для сбора данных из различных открытых источников.

Для проведения Зимней универсиады 2019 в Красноярске была создана комплексная система ее метеорологического обеспечения, соответствующая требованиям международной федерации студенческого спорта (FISU), международных и общероссийских федера-

ций по зимним видам спорта, а также уровню проведения подобных мероприятий. Точное определение текущей погоды на трассах осуществлялось с 11 автоматических метеорологических станций (АМС) производства Vaisala. АМС комплектовались широким набором датчиков, включающие данные по ветру. Данные от АМС поступали в 10-минутном режиме в Центр сбора данных наблюдений, расположенный в Среднесибирском УГМС (<http://www.meteorf.ru/press/news/18967/>).

Удалось организовать сбор этих данных на сервер сбора данных наблюдений ИВМ СО РАН. Для этого было разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно получать метеоданные с этих станций. Данные можно получать только в онлайн режиме без возможности загрузить архив. В связи с этим был расширен набор инструментов системы для оперативного обнаружения проблем со сбором данных, т.к. при простое системы или отсутствия связи данные терялись. Доступ был организован к трем станциям с выносными модулями, что позволило получать метеорологическую информацию в 9 точках. Это станции на таких объектах, как Академия Биатлона, комплексы «Сопка» и «Радуга». Метеостанция в парке «Бобровый лог» на момент старта сбора данных уже не функционировала. Станция в кластере «Сопка» на данный момент также не работает. С остальных станции данные сохраняются. Данные собираются с шагом 10 минут.

Был организован сбор данных авиационных метеорологических кодов METAR (METeorological Aerodrome Report), используемых для обмена метеорологической информацией между метеорологическими подразделениями гражданской авиации. Изучена их структура, содержание, назначение и разработан программный модуль для сбора таких данных на территории Красноярского края и Хакасии. Сводки в коде METAR содержат данные о скорости и направлении ветра, дальности видимости, атмосферных явлениях, облачности, температуре воздуха, точке росы, атмосферном давлении. Сводки в коде METAR используются пилотами во время предполетной подготовки в метеорологической службе аэродрома вылета, а также могут использоваться при комплексном анализе данных по атмосферному воздуху в Красноярске. Регулярные наблюдения на аэродромах доступны по региональному аэро-навигационному соглашению с шагом в 30 минут.

В 2020 году была запущена сертифицированная метеостанция DAVIS Vantage Pro2, установленная на здании ИВМ СО РАН (рисунок 28). Была осуществлена ее настройка и ввод в эксплуатацию. На основе python библиотеки PyVantagePro, обеспечивающий низкоуровневый доступ к потоку данных, поступающих с консоли метеостанции (<https://pyvantagepro.readthedocs.io/>), разработан комплекс программ для сбора, настройки и калибровки данных. Необходимость в разработке возникла в связи с тем, что собственное программное обеспечение метеостанции работало только под операционной системой

Windows и не позволяло напрямую загружать данные в нашу систему. Данные формируются с шагом раз в 10 минут и загружаются в систему раз в час.

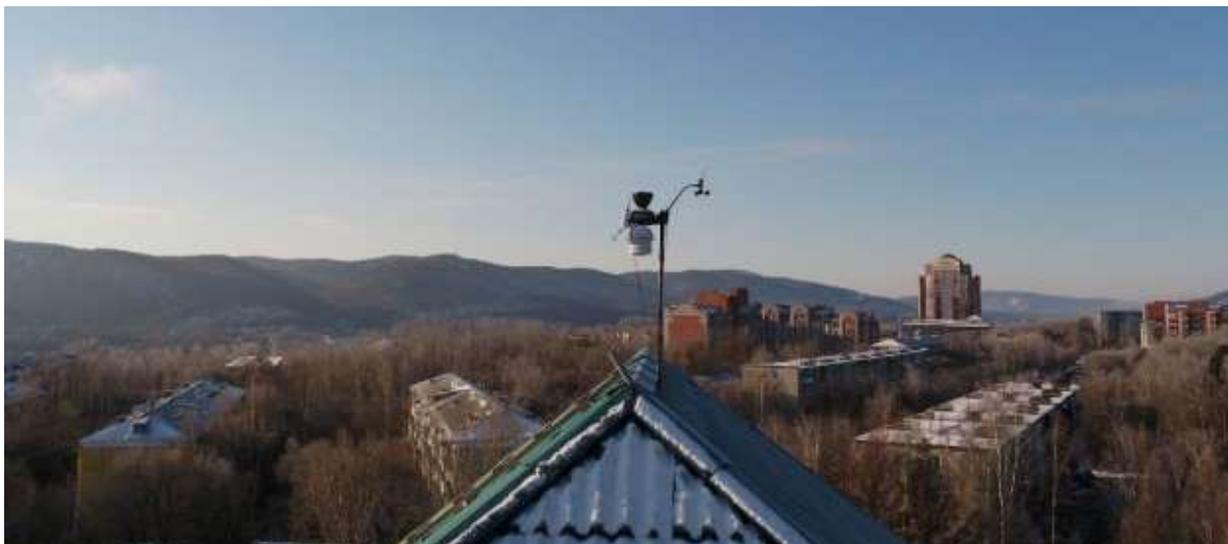


Рисунок 28 – Метеостанция на крыше ИВМ СО РАН.

Разработан модуль для сбора оперативных данных метеонаблюдений FM-12 IX SYNOP, включающих данные о ветре, температуре воздуха, видимость и др. Данные загружаются с портала ЕСИМО (межведомственная информационная система для доступа к ресурсам морских информационных систем и комплексного информационного обеспечения морской деятельности.). ЕСИМО разрабатывается в рамках Федеральной целевой программы «Мировой океан» Информация SYNOP собирается более чем 7600 пилотируемыми и автоматическими метеорологическими станциями и более чем 2500 подвижными станциями по всему миру и используется для прогнозирования погоды и климатической статистики. Данные собираются по метеостанциям на территории Красноярского края и соседних с ним регионам.

Дополнительно был разработан модуль для загрузки архивных данных метеонаблюдений по ряду метеостанций на территории Красноярского края за 20-ый век. Данные были загружены из системы NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI), которая хранит и предоставляет открытый доступ к одному из самых больших архивов экологических данных (<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/hourly>). Набор данных Integrated Surface Dataset (ISD) состоит из наблюдений за приземной погодой со всего мира с более чем 35 000 станций. Включенные параметры: качество воздуха, атмосферное давление, температура / точка росы атмосферы, атмосферные ветры, облака, осадки, приливы и многое другое. ISD содержит данные в цифровой базе в формате, в котором хранятся ежечасные, синоптические (3-часовые) и ежедневные наблюдения за погодой. Формат данных соответствует федеральным стандартам обработки информации (FIPS). ISD

предоставляет доступ к данным, которые можно использовать в широком диапазоне климатологических приложений. Загруженный архив содержит данные за разные промежутки времени по всем доступным метеостанциям на территории Красноярского края.

Для изучения влияния работы Красноярской ГЭС на атмосферный воздух в городе Красноярск разработан модуль для сбора данных, передаваемых Красноярской ГЭС, включая данные по температуре воды и объемам водосброса. Модуль работает в пассивном режиме и загружает данные в нашу систему сбора данных наблюдений по запросу сервиса со стороны Красноярской ГЭС.

В связи с возросшим количеством постоянных источников данных и объемом самих данных, возникла необходимость в развитии системы мониторинга загрузки и анализа ошибок в более удобном виде для оперативного принятия решений и исправления ошибок. А также для отслеживания объема поступающих данных в систему. Формируется ежедневный отчет по работе системы сбора. Предусмотрен механизм информирования оператора системы по электронной почте (рисунок 29). Был приобретен и запущен в эксплуатацию новый сервер для переноса на него базы данных наблюдений и всех сервисов сбора оперативных данных с сервера геопортала ИВМ СО РАН.

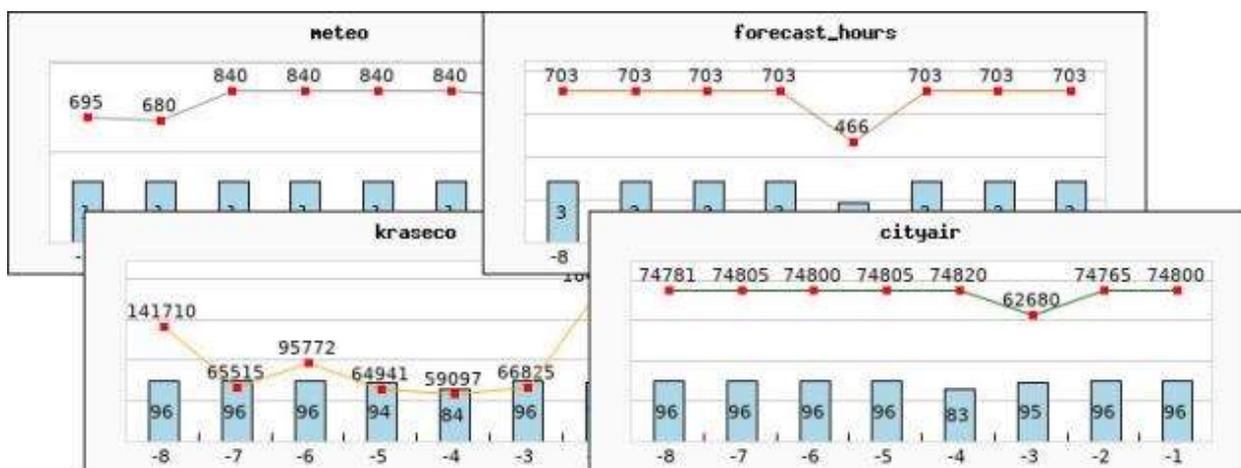


Рисунок 29 – Фрагмент отчета системы сбора данных.

Создан модуль для сбора официальных прогнозов погоды с федеральных и региональных ресурсов Служб по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для текущих задач, связанных с полетами беспилотных летательных аппаратов (БЛПА), выполняемых сотрудниками ФИЦ КНЦ СО РАН.

*Основные публикации по разделу:*

- Kadochnikov A.A., Yakubailik O.E. The FRC KSC SB RAS air monitoring system of Krasnoyarsk: Technological tools and preliminary results // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2020, 11560, 1156053.
- Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. Development of computational technologies and software for assessment of air pollution in Krasnoyarsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1), 012080.

## 2.6. Разработка информационно-аналитической системы для визуализации состояния атмосферы в г. Красноярске

Атмосферный воздух является важнейшим компонентом окружающей среды. Во время активной промышленной деятельности в атмосферу выбрасываются большие количества загрязняющих веществ, ухудшающие качество атмосферного воздуха как вблизи источника загрязнения, вызывая локальные экологические проблемы, так и влияющие на процессы в окружающей среде. По данным Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) в 2012 году от загрязнения воздуха во всем мире погибло около 7 млн. человек. Твердые частицы относятся к наиболее распространенным загрязняющим веществам, поступающим в атмосферный воздух городов в основном в результате выбросов предприятий теплоэнергетики и автотранспорта. Наиболее опасной для здоровья является мелкая фракция – частицы  $PM_{2.5}$  (частицы с диаметром менее 2,5 мкм) и  $PM_{10}$ .

Системы мониторинга состояния загрязнения атмосферного воздуха в настоящее время создаются и внедряются во многих городах мира как за рубежом, так и в России. В городе Красноярске мониторинг ведется рядом организаций федерального и региональных уровней, каждая из которых обладает собственными приборами, методиками, технологиями и системами сбора, хранения и обработки данных. В том числе:

- Краевая ведомственная информационно-аналитическая система о состоянии окружающей среды Красноярского края (КВИАС). По городу размещено 9 автоматизированных постов наблюдений, которые выполняют измерение массовых концентраций оксида и диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода,  $PM_{2.5}$ , формальдегида в атмосферном воздухе каждые 20 минут. Используется дорогостоящее сертифицированное оборудование, в том числе анализаторы пыли модели VAM-1020 (Met One Instruments Inc., США).
- Проект общественников «Красноярск.небо». На текущий момент размещено около 20 постов, используются недорогие приборы AirVisual с оптическими датчиками  $PM_{2.5}$ . Размещение приборов на балконах жилых домов вызывает вопросы по достоверности данных.

- На базе ФИЦ КНЦ СО РАН развивается автоматизированная информационная система мониторинга состояния атмосферного воздуха в г. Красноярске. В настоящее время сеть находится на этапе построения, пока размещено около 20 станций. Используются приборы CityAir, которые обеспечивают измерение содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) и основных метеорологических параметров: температуры, влажности и давления. Показатели измеряются и передаются каждую минуту на сервер сбора данных.

Блок оперативного научно-исследовательского мониторинга за состоянием окружающей среды на геопортале ИВМ СО РАН обеспечивает хранение, сбор и доступ к данным наблюдений. Собираемые данные автоматически приводятся к одним единицам измерения вычисляются усредненные значения на единой временной сетке. В настоящее время уже созданы программные модули для регулярного автоматического импорта из нескольких источников данных по загрязнению атмосферы.

Представляет интерес построение информационной системы, которая обеспечит наглядную визуализацию данных, поступающих из разных систем мониторинга. Для интегральной оценки степени загрязнения атмосферы перспективно использовать унифицированные показатели – индексы качества атмосферы AQI (Air Quality Index), Nowcast, Asian Nowcast, InstantAQI. На технологической платформе геопортала ИВМ СО РАН был разработан прототип такой информационно-аналитической системы. Основные разделы: таблица, карта, блок анализа, архив данных, справочная информация (рисунок 30).

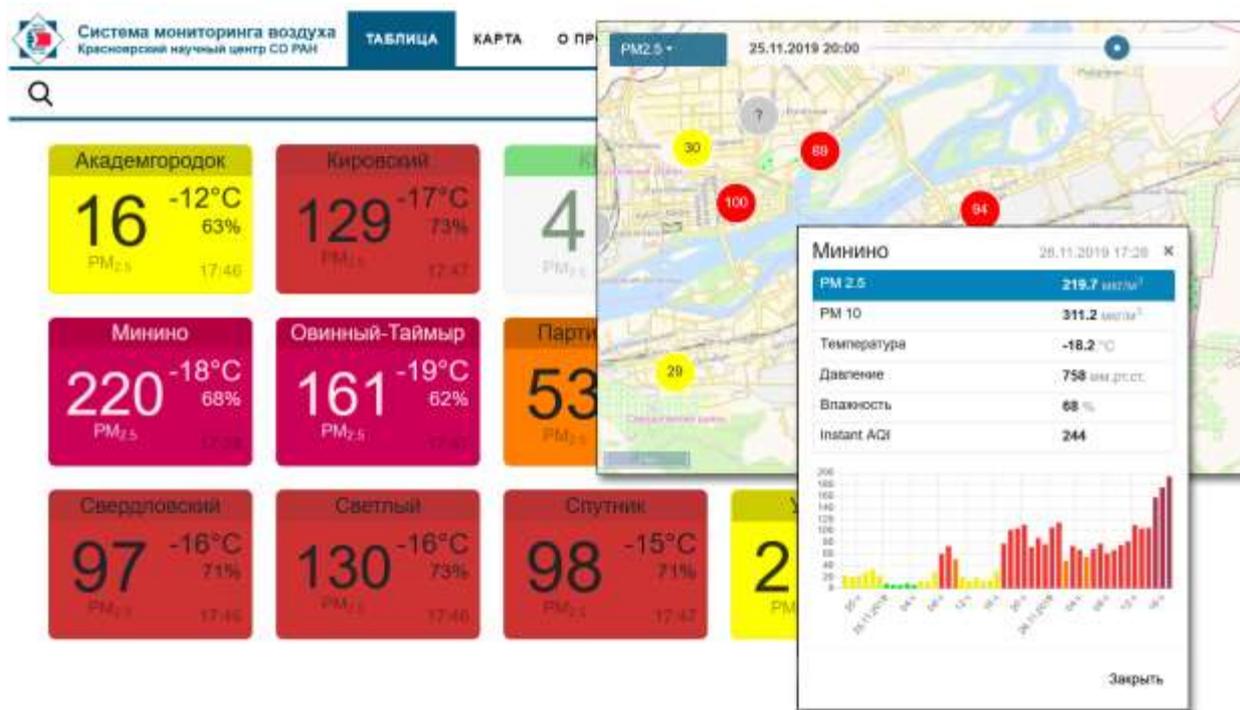


Рисунок 30 – Пользовательский интерфейс системы мониторинга воздуха.

Табличное представление постов мониторинга показано на рисунке 30 с левой стороны. Все посты отображаются в виде отдельных «карточек» с возможностью поиска по названию и сортировки. Карточка содержит актуальные данные по загрязнению воздуха и метеоинформации. Цветовая раскраска отражает степень опасности по шкале AQI. Выбрав отдельный пост пользователю открывается расширенное представление данных с динамикой изменения показателей за последние 2 суток.

Поддерживается отображение постов наблюдения на интерактивной карте г. Красноярска. На карте показывается текущее значение загрязнения в каждом пункте наблюдения и выполняется цветовая тематическая раскраска в зависимости от степени опасности. Форма пиктограммы поста наблюдения отражает принадлежность к источнику данных.

Разработанное программное обеспечение информационной системы обеспечивает анализ взаимосвязей в данных. Например, зависимостей концентраций загрязняющих веществ в атмосфере от метеорологических условий и сезонов года. Использование подобного инструмента должно упростить получение новых научных результатов. На технологической платформе геопортала был разработан действующий прототип набора таких информационно-аналитических сервисов, реализовано несколько программных модулей (рисунок 31):

1. *Влияние компонентов AQI.* Модуль предназначен для определения загрязняющих веществ, которые оказывают наибольшее влияние на индекс качества воздуха. Входными параметрами задается период времени, станция мониторинга (или город в целом) и компоненты AQI. Результат отображается в виде графика, на котором представлена динамика AQI и его отдельных компонентов от времени. Дополнительно можно показать периоды НМУ в городе.

2. *Роза ветров.* Для заданного поста мониторинга и период времени отображается роза ветров. На радиальной диаграмме строится повторяемость направлений ветра с разбиением на диапазоны по скоростям ветра и отдельно для штиля. На вспомогательном графике рисуется распределение повторяемости ветра по скоростям.

3. *Влияние метеорологических параметров на  $PM_{2.5}$ .* На графике совместно отображается динамика концентрации  $PM_{2.5}$ , температуры, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра. Можно выбрать отдельные метеорологические параметры, диапазон времени, пост наблюдения.

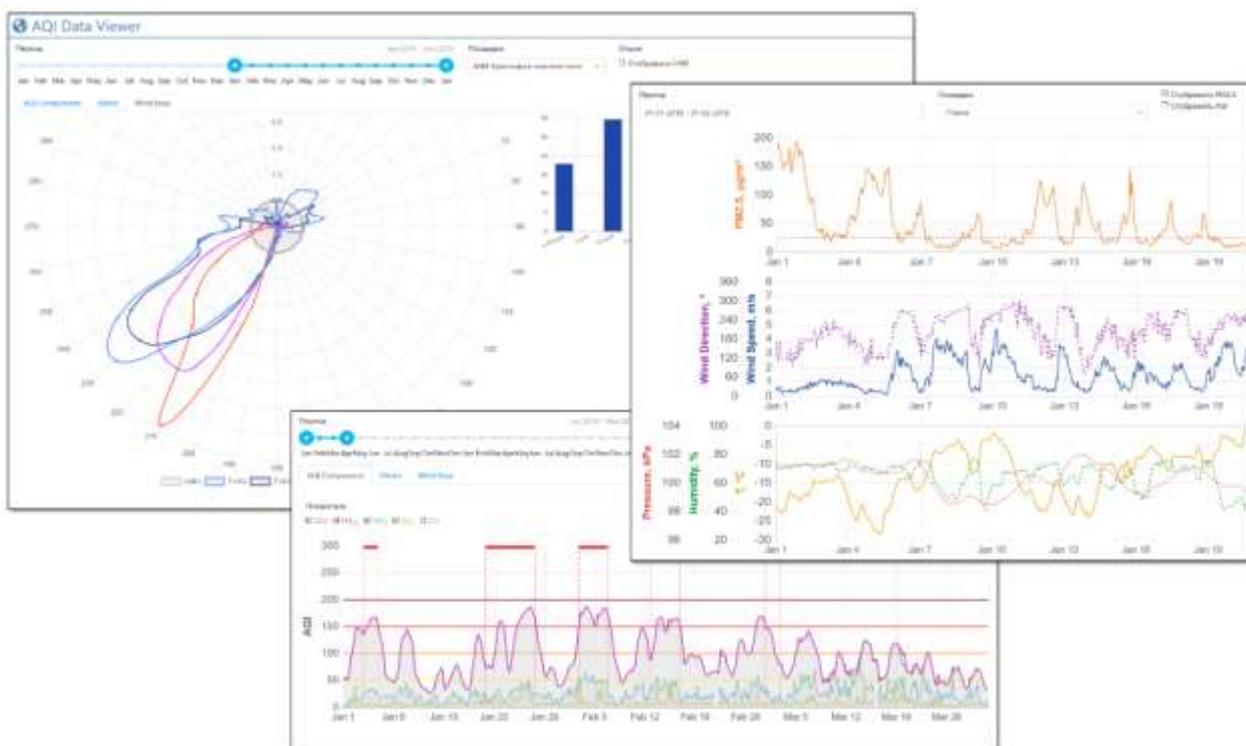


Рисунок 31 – Пользовательский интерфейс аналитических сервисов системы мониторинга.

Реализация выполнена в концепции одностраничного веб-приложения (single-page application, SPA). Используется адаптивная разметка страниц, оптимизированная как для настольных компьютеров, так и для экранов мобильных устройств. Разработка выполнена с использованием клиентского фреймворка Angular от компании Google на языке программирования TypeScript. Библиотека обладает гибкостью в выборе шаблонов проектирования, можно выбрать модели MVC (Model-View-Controller) или MVVM (Model-View-ViewModel). Используется библиотека Bootstrap для HTML- и CSS-шаблонов оформления элементов веб-форм, блоков навигации и прочих компонентов. Построение графиков и диаграмм выполнялось через библиотеку Chart.js. Выбранный подход позволяет разрабатывать интерактивные веб-приложения с высокой скоростью работы на десктопах и мобильных устройствах.

## Перспективы практического применения системы мониторинга воздуха

### *Краткая характеристика основных технических параметров*

Система мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленного города (Система) – это комплекс специального оборудования и программно-технологических средств для информационного обеспечения задач оперативного мониторинга окружающей среды. В его составе автоматические станции контроля загрязнения атмосферного воздуха,

специальные программные средства (встраиваемое ПО, база геопространственных данных экологического мониторинга, сервисы администрирования, веб-портал, подсистемы сбора данных со станций мониторинга и картографической веб-визуализации, адаптированный для настольных компьютеров и мобильных устройств пользовательский интерфейс) и серверное аппаратное обеспечение (сервера и система хранения данных).

#### *Области возможного использования*

Организация и проведение комплексного научно-исследовательского мониторинга, оценка пространственно-временных характеристик загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами в городах, населенных пунктах и промышленных районах.

#### *Степень готовности разработки к практическому применению*

Система работает в режиме опытной эксплуатации в г. Красноярске более двух лет, в ее составе функционирует 25 станций мониторинга. Опыт эксплуатации позволил доработать Систему с учетом замечаний ее пользователей. На данный момент она готова к широкому применению в сибирских промышленных городах и сельских поселениях, может быть использована в районах с резко континентальным климатом.

#### *Возможный технический и/или экономический эффект от внедрения*

Система ориентирована на формирование информационно-аналитической основы для научных исследований и разработок, направленных на решение задач улучшения экологической обстановки. Регистрируемая информация необходима для оценки экологической обстановки, способствует получению объективных результатов в решении задач моделирования распространения загрязнений на территории, и как следствие – принятию экологически и экономически обоснованных управленческих решений. Важным фактором внедрения Системы может стать ее социально-значимая роль – как инструмента для оперативного информирования жителей об экологической ситуации в интуитивно-доступном виде.

#### *Сравнительные характеристики с известными разработками*

Основной отличительной особенностью Системы является ее выбор в пользу относительно дешевых датчиков загрязнения воздуха, достоверность показаний которых обеспечивается их автоматизированной постоянной калибровкой на сертифицированных постах мониторинга воздуха, оснащенных дорогостоящими приборами. В результате появляется возможность развертывания на территории города сетей мониторинга с большим количеством датчиков, точности измерений которых можно доверять. Подобные решения до недавнего времени практически не применялись; лишь в последние несколько лет они стали набирать популярность за рубежом и в России. Используемое оборудование станций мониторинга – российского производства, сертифицированное Росстандартом, успешно

себя зарекомендовавшее в условиях эксплуатации при низких температурах вплоть до -40°C.

*Основные публикации по разделу:*

- Kadochnikov AA, Tokarev AV, Zavoruev VV and Yakubailik OE. Prototype of city environmental monitoring system based on geoportal technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537 (6), 062052.
- Zavoruev VV, Zavorueva EN, Kadochnikov AA, Tokarev AV, Yakubailik OE. Assessment of the possibility of using CityAir air monitoring station in environmental engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537 (6), 062053.
- Веб-сайт «Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» – <http://air.rasn.ru/>.

## 2.7. Пространственно-временной анализ загрязнения атмосферы Красноярска в период неблагоприятных метеоусловий

Предметом исследования в настоящей работе стала динамика загрязнения г. Красноярска взвешенными частицами. Был рассмотрен период времени с декабря 2018 г. по май 2019 г., для которого были проанализированы имеющиеся данные по уровню концентраций взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> в атмосфере Красноярска, полученные сетью научно-исследовательского экологического мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН. Особое внимание было уделено первой половине февраля, т.к. в этот период Среднесибирским УГМС был объявлен режим неблагоприятных метеоусловий (НМУ) – с 19:00 08 февраля 2019 г. по 19:00 13 февраля 2019 г.

Режим НМУ – краткосрочное особое сочетание метеорологических факторов, способствующих накоплению вредных (загрязняющих) веществ в приземном слое атмосферного воздуха. Юридические лица, имеющие источники выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, при объявлении режима НМУ обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

Данные мониторинга взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> за февраль показали превышение допустимых концентраций в период со 2 по 13 февраля, уровень которого в отдельные моменты составлял более 5 максимальных разовых ПДК (рисунок 32).

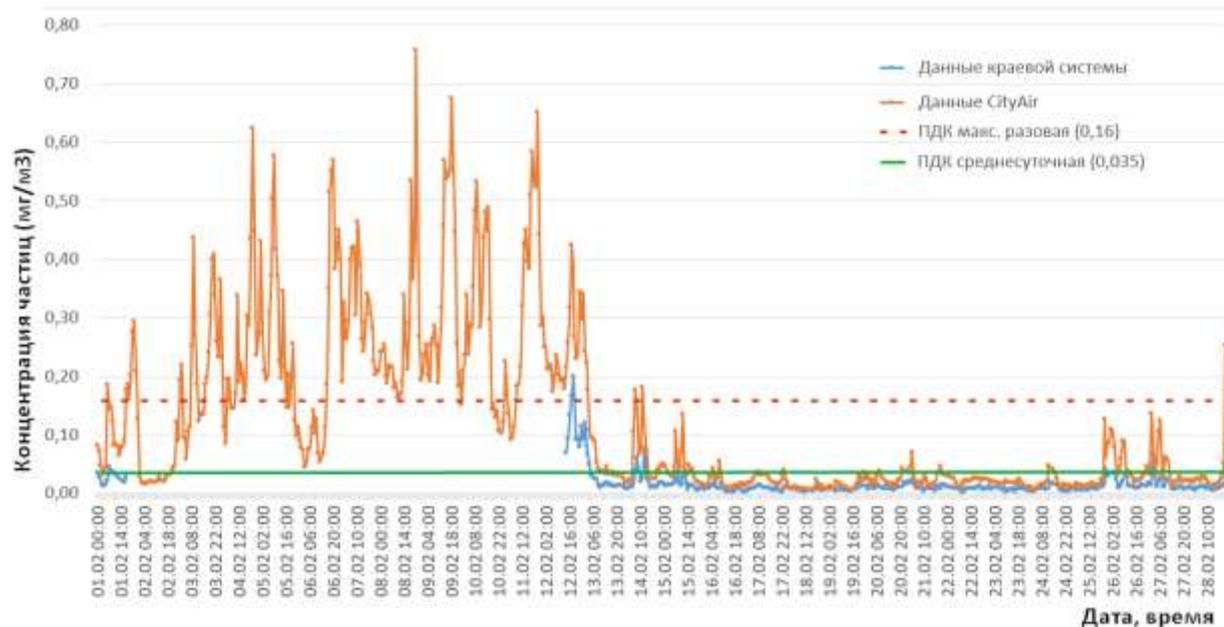


Рисунок 32 – Результаты измерений концентрации PM2.5 в феврале 2019 г. на посту мониторинга «Покровка-Красноярск».

Плотная сеть установленных датчиков концентраций PM2.5 ФИЦ КНЦ СО РАН позволила провести исследование пространственно-временного распространения смога по территории Красноярска в 1-й половине февраля 2019 г. Анализ полученных данных показал, что в данный период времени определяющим фактором образования смога над городом являлся дым печного отопления, возникавший в малоэтажной застройке частного сектора (Николаевка, Покровка) и в расположенных в непосредственной близости от города поселках (Солонцы, Дрокино, Минино). В это время наблюдались низкие температуры (около  $-30^{\circ}\text{C}$ ), которые способствовали интенсивному отоплению домов (преимущественно бурым углем), что, скорее всего, и стало основной причиной высоких концентраций PM2.5. Возникновение загрязнения на начальном этапе показано на рисунке 33. Детальный анализ зафиксированных скорости и направления ветра показал, что при характерных юго-западном/южном ветре со скоростью порядка 2-3 м/с за время от нескольких часов до полудня дым печного отопления поселков пригородной зоны почти полностью покрывает город. Очень важным фактором, влияющим на распространение загрязнения, является рельеф местности. Для загрязнения расположенных на относительно высоких участках местности микрорайонов города (Академгородок) необходимо порядка суток.

Обратный процесс – полная «очистка города» от уровня концентрации PM2.5 в несколько ПДК до абсолютно чистого состояния – был осуществлен 13.02.2019 при смене направления ветра на юго-западное, со скоростью 3-4 м/с за ориентировочно 6 часов.

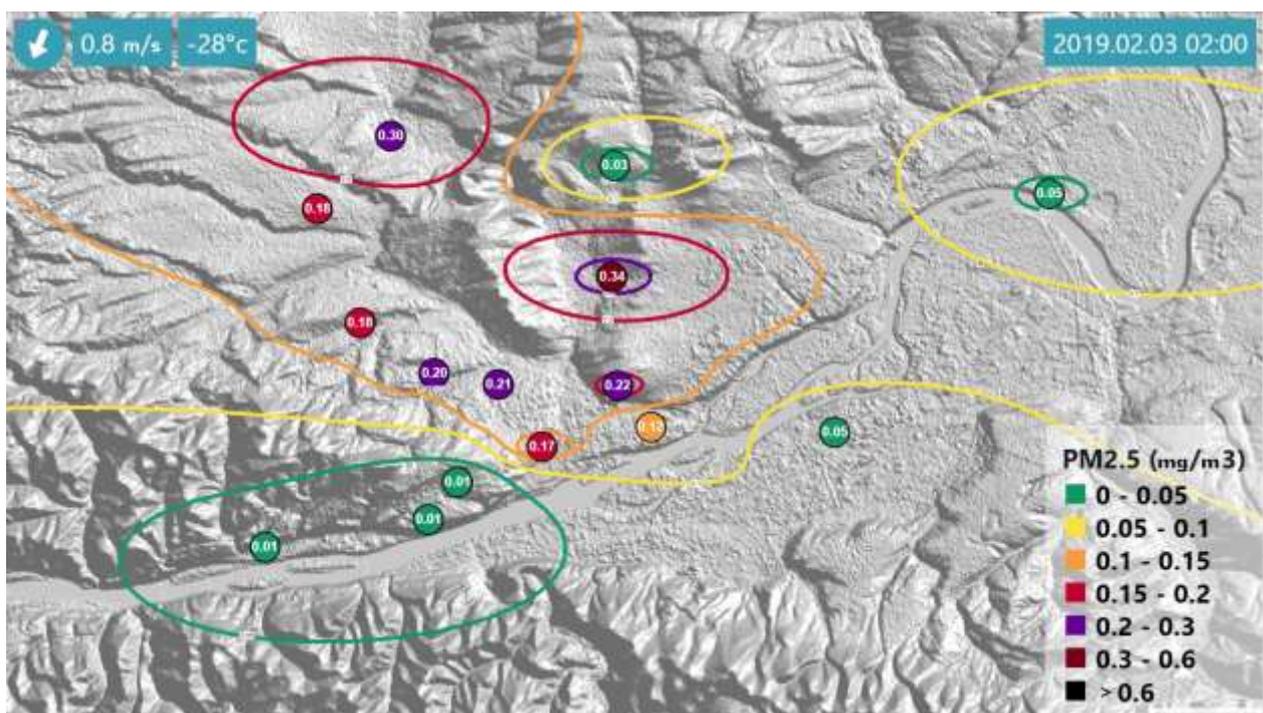


Рисунок 33 – Начало распространения смога на территорию Красноярска, обусловленное интенсивным печным отоплением в малоэтажной застройке в северной части города.

*Основные публикации по разделу:*

- Yakubailik O.E., Zavoruev, V.V., Malimonov M.I., Pushkarev A.A. Spatial analysis of air pollution in Krasnoyarsk // CEUR Workshop Proceedings, 2019, 2534, pp. 491-496.
- Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Concentration of particulate matter in the surface layer of the atmosphere of the village of Drokino (Krasnoyarsk territory) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062092.

## 2.8. Анализ влияния метеоусловий на концентрацию PM2.5 в приземном слое атмосферы г. Красноярска

Особенности рельефа г. Красноярска и местные климатические условия приводят к возникновению неблагоприятных метеорологических условий. В этой ситуации в атмосфере города увеличивается концентрация веществ, выбрасываемых стационарными промышленными предприятиями, автотранспортом и печами частных домов. Накопление взвешенных веществ в атмосфере приводит к возникновению смога над городом и ухудшению условий жизни населения. Красноярск входит в приоритетный список из 20 крупных городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы.

Блок научно-исследовательского мониторинга геопортала ИВМ СО РАН поддерживает сбор данных из внешних источников, хранение и агрегацию данных, автоматическое

вычисление производных показателей, выгрузку и представление данных через веб-интерфейс. Разработан программный адаптер для регулярной загрузки данных с постов наблюдения из системы КВИАС, что облегчает обработку и анализ данных мониторинга.

Для анализа использовались данные об уровне загрязнения атмосферы с автоматизированных постов наблюдения системы КВИАС за 2018-2019 годы. На рисунке 34 представлены среднесуточные значения концентрации  $PM_{2.5}$ , усредненные по всем постам наблюдений. Пунктирной линией обозначен среднесуточный предельно допустимый уровень концентрации (ПДКсс)  $PM_{2.5}$ , установленный ВОЗ. Видно, что критические значения возникают в основном с ноября по март и в июле.

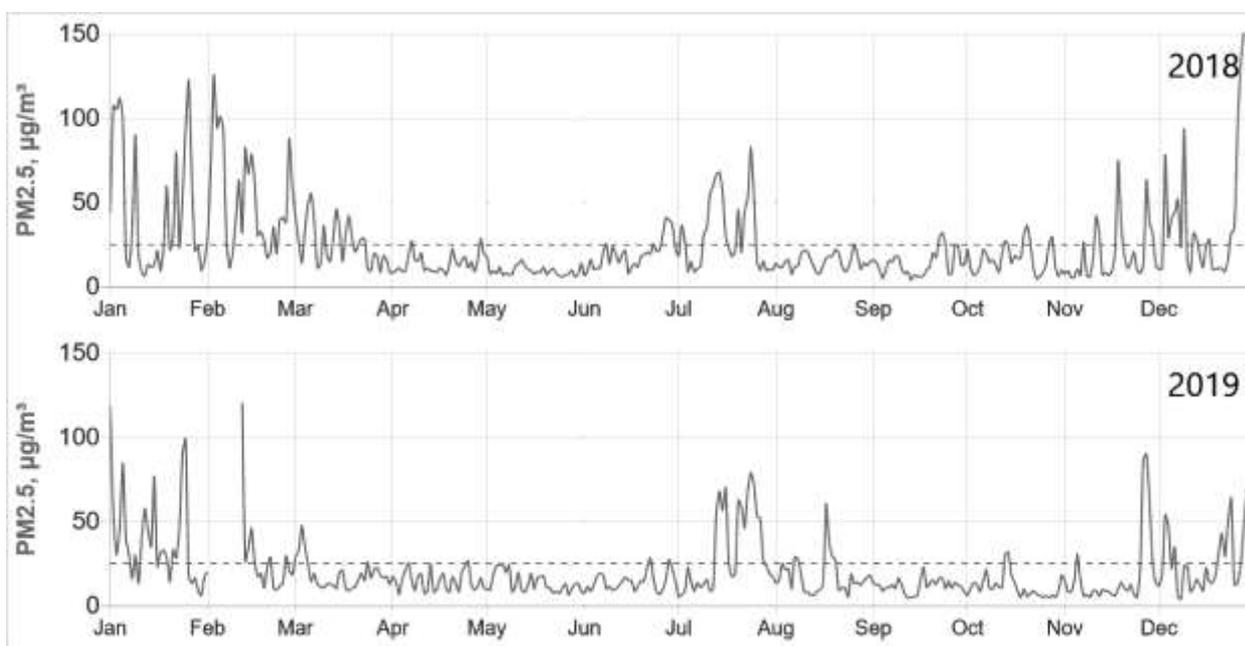


Рисунок 34 – Среднесуточные значения  $PM_{2.5}$ , усредненные по всем постам наблюдений.

В 2018 году среднегодовое значение  $PM_{2.5}$  составило  $25.3 \text{ мкг/м}^3$ , а в течение 110 дней (30%) было превышение ПДКсс, установленный ВОЗ. В 2019 году среднегодовое значение  $PM_{2.5}$  составило  $20.5 \text{ мкг/м}^3$ , а в течение 75 дней (20%) было превышение ПДКсс. Среднегодовые значения  $PM_{2.5}$  превышают нормативы ВОЗ, но остаются в пределах нормативов Российской Федерации.

Был выполнен статистический анализ зависимости величины  $PM_{2.5}$  от метеоусловий: скорости ветра, направления ветра, атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха.

На рисунках 35 и 36 представлены данные за 2018 год, отражающие статистическую зависимость значений концентрации  $PM_{2.5}$  (ось ординат) и метеоусловий (ось абсцисс).

Штриховой линией обозначен уровень ПДК максимально разовый. Каждая точка показывает значение показателя на посту наблюдения за период в 20 мин.

Анализ статистических данных показывает, что критические значения  $PM_{2.5}$  устанавливаются в основном при комплексе следующих обстоятельств:

- Скорости ветра менее 1 м/с.
- При юго-восточном направлении ветра.
- Температурах воздуха от  $-20^{\circ}C$  до  $-30^{\circ}C$ .
- Давлении атмосферы от 100 до 102.7 кПа.
- Относительной влажности в диапазоне 70-80%.

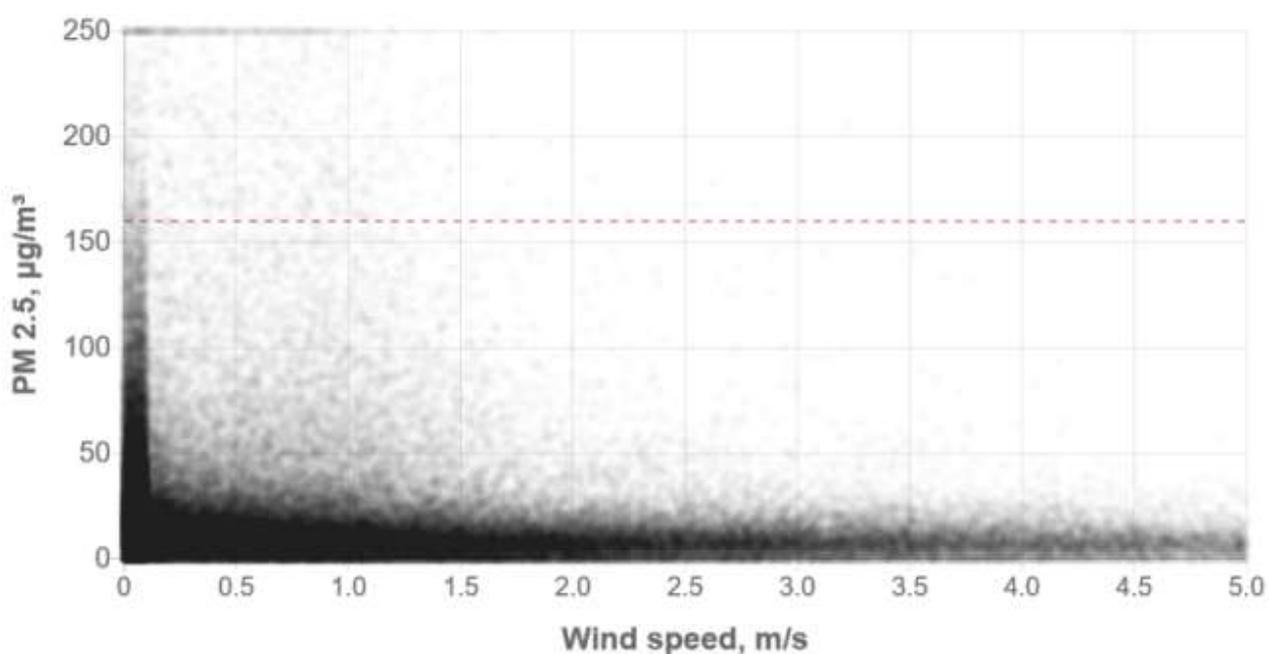
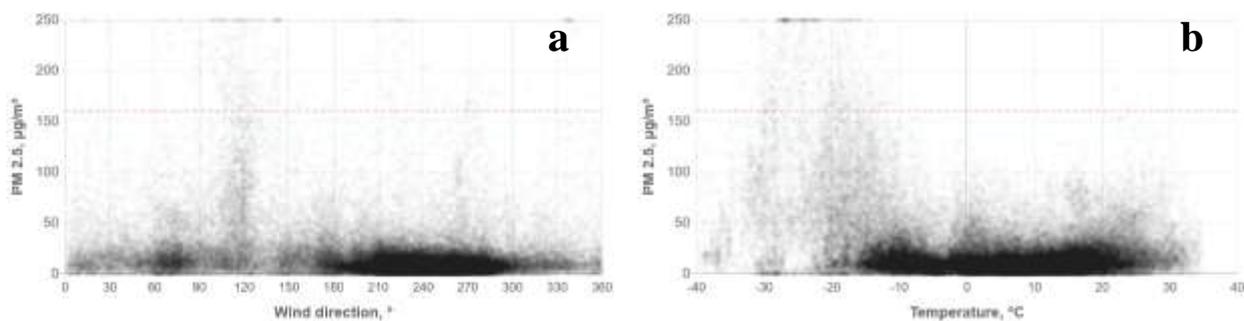


Рисунок 35 – Точечная диаграмма зависимости концентрации  $PM_{2.5}$  от скорости ветра



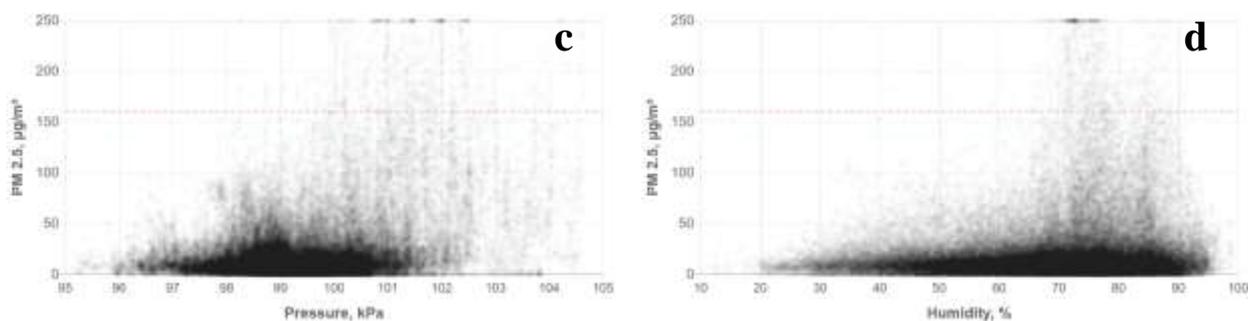


Рисунок 36 – Точечные диаграммы зависимости  $PM_{2.5}$  от направления ветра (а), температуры воздуха (б), атмосферного давления (с), относительной влажности воздуха (д).

Превышение предельно допустимого среднесуточного значения  $PM_{2.5}$  в основном реализуется зимой. Это обусловлено метеоусловиями, сопровождающими Сибирский антициклон: низкая температура, повышенное атмосферное давление и отсутствие ветра. В это время сжигается больше топлива, соответственно возрастают выбросы в атмосферу, но затруднено их выдувание из котловины, в которой расположен город.

*Основные публикации по разделу:*

- Tokarev A.V., Shaparev N.Ya. Assessment of the influence of weather conditions on the concentration of  $PM_{2.5}$  in the atmosphere of Krasnoyarsk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862(6), 062040.
- Tokarev A., Shaparev N. The influence of weather conditions on the concentration of  $PM_{2.5}$  in the surface layer of the atmosphere of Krasnoyarsk // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2020, 11560, 115602P.

#### 2.9. Анализ пространственного загрязнения взвешенными частицами приземного слоя атмосферы Октябрьского района г. Красноярска

С помощью системы мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН изучен характер загрязнения приземного слоя атмосферы взвешенными частицами ( $PM_{2.5}$ ) в Октябрьском районе миллионного промышленного города. Определены среднегодовые и сезонные концентрации  $PM_{2.5}$  в районе расположения шести станций мониторинга воздуха. Статистический анализ показал, что в Октябрьском районе г. Красноярска распределение  $PM_{2.5}$  в воздушной среде неравномерное.

Для корректной оценки уровня загрязнения необходимо знать закономерности пространственного распределения взвешенных частиц в атмосфере города. В качестве исходных данных использовалась система мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН, в составе которой сегодня работает 24 станции мониторинга, 5 шт. из них установлены в Октябрь-

ском районе. Цель работы состояла в оценке уровней загрязнения приземного слоя атмосферы взвешенными частицами PM<sub>2.5</sub> в шести различных микрорайонах.

Наблюдения выполнялись в течение 2019 года в пяти микрорайонах Октябрьского района (Академгородок, Ветлужанка, Овинный, Телевизорный, Удачный) и в микрорайоне Николаевка, который прилегает к границе Октябрьского района (таблица 3).

Таблица 3. Координаты постов наблюдения, их положение над уровнем моря и удаленность от левого берега реки Енисей

	Микрорайон	Координаты	Высота над уровнем моря, м	Удаление от реки Енисей, км
1	Академгородок	55,98657 с.ш., 92,76222 в.д.	255	0,47
2	Овинный	56,04457 с.ш., 92,72616 в.д.	216	7,31
3	Телевизорная ул.	56,02594 с.ш., 92,79871 в.д.	186	3,80
4	Удачный	55,97847 с.ш., 92,67719 в.д.	156	0,55
5	Ветлужанка	56,02930 с.ш., 92,76537 в.д.	204	4,82
6	Николаевка	56,00772 с.ш., 92,82126 в.д.	177	1,35

В качестве критериев оценки уровня загрязнения атмосферы взвешенными частицами PM<sub>2.5</sub> использовались значения предельно допустимых концентраций максимально разовых (ПДК<sub>мр</sub> = 160 мкг/м<sup>3</sup>), среднесуточных (ПДК<sub>сс</sub> = 35 мкг/м<sup>3</sup>) и среднегодовых (ПДК<sub>сг</sub> = 25 мкг/м<sup>3</sup>). Эти критерии официально установлены законодательством России.

Основные результаты состоят в следующем. В 2019 году на территории Октябрьского района наименьшие среднегодовые концентрации PM<sub>2.5</sub> в приземном слое атмосферы наблюдались в микрорайонах Академгородок и Удачный (таблица 2). Среднегодовые значения составили 10,1 мкг/м<sup>3</sup> и 10,4 мкг/м<sup>3</sup>, соответственно. В микрорайонах Академгородок и Удачный максимальные концентрации PM<sub>2.5</sub> достигали значений 180,2 мкг/м<sup>3</sup> и 163,8 мкг/м<sup>3</sup>, соответственно. Уровень загрязнения воздушной среды относительно ПДК<sub>сг</sub> был превышен в микрорайонах Овинный и Телевизорная. В атмосфере микрорайона Ветлужанка зафиксирована максимальная для всего Октябрьского района концентрация PM<sub>2.5</sub>, которая составила 396,9 мкг/м<sup>3</sup> (таблица 4).

Таблица 4. Среднегодовые и максимальные концентрации PM<sub>2.5</sub> в атмосфере различных микрорайонов в 2019 году

№	Микрорайон	Концентрация PM <sub>2,5</sub> , мкг/м <sup>3</sup>	
		Среднегодовая	Максимальная
1	Академгородок	10,1±0,2	<b>180,2</b>
2	Овинный	<b>26,6±0,5</b>	<b>313,4</b>
3	Телевизорная ул.	<b>26,9±0,5</b>	<b>340,2</b>

4	Удачный	10,4±0,2	<b>163,8</b>
5	Ветлужанка	22,4±0,5	<b>396,9</b>
6	Николаевка	<b>29,7±1,0</b>	<b>406,1</b>

Известно, что в зимний период концентрация загрязняющих веществ в атмосфере города Красноярска достигает наибольших значений. По этой причине для Октябрьского района была выполнена оценка уровней загрязнения воздушной среды взвешенными частицами в зимний и летний сезоны календарного года. Результаты представлены в таблицах 5 и 6. Критерием среднесезонного уровня загрязнения служила величины ПДКсс, максимального уровня загрязнения - ПДКмр.

Таблица 5. Средние и максимальные концентрации PM<sub>2.5</sub> в атмосфере различных микрорайонов зимой 2019 года

№	Микрорайон	Концентрация PM <sub>2,5</sub> , мкг/м <sup>3</sup>	
		Среднесезонная	Максимальная
1	Академгородок	13,7±0,2	<b>161,8</b>
2	Овинный	<b>46,7±2,5</b>	<b>313,4</b>
3	Телевизорная ул.	<b>54,2±3,3</b>	<b>340,2</b>
4	Удачный	13,7±0,8	156,7
5	Ветлужанка	<b>57,4±4,2</b>	<b>396,9</b>
6	Николаевка	<b>63,2±3,3</b>	<b>406,1</b>

Таблица 6. Средние и максимальные концентрации PM<sub>2.5</sub> в атмосфере различных микрорайонов летом 2019 года

№	Микрорайон	Концентрация PM <sub>2,5</sub> , мкг/м <sup>3</sup>	
		Среднесезонная	Максимальная
1	Академгородок	15,5±0,2	<b>180,2</b>
2	Овинный	18,9±1,1	<b>174,7</b>
3	Телевизорная ул.	18,4±0,9	153,8
4	Удачный	15,2±0,9	<b>163,8</b>
5	Ветлужанка	17,7±1,0	<b>175,5</b>
6	Николаевка	18,3±1,0	<b>176,9</b>

Анализ таблиц 5 – 6 показывает, что загрязнение в микрорайонах различное как среднегодовое, так в среднеквартальном периоде. Максимальный уровень загрязнения различается в 2,5 раза.

Характерно, что в летний период во всех микрорайонах наблюдалось почти одинаковое (153,8-180,2 мкг/м<sup>3</sup>) загрязнение взвешенными частицами (таблица 6). Это было обусловлено смещением дымовых шлейфов от пожаров в южном и юго-западном направ-

лениях. Распространяющийся с северо-восточных районов Сибири дым от лесных пожаров в июле-августе 2019 года часто вовлекался и переносился в юго-западном направлении. Следствием таких перемещений воздушных масс явилось задымление в г. Красноярске, которое неоднократно в течение июля-августа 2019 года фиксировалось из космоса (рисунок 37).

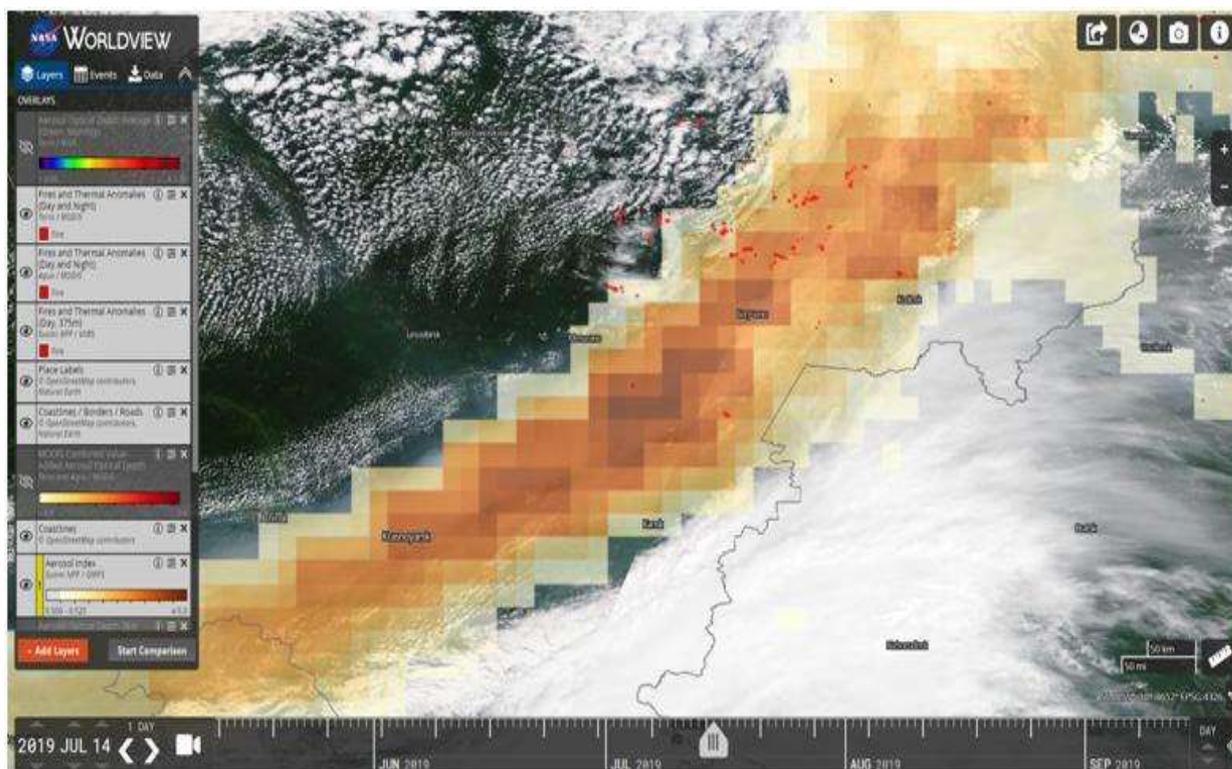


Рисунок 37 – Высокие значения аэрозольного индекса над Красноярском 14 июля 2019 года по данным прибора OMPS SUOMI-NPP (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>). Очаги возгорания обозначены красными точками.

Для выяснения особенностей загрязнения в атмосферы в Октябрьском районе была выполнена обработка рядов данных с помощью корреляционного анализа. Рассчитанные коэффициенты корреляции представлены в таблице 7. Значения коэффициентов корреляции в этой таблице лежат в двух диапазонах 0,49-0,56 и 0,85-0,94. Это свидетельствует о разном характере загрязнения атмосферы в микрорайонах Октябрьского района.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между данными на станциях мониторинга.

	Академгородок	Овинный	Телевизорная	Удачный	Ветлужанка	Николаевка
Академгородок	1					
Овинный	0,54	1				
Телевизорная	0,56	<b>0,89</b>	1			

Удачный	<b>0,89</b>	0,51	0,51	1		
Ветлужанка	0,54	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	0,53	1	
Николаевка	0,51	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	0,49	<b>0,89</b>	1

Из анализа таблицы 7 следует, что микрорайоны можно объединить в две группы. Первую группу составляют микрорайоны Академгородок и Удачный, во вторую группу входят микрорайоны города Овинный, Ветлужанка, Телевизорная, Николаевка (рисунок 38).

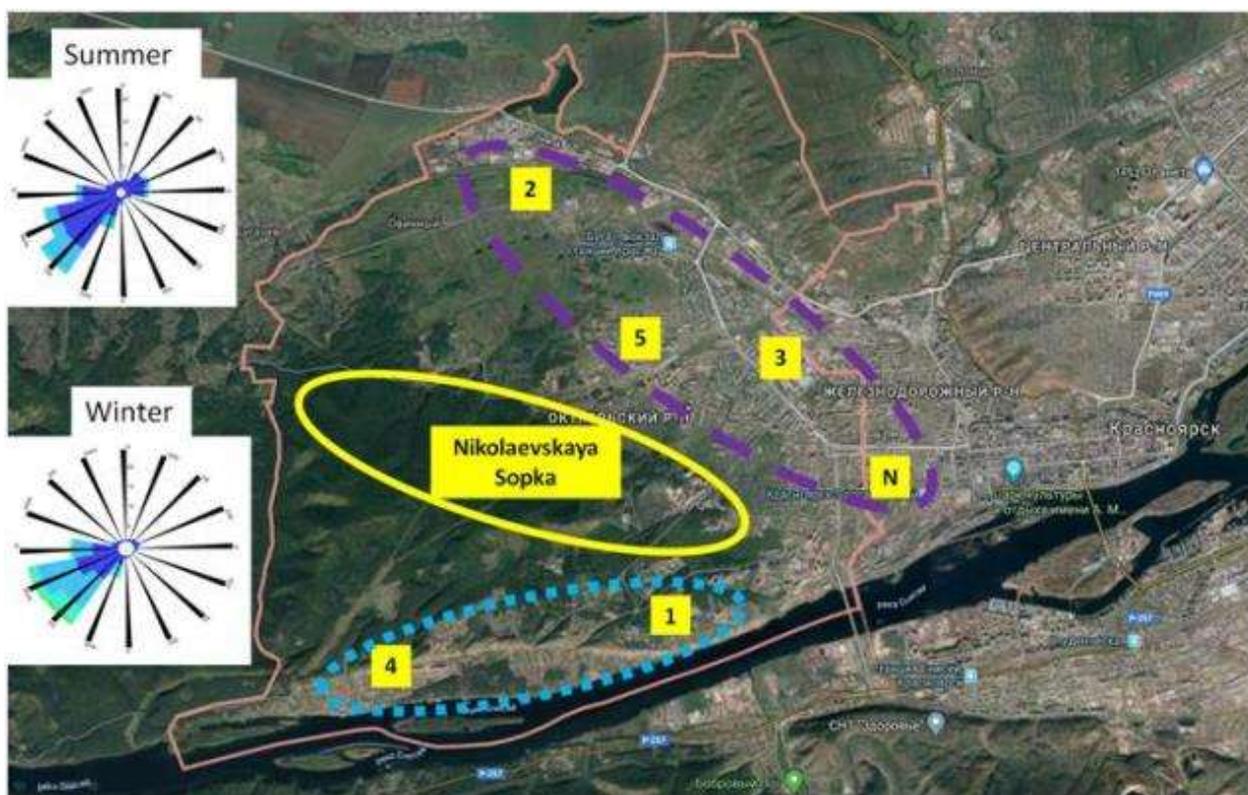


Рисунок 38 – Группировка постов наблюдения, рельеф местности и роза ветров в Октябрьском районе. Названия постов даны в таблице 3.

Микрорайоны первой группы расположены вблизи левого берега реки Енисей. В Академгородке и Удачном станции наблюдения находятся на расстоянии 0,47 км и 0,55 км от уреза реки, соответственно. Микрорайон Академгородок расположен на 100 м выше, чем микрорайон Удачный (таблица 1). Микрорайоны Ветлужанка, Овинный, Телевизорный, Николаевка расположены ниже, чем Академгородок, но выше, чем микрорайон Удачный (таблица 1). Эти четыре микрорайона удалены от р. Енисей на 1,35 – 7,3 км. Между двумя группами микрорайонов находится Николаевская сопка высотой около 500 м (рисунок 38).

По данным за 2008-2018 годы в Красноярске господствуют западные и юго-западные ветра. Вероятно, Николаевская сопка способствует тому, что над территорией второй группы микрорайонов скорость господствующих ветров снижается. Из-за низкой скорости ветра происходит увеличение концентрации PM<sub>2.5</sub>. Низкая концентрация в первой группе микрорайонов может быть обусловлена как поступлением чистого воздуха с господствующими ветрами, так и влиянием незамерзающей реки Енисей. Кроме того, факторный анализ показывает существенное различие между данными микрорайонов первой и второй группы.

*Основные публикации по разделу:*

- Zavorueva E.N., Zavoruev V.V. Inhomogeneous pollution by particulate matter of the atmospheric surface layer of the Oktyabrsky district of the city of Krasnoyarsk in 2019 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862(6), 062097.
- Zavoruev V., Kadochnikov A., Tokarev A. Air monitoring system of the Krasnoyarsk Science Center SB RAS // E3S Web of Conferences, 2020, 223, 03020.

#### 2.10. Влияние дыма сибирских лесных пожаров на загрязнение атмосферы г. Красноярска в летний пожароопасный период

Проанализировано влияние дыма сибирских лесных пожаров в июле 2019 г. на загрязнение приземного слоя атмосферы г. Красноярска взвешенными частицами PM<sub>2.5</sub>. В качестве критерия загрязнения использовалось значение среднесуточной предельно допустимой концентрации (35 мкг/м<sup>3</sup>). Период загрязнения составил 12 суток, при расчете по среднесуточным концентрациям PM<sub>2.5</sub> и 9,5 суток при расчете по среднечасовым концентрациям PM<sub>2.5</sub>. В первом случае максимальная концентрация PM<sub>2.5</sub> составила 77,9 мкг/м<sup>3</sup>, а во втором случае 164,5 мкг/м<sup>3</sup>.

За последние десятилетия возросло как количество лесных пожаров, так и размер выгоревшей площади. В окрестностях Красноярска часто происходят летние лесные пожары, что вызывает загрязнение воздуха в городе. По данным спутникового мониторинга с конца июня – начала июля по сентябрь 2019 года на территории Красноярского края, Иркутской области и Республики Саха (Якутия) ежедневно фиксировалось большое количество природных лесных пожаров на труднодоступных и удалённых землях лесного фонда. Например, только за первую декаду июля на территории Красноярского края было обнаружено 5571 возгорание. Ситуация усугублялась дефицитом осадков, и во второй декаде июля количество пожаров увеличилось до 9400. За июль месяц общее количество обнаруженных пожаров на территории Красноярского края составило 30432. Природные пожары

явились источником выбросов огромного количества аэрозольных и газовых примесей в атмосферный воздух. По данным спутникового дистанционного зондирования высокие концентрации примесей были зафиксированы на территории всей Сибири.

Распространяющийся с северо-восточных районов Сибири дым от лесных пожаров в июле-августе 2019 года часто вовлекался и переносился в юго-западном направлении. Следствием таких перемещений воздушных масс явилось задымление в г. Красноярске, регистрируемое системами мониторинга Росгидромета (ФГБУ «Среднесибирское УГМС») и ФИЦ КНЦ СО РАН.

Анализ данных, полученных системой ФИЦ КНЦ СО РАН, показал, что в июле 2019 г. загрязнение атмосферы Красноярска взвешенными частицами  $PM_{2.5}$  превышало нормативный уровень предельно допустимой концентрации (ПДК) в течение 12 суток (рисунок 39).

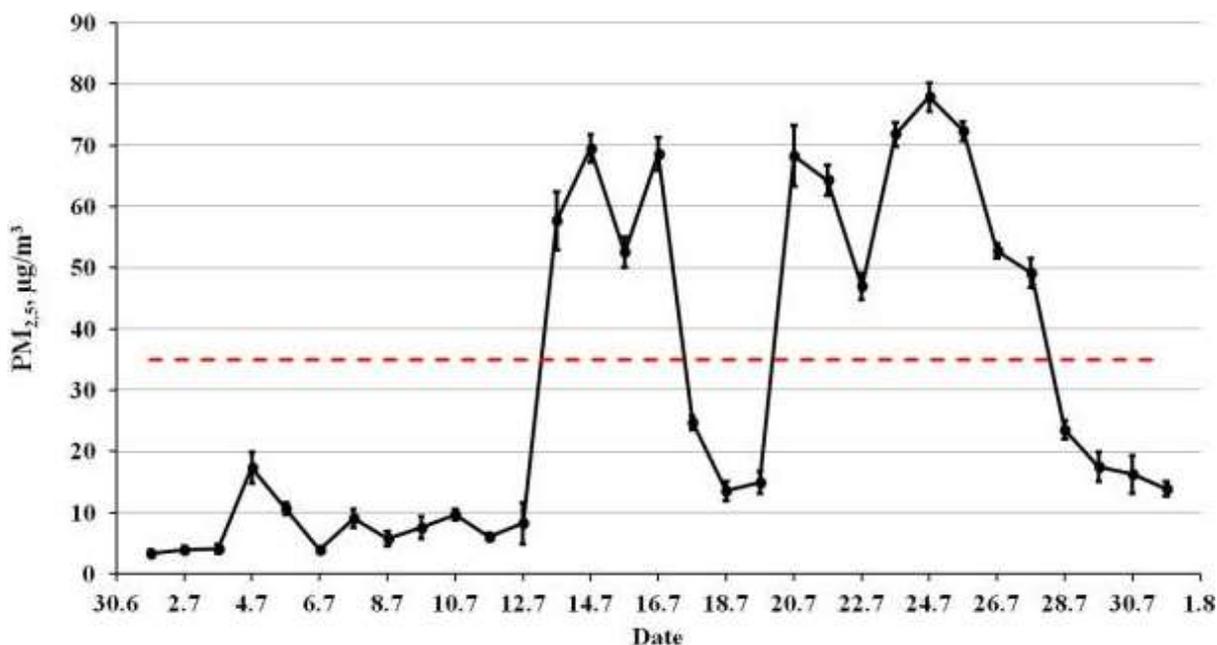


Рисунок 39 – Среднесуточная концентрация  $PM_{2.5}$  в приземном слое атмосферы Красноярска в июле 2019 г. Горизонтальная пунктирная линия – величина среднесуточной ПДК.

Используемая Росгидрометом методика оценивания загрязнения атмосферы не позволяет установить количество часов в течение месяца, когда концентрация  $PM_{2.5}$  превышала величину ПДКсс. Для ее оценки рассмотрим более детально периоды, в которые наблюдалось загрязнение атмосферы  $PM_{2.5}$ . В качестве примера на рисунке 40 представлена динамика концентрации  $PM_{2.5}$  с часовым интервалом для периода с 19 по 30 июля 2019 г.

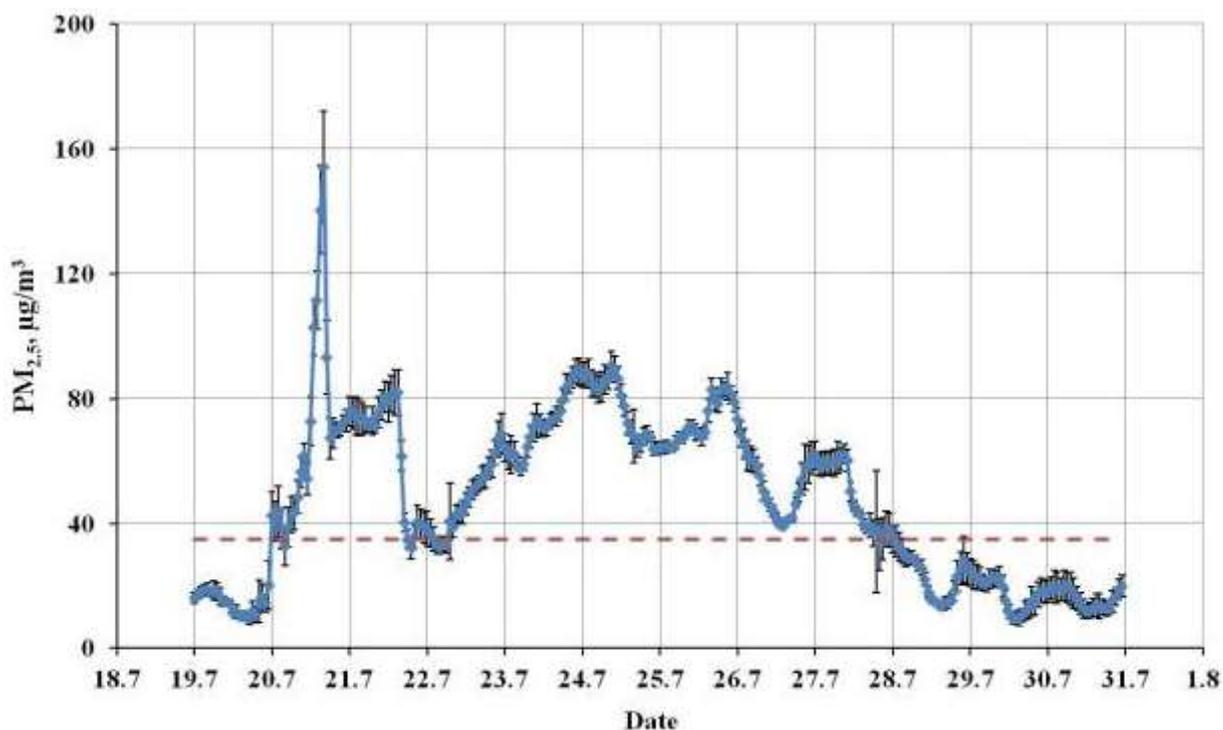


Рисунок 40 – Среднечасовая концентрация PM2.5 в приземном слое атмосферы Красноярска 19-30 июля 2019 г. Горизонтальная пунктирная линия – величина среднесуточной ПДК.

Детальный анализ почасовых данных показывает, что в период 12-18 июля концентрации взвешенных частиц превышали ПДК в течение 62 часов, максимальная концентрация PM2.5 была зафиксирована 15.07.2019 в 21:00 и равнялась  $164,5 \text{ мкг/м}^3$ . В течение еще одного периода – с 19 по 30 июля – превышение уровня ПДК наблюдалось 166 часов, максимальное значение  $154,3 \text{ мкг/м}^3$  наблюдалось в 16:00 20.07.2019. Таким образом, в июле 2019 года количество часов, когда концентрация PM2.5 превышала величину ПДКсс, равнялось 228 часам (9,5 суток).

Приведенные на графике (рисунок 40) пиковые значения концентраций 20 июня с 11 до 18 часов заслуживают отдельного внимания. Во-первых, этот пик характеризуется необычно высокой концентрацией PM2.5 (среди концентраций, которые наблюдались в атмосфере г. Красноярска в июле 2019 г.). Во-вторых, он самый короткий по времени среди пиков с высокой концентрацией PM2.5. Таким образом, используя этот пик, можно рассмотреть динамику его проявления (изменение концентрации PM2.5) в районах расположения различных станций мониторинга воздуха г. Красноярска.

Анализ метеоданных показывает, что в июле 2019 года дым от лесных пожаров (которые действовали в северо-восточных районах Сибири) часто вовлекался и переносился в юго-западном направлении. На рисунке 41 представлены скорость и направление ветра,

которые были зарегистрированы АПН «Красноярск-Солнечный» 20 июля 2019 года (<http://krasecology.ru>). Если посмотреть на карту г. Красноярска, то можно увидеть, что направление ветра совпадало с направлением русла реки Енисей. По сути, направление ветра было противоположно течению реки.

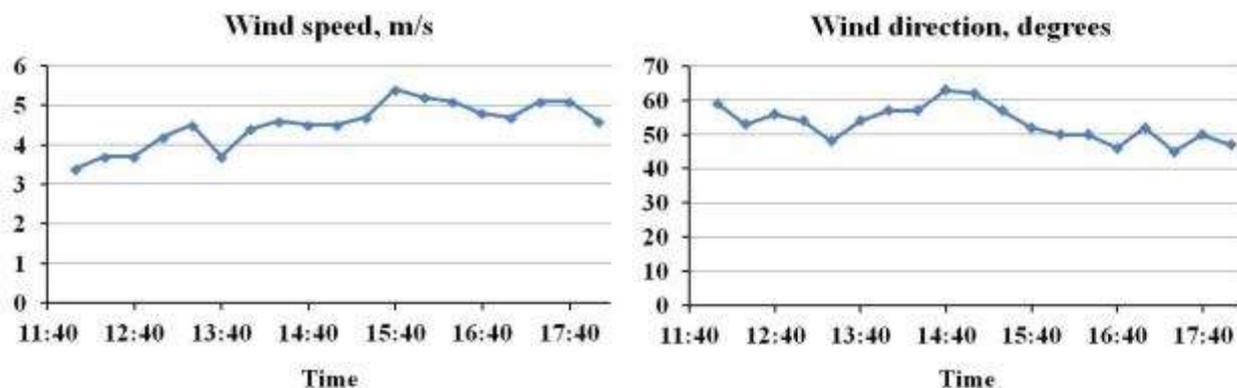


Рисунок 41 – Скорость и направление ветра в Красноярске 20 июля 2019 г.

Вблизи реки Енисей (не более 2 км от левого берега) 20 июля 2019 года функционировали шесть станций мониторинга сети наблюдения ФИЦ КНЦ СОРАН: Песчанка, КРАЗ, Ленина 41, Николаевка, Академгородок, Удачный. Станции перечислены в порядке их расположения – с северо-восточной к юго-западной части городской территории. Расстояние по прямой между станцией Песчанка и станцией Удачный составляет 28 км, места их расположения показаны на сайте <http://air.krasn.ru/map.html>.

Динамика поминутных данных концентраций PM<sub>2.5</sub> с 20.07.19 14:00 до 20.07.19 18:00 в районе расположения указанных шести станций мониторинга показана на рисунке 42. Видно, что максимальное загрязнение было сначала зафиксировано станциями Песчанка и КРАЗ, затем станцией Николаевка, в последнюю очередь станцией Удачный. По графику, представленном на рисунке 6, невозможно однозначно установить время достижения максимальных значений на СМВ Академгородок и Ленина 41. Тем не менее, можно говорить о распространении загрязнения с северо-востока на юго-запад. При сложившихся ветровых условиях разница во времени достижения максимальной концентрацией PM<sub>2.5</sub> в районе расположения станций Песчанка и СМВ Удачный составила более 60 минут.

Динамика снижения концентрацией PM<sub>2.5</sub> с 20.07.19 15:54 до 20.07.19 17:48 в районе расположения рассматриваемых шести станций показана на рисунке 43. Видно, что в районе расположения станций Песчанка, Ленина 41, Академгородок и Удачный, скорость снижения концентрации PM<sub>2.5</sub> была выше, чем вблизи станций КРАЗ и Николаевка. Очистка атмосферы началась в районе расположения станции Песчанка и происходила в

следующей последовательности: Песчанка, КРАЗ, Ленина 41, Николаевка, Академгородок, Удачный.

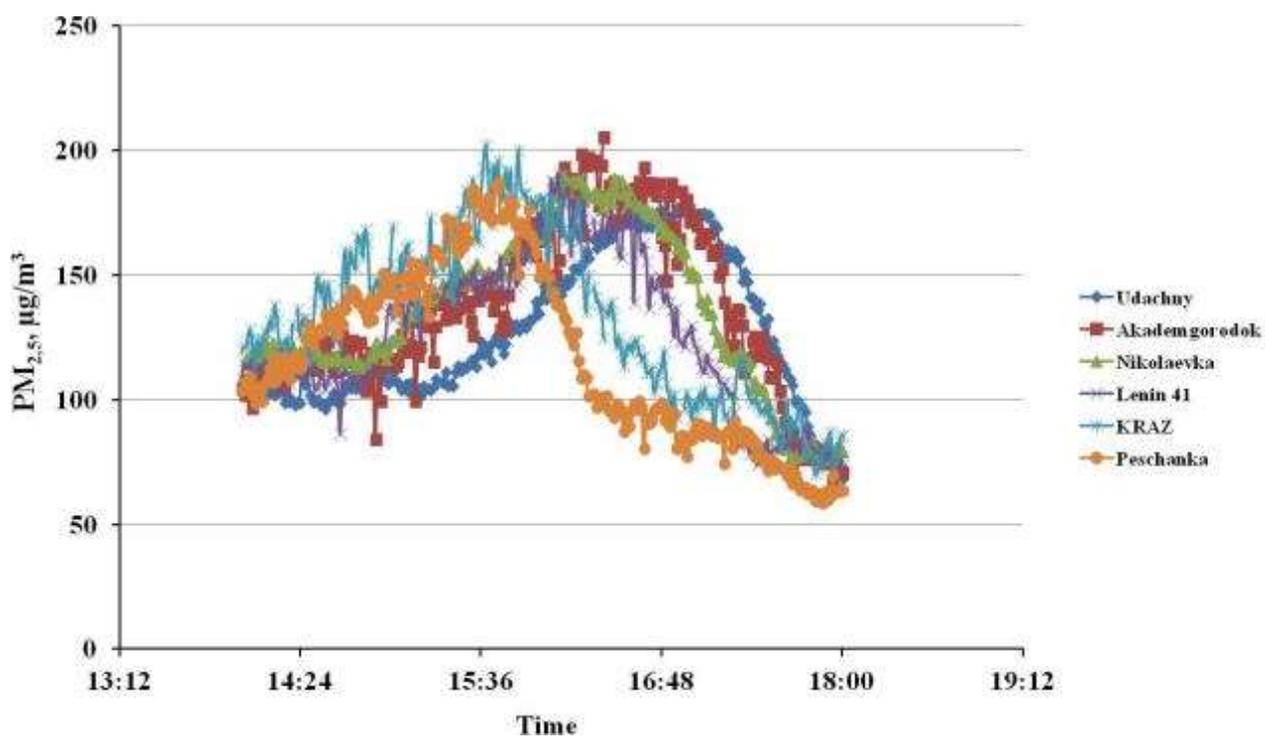


Рисунок 42 – Динамика изменения концентрации PM<sub>2.5</sub> 20 июля 2019 г. на станциях мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН.

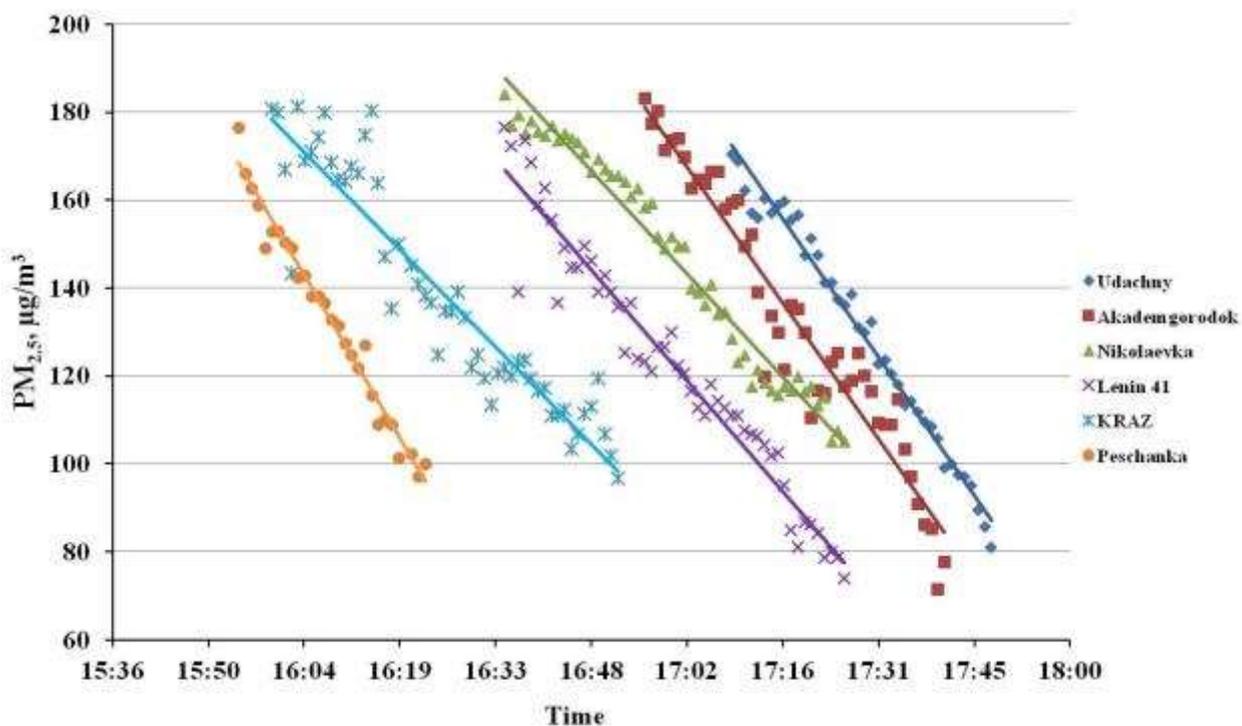


Рисунок 43 – Динамика снижения концентрацией PM<sub>2.5</sub> 20 июля 2019 г в районе расположения шести станций мониторинга.

По данным, представленным на рисунке 43, можно оценить скорость очистки атмосферы г. Красноярска. Для этого была определена разница во времени достижения концентраций PM<sub>2.5</sub> 160 мкг/м<sup>3</sup>, 140 мкг/м<sup>3</sup> и 120 мкг/м<sup>3</sup> в районе расположения станций Песчанка и Удачный. Эта разница составила 77, 80 и 81 минуту. Зная расстояние между станциями Песчанка и Удачный (28 км) можно оценить скорость очистки атмосферы города. Она составила приблизительно 5,9 м/с.

Очевидно, что скорость очистки атмосферы определяется скоростью ветра. Рассчитанная скорость очень близка по своей величине, которая была зарегистрирована постом наблюдения «Красноярск-Солнечный» 20 июля 2019 года (рисунок 41).

Таким образом, на основе данных системы мониторинга воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН дана оценка аэрозольного загрязнения воздушной среды Красноярска в результате лесных пожаров в июле 2019 года. Были использованы 11 станций, измеряющих концентрацию PM<sub>2.5</sub> на территории г. Красноярска. Показано, что суммарная продолжительность периода загрязнения атмосферы различна, если для расчета используются среднесуточные или среднечасовые концентрации PM<sub>2.5</sub>.

С помощью шести станций, расположенных вблизи русла реки Енисей, впервые удалось зафиксировать динамику задымления атмосферы г. Красноярска.

*Основные публикации по разделу:*

- Zavoruev V.V., Zavorueva, E.N. Influence of Siberian forest fires smoke in July 2019 on the atmosphere pollution of Krasnoyarsk by particulate matter // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2020, 11560, 1156060.
- Gosteva A.A., Yakubailik O.E., Shaparev N.Y. Wildfires and the spread of smoke from forest fires in the Krasnoyarsk territory in summer 2019 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062057.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ТРОФИЧЕСКИМИ ЗВЕНЬЯМИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ИХ ЗАВИСИМОСТИ ОТ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ.

#### 3.1. Кормовая база и потенциал рыбопродуктивности бассейна Енисея

Ограничение импорта водных биологических ресурсов должно стать положительным стимулом для рыбохозяйственных предприятий к тому, чтобы усилить позиции отечественной продукции на внутреннем рынке. Бассейн Енисея издавна славился своими рыбными богатствами, а основу промысла составляли ценные породы – лососевые, сиговые и осетровые. Однако строительство Ангаро-Енисейского каскада ГЭС привело к коренному изменению гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов рек, что в свою очередь сыграло огромную роль в изменении структуры ихтиоценозов и существенно изменило ареалы рыб. В настоящее время происходит существенное сокращение численности ценных видов осетровых, лососевых и сиговых рыб. Для сохранения и восстановления природных популяций ценных видов рыб необходимо повышать эффективность воспроизводства как естественного, так и искусственного. Однако успешная реализация планов по аквакультуре невозможна без оценки рыбных запасов, условий обитания и емких сведений о кормовой базе. Важнейшая составляющая кормовой базы всех видов сибирских рыб (осетровых, сиговых, хариусовых, карповых и др.) – это организмы зообентоса (донные беспозвоночные). Наличие современных сведений об уровне развития ихтиофауны и кормовых ресурсах в бассейне Енисея дает возможность оценить потенциальную рыбопродуктивность и предельно допустимые объемы вселения молоди рыб – объектов искусственного воспроизводства.

На основе данных, собранных в ходе маршрутных биосъемок в р. Енисей (от истока до устья р. Ангары) и его притоках (рр. Абакан, Мана, Кан, Агул, Кунгус), оценена структурная организация и пространственное распределение сообществ реофильного зообентоса в бассейне Енисея.

Все исследованные водотоки являются горными реками, в донной фауне которых преобладают литореофильные организмы, заселяющие каменистые грунты на большом течении. В зообентосе обнаружен 231 вид макробеспозвоночных, широко распространенных в Палеарктике и Голарктике. Доминирующие комплексы характеризовались изменчивостью по мере удаления от истоков рек.

В р. Енисей видовой состав бентонтов расширился от верховья (48) к устью р. Ангары (69). В верховье Енисея (участок 1, на территории республики Тыва) ядро донных сообществ представляли поденки, ручейники и хирономиды (рисунок 44). На территории республики Хакасии (участок 2) определяющим фактором для формирования структуры

зообентоса являлось обилие фитоценозов, где абсолютными доминантами являлись байкальские амфиподы *Gmelinoidea fasciatus*. В зообентосе Среднего Енисея (участок 3, от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангара) по сравнению с верховьем существенно возросла доля хирономид.

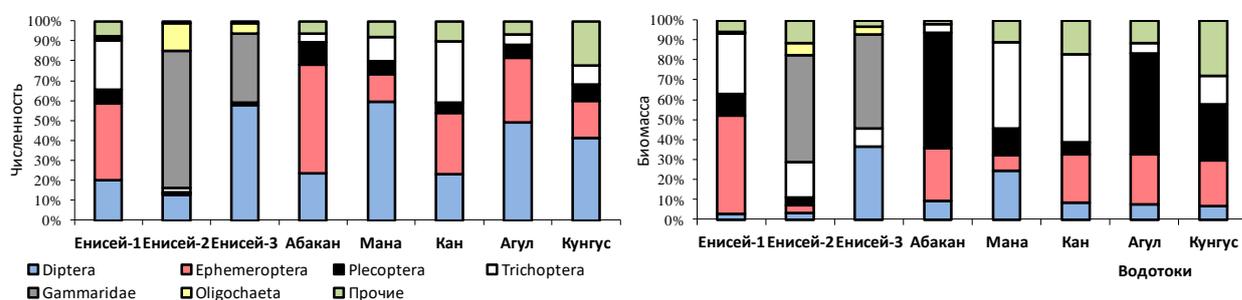


Рисунок 44 – Структурная организация зообентоса в р. Енисей и его притоках.

В притоках видовой состав бентонтов разнообразнее, чем в Енисее; максимальным видовым богатством отличались рр. Мана и Кан. Донные сообщества в притоках Енисея представлены преимущественно хирономидами и поденками, в р. Кан численность дополняли ручейники. Выявлена смена структурообразующих комплексов зообентоса в рр. Мана, Агул, Кунгус по сравнению с более ранними исследованиями других авторов.

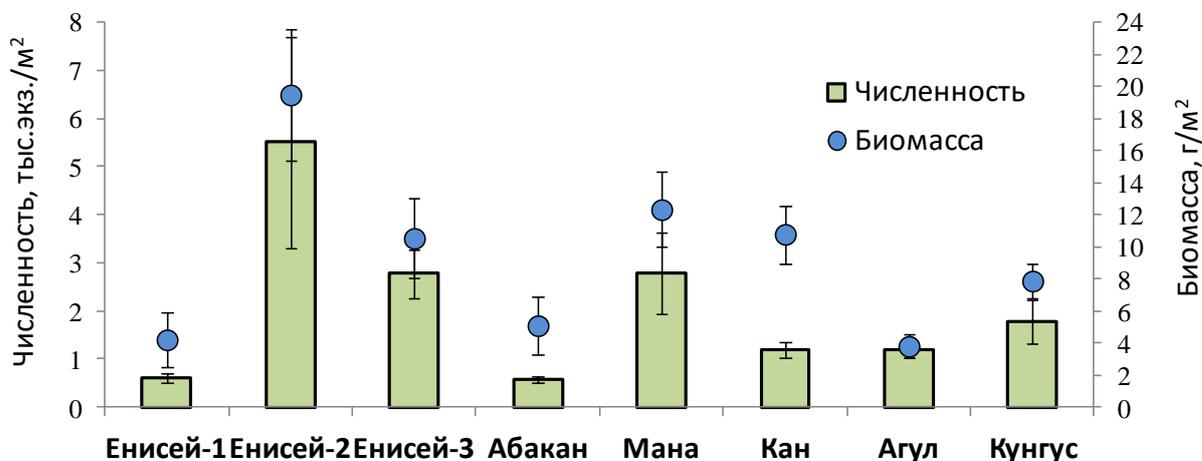


Рисунок 45 – Численность и биомасса зообентоса в р. Енисей и водотоках его бассейна.

Количественное распределение донной фауны в Енисее (рисунок 45) характеризовалось низкими показателями в верховье ( $612 \text{ экз./м}^2$  и  $4,2 \text{ г/м}^2$ ) и высокими на участке 2 ( $5,5 \text{ тыс. экз./м}^2$  и  $19,5 \text{ г/м}^2$ ). При этом увеличение плотности на участке 2 наблюдалось в фитофильных сообществах ( $18,0 \pm 6,6 \text{ тыс.экз./м}^2$  и  $38,4 \pm 13,3 \text{ г/м}^2$ ) за счет обилия молодежи амфипод; в остальных биоценозах численность составила  $2,1 \pm 0,4 \text{ тыс.экз./м}^2$ , биомасса –  $14,3 \pm 2,4 \text{ г/м}^2$ . В Среднем течении Енисея на участке 3 (от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангара) количественные показатели донных сообществ ( $2,8 \text{ тыс. экз./м}^2$  и  $10,5$

г/м<sup>2</sup>) вполне согласуются с более ранними исследованиями, проведенными нами в начале 2000-ых годов – 3,5 тыс. экз./м<sup>2</sup> и 10,8 г/м<sup>2</sup>.

Известно, что рыбопродуктивность водных объектов определяется уровнем развития кормовых ресурсов. На основе количественных данных о степени развития кормовой базы (зообентос) проведена оценка потенциальной рыбопродуктивности исследованных рек (таблица 8).

Таблица 8. Потенциальная рыбопродуктивность бассейна р. Енисей (верхнее и среднее течение)

Водный объект	Площадь участка, га	Продукция зообентоса, т	Потенциальная рыбопродуктивность, кг/га	Ихтиомасса бентофагов*, кг/га
р. Енисей (от г. Кызыл до г. Шагонар)	7 963	1003	10,5	2,3
р. Енисей (от Майнской ГЭС до г. Абакан)	3 082	1322**	35,8	17,2
р. Енисей (от Красноярской ГЭС до устья р. Ангары)	24 440	7699	26,3	18,8
р. Абакан	9 438	1438	12,7	8,6
р. Мана	3 542	1307	30,8	4,5
р. Кан	10707	3469	27,0	6,9
р. Агул	4 427	503	9,5	4,5
р. Кунгус	870	205	19,6	4,5

*Примечание.*

\* – ихтиомасса основных бентофагов (ленок, хариус) согласно контрольным уловам;

\*\* – без учета фитофильного зообентоса

Выявлено, что рыбохозяйственный потенциал бассейна Енисея достаточно высок. Основываясь на потенциальной рыбопродуктивности водного объекта, а также на численности и биомассе рыб, общий предельно допустимый объем вселения подрощенной молоди для целей искусственного воспроизводства может достигать 139,28 млн. шт. Первое место по объемам вселения занимает молодь лососевых рыб (таймень, ленок, хариус) – 135,82 млн. шт. Наибольшей приемной емкостью обладает р. Енисей (на участке от плотины Красноярской ГЭС до р. Ангары), наименьшей – р. Агул и ее приток р. Кунгус.

*Основные публикации по разделу:*

- Андрианова А.В. Структурная организация донной фауны в бассейне Енисея (верхнее и среднее течение) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 7. С. 140-145. DOI 10.17513/mjrfi.12343.

- Андрианова А.В., Дербинева Е.В., Гадинов А.Н., Криволицкий Д.А., Мельников И.И. Кормовая база и потенциал рыбопродуктивности бассейна Енисея (верхнее и среднее течение) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2019. № 45. С. 142–163. [Scopus]

### 3.2. Формирование геопространственной базы данных, содержащей структурно-функциональные характеристики гидробиологических сообществ в разнотипных водных объектах бассейна Енисея

На основе собственных данных экспедиционных исследований нами сформирована геопространственная база данных с результатами наблюдений (рисунок 46), которая размещена на геопортале ИВМ СО РАН в отдельном разделе (<http://gis.krasn.ru/go/n5p8>). Геопортал предоставляет возможности визуализации информации в виде интерактивных тематических карт и обеспечивает возможность прямого доступа к данным через картографические веб-сервисы из современных ГИС. Первоначальное наполнение геоинформационной системы составлено по материалам экспедиционных исследований, проведенных в начале 2000-ых гг. на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Подкаменной Тунгуски.

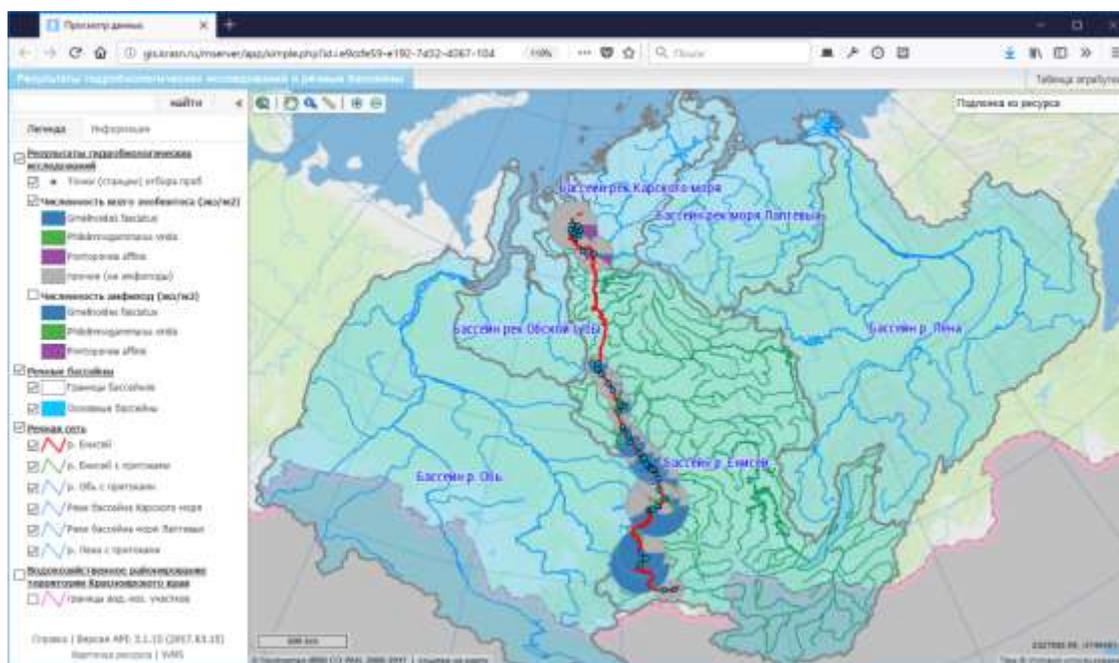


Рисунок 46. Веб-интерфейс геопортала ИВМ СО РАН: речная сеть бассейна р. Енисей, точки отбора гидробиологических проб, результаты исследований.

В настоящее время информационный ресурс пополнен современными сведениями о количественном распределении зообентоса (беспозвоночные животные, обитающие на дне водоемов и водотоков) в Енисее. Особое внимание уделено пространственной динамике

байкальских эндемичных амфипод в Енисее, которые распространились далеко за пределы Байкала не только вниз, но и вверх по течению. В настоящее время проблема инвазий чужеродных видов относится к одному из важных направлений фундаментальных и прикладных работ. Однако, в России наблюдается явный недостаток в Интернет-ресурсах, посвященных видам-вселенцам.

На данный момент геоинформационная система пополнена результатами экспедиционных гидробиологических исследований, проведенных в 2015-2016 гг. в нескольких зонах Енисея от истока до устья. Выявлено, что на всем протяжении реки среди гаммарид количественно доминировал *Gmelinoides fasciatus*, второе место занял *Philolimnogammarus viridis* (рис. 47). Лишь в низовье и дельте Енисея лидирующие позиции перешли к *Pontoporeia affinis* – представителю эстуарно-реликтового комплекса организмов. Байкальские эндемики активно заселили участок Верхнего Енисея ниже Саяно-Шушенского вдхр., особенно в зонах массового распространения макрофитов. Наблюдается дивергенция экологических ниш у *G. fasciatus* и *Ph. viridis* в Енисее: доминант предпочитает заиленные песчано-галечные биотопы со спокойным скоростным режимом; субдоминант склонен к каменисто-галечным грунтам, омываемым быстрым течением. За последние 15 лет возросла плотность и доля рачков в зообентосе на участке Ангара – Подкаменная Тунгуска, особенно *G. fasciatus* – в 4 раза численность и в 7 раз биомасса.

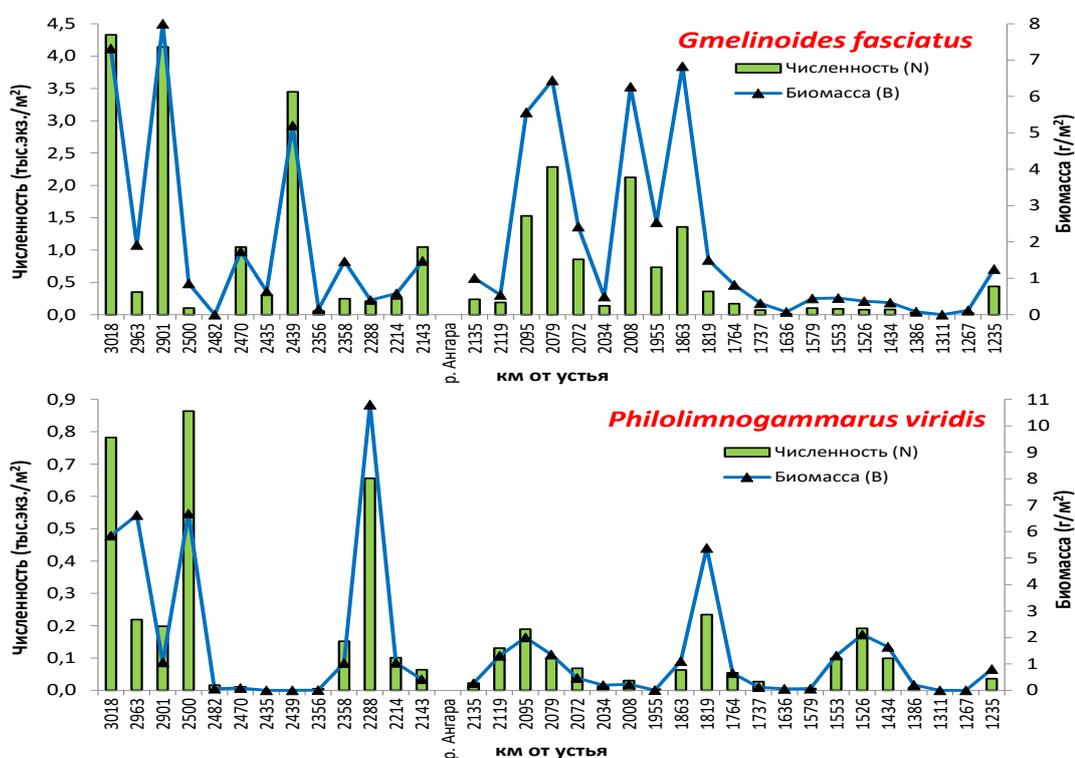


Рисунок 47 – Пространственная динамика численности и биомассы *G. fasciatus* и *Ph. viridis* в Верхнем (выше впадения р. Ангара) и Среднем (ниже впадения р. Ангара) Енисее.

На дальнейших этапах работ планируется привлечение методов геоинформационного моделирования. Геопозиционированная гидробиологическая информация может быть сопоставлена с другими элементами природной среды – растительным покровом, типами почв, данными государственного экологического мониторинга по загрязнению территории, и проч. Речной бассейн в этом контексте становится системообразующим фактором. Изучение различных характеристик экосистемы на основе бассейнового принципа увязывает в одно целое разнообразные проявления биологической жизни на территории.

*Основные публикации по разделу:*

- Andrianova A.V., Yakubailik O.E. (2019) Geoinformational Web-System for the Analysis of the Expansion of the Baikal Crustaceans of the Yenisei River. In: Bychkov I., Voronin V. (eds) Information Technologies in the Research of Biodiversity – Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019, pp. 125-130.
- Andrianova A.V., Yakubailik O.E., Shan'ko Y.V. Modern data on the spatial distribution of the Baikal amphipods in the Yenisei River and their visualization in the geoinformational web system // Russian Journal of Biological Invasions. Vol. 9. № 4. pp. 299–312.
- Андрианова А.В., Якубайлик О.Э. Геоинформационная база данных для анализа пространственного распределения байкальских эндемичных амфипод в р. Енисей // Вычислительные технологии 2018, т. 23, № 4, с. 5-14. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.16487.

### 3.3. Биометрический анализ данных для выявления особенностей структурной и пространственно-временной организации гидробиологических сообществ

Анализ взаимоотношений видов в сообществах; выявление факторов окружающей среды, которые влияют на формирование сообществ и жизнеспособность отдельных видов; поиск закономерностей пространственно-временного распределения видов и сообществ – все эти вопросы относятся к фундаментальным задачам экологии и не могут быть решены без привлечения статистического анализа данных. Нами был проведен ряд исследований гидробиологических сообществ (фитопланктона и зообентоса) в бассейне Енисея, подкрепленных статистическим анализом данных, которые выявили особенности пространственного распределения гидробионтов.

Непосредственно в р. Енисей проводились исследования фитопланктонных сообществ (микроводоросли, обитающие в толще воды) на участке от 27 до 65 км ниже плотины Красноярской ГЭС. Известно, что в условиях высоких скоростей течения фитопланктон развивается слабо или не развивается вовсе и представляет собой смесь видов фито-

перифитона и аллохтонных водорослей, а в зарегулированных реках – ещё и фитопланктона водохранилищ, сбрасываемых из верхнего бьефа ГЭС. Цель работы состояла в анализе пространственно-временной динамики фитопланктона и в поиске ответа на вопрос: что происходит с лимническим фитопланктоном из верхнего бьефа Красноярского водохранилища, когда он попадает в реофильные условия с высокой (2-4 м/с) скоростью течения.

Статистическую обработку базы данных (по материалам круглогодичных исследований в 2016-2017 гг.) выполняли с использованием непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова и U-критерия Манна-Уитни, а также дисперсионного анализа двухфакторных комплексов. Для кластерного анализа использовали исходный набор данных из 34 параметров и 75 наблюдений, которые агрегировали по дате исследования с расчётом средних значений параметров, характеризующих точки отбора проб. Стандартизацию параметров выполняли относительно математического ожидания и стандартного отклонения. Факторный анализ методом главных компонент позволил с сохранением 80% информативности перейти к пяти главным компонентам. При формировании кластеров расстояние между ними рассчитывалось методом взвешенного попарного среднего (метод WPGMA). Аналитическая обработка данных выполнена в среде PyCharm на языке Python с использованием библиотек pandas (<https://pandas.pydata.org/>), sklearn (<https://scikit-learn.org/>), scipy (<https://scipy.org>) и matplotlib (<https://matplotlib.org/>).

Установлено, что истинно планктонные виды водорослей (*Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim., *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm., *Fragilaria crotonensis* Kitt.) составляли основную биомассу фитопланктона по всему исследованному руслу реки. По видовому составу, общей численности и биомассе фитопланктон основного русла сходен с фитопланктоном левобережных станций. Правобережные комплексы носят черты индивидуальности вследствие влияния развитой системы притоков. С помощью факторного анализа наблюдаемых параметров методом главных компонент и агломерационной иерархической кластеризации данных выделено три основных кластера (рисунок 48). В I кластер объединились правобережные станции разрезов 1 и 2, существенно отличающиеся от остальных точек наблюдения и друг от друга. Во II кластер выделены левобережные станции разрезов 1 и 2 и центральная станция разреза 2. Остальные станции сформировали III кластер с очевидными подкластерами, разделяющими станции, соответствующие центру русла и береговым станциям, что, по-видимому, обусловлено морфометрическими особенностями реки и связано с различными гидрологическими условиями. Рипаль реки отличается от медиали меньшими глубинами, соответственно меньшей скоростью течения и более высокой температурой воды. Станции левого и правого берегов разрезов 3, 4 и 5 имеют более

близкие значения рассматриваемых параметров, а центральные – менее схожи между собой.

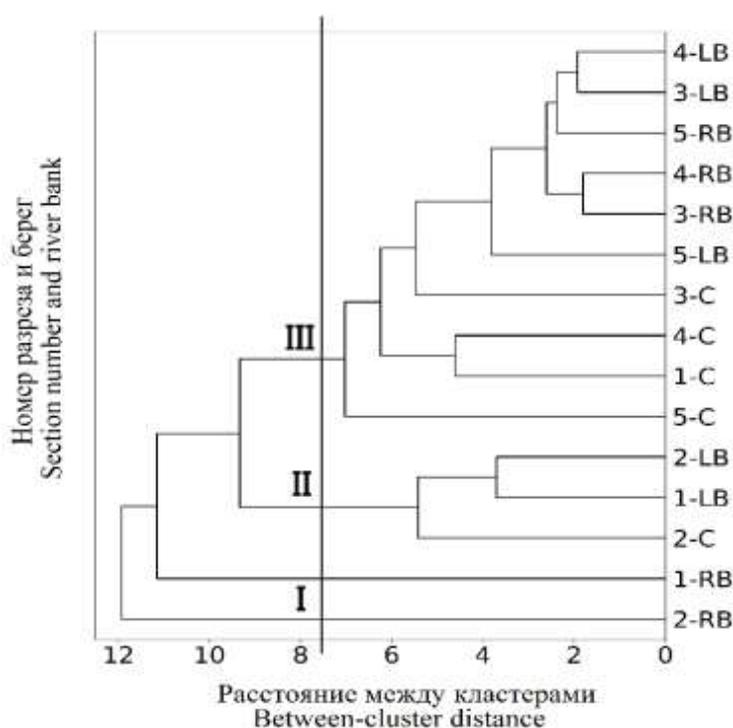


Рисунок 48 – Дендрограмма результатов кластерного анализа наблюдений по значениям пяти главных компонент (LB – левый берег, RB – правый берег, С – центр).

Диаграмма рассеяния рассматриваемых кластеров в трёх главных компонентах показала, что станции каждого кластера характеризуются высокими значениями определённых показателей. Так, на станциях I кластера отмечены высокая численность бентосных водорослей, общая биомасса фитопланктона, биомасса и количество видов диатомовых, объём клетки, общее число видов. Станции II кластера отличаются повышенной долей *C. radiosa* в общей численности фитопланктона, её биомассой, количеством и численностью планктонных видов. В III кластер сгруппированы станции, отличающиеся высокой численностью бентосных и планктонных водорослей, биомассой диатомовых, биомассой *C. radiosa*, общей биомассой фитопланктона и объёмом клетки (рисунок 49).

Горизонтальное распределение водохранилищного фитопланктона по мере удаления от плотины вниз по реке уменьшалось. Очевидно, лимнические виды планктона, попав в речной поток с высокой турбулентностью и с более низкой температурой воды, чем в водохранилище (на 7–8°C), только переносились рекой и собственного развития не имели.

Для количественной оценки пространственно-временного изменения численности и биомассы лимнического планктона, поступающего в реку со стоком через плотину, провели двухфакторный дисперсионный анализ (факторы – берег и месяц исследования) всего

массива данных за период с апреля по август, когда плотность водорослей достигала максимума. Наибольшая сила влияния на распределение лимнического планктона выявлена для фактора «месяц» ( $\eta^2$  достигал 45 %). Влияние фактора «берег» было либо недостоверно, либо незначительно.

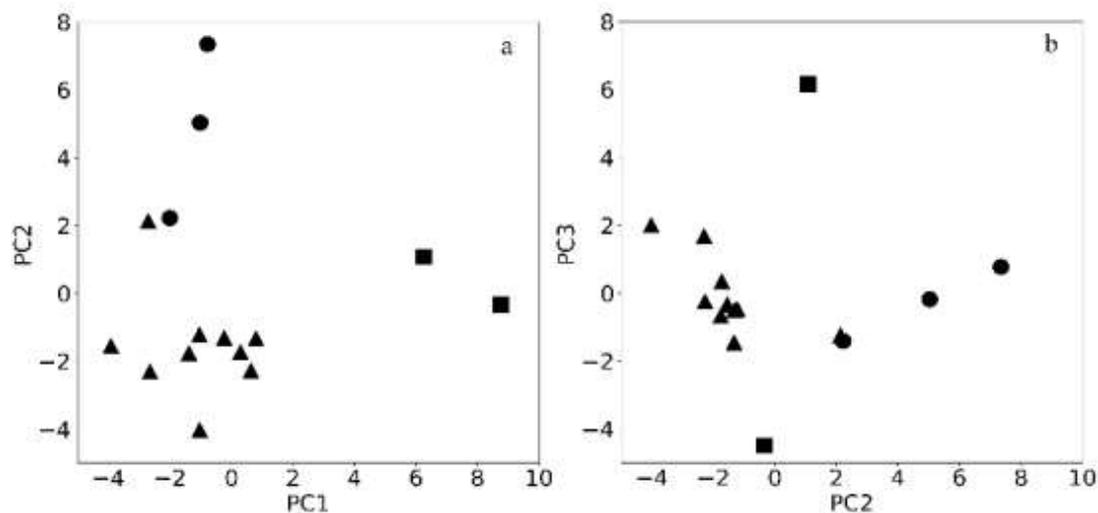


Рисунок 49 – Диаграмма рассеяния выявленных кластеров: а – в первой и второй, б – во второй и третьей главных компонентах (■ – I кластер, ● – II кластер, ▲ – III кластер)

Работы по исследованию зообентоса (беспозвоночные животные, обитающие на дне водоемов) проводили на р. Кан (приток Енисея в его среднем течении). Донные организмы способствуют естественному самоочищению вод и являются хорошими индикаторами происходящих изменений внешней среды, в том числе и антропогенного характера. Кроме того, зообентос – важнейшая составляющая кормовой базы всех видов сибирских рыб.

Анализ биотических взаимодействий внутри бентосных сообществ проводился по двум показателям: численность основных таксономических групп ( $N$ , экз./м<sup>2</sup>) и их доля в общей численности зообентоса ( $N$ , %). Использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который считался значимым при  $p < 0,05$ . При оценке степени влияния температуры воды и содержания кислорода на численность основных таксономических групп зообентоса использовался многофакторный линейный регрессионный анализ. Коэффициент детерминации считался статистически значимым при  $p < 0,05$ . Для исследования пространственной структуры донных сообществ использовалась кластеризация методом иерархической агломерации. Внутрикластерное расстояние (между станциями) рассчитывалось в евклидовой метрике, межкластерное – по методу Варда. Кластеризация проводилась по двум показателям: доля основных таксонов в общей численности зообентоса и прологарифмированная численность каждого семейства. Статистическая обработка данных про-

водилась на языке Python 3.7.2 с использованием библиотек scipy (<https://scipy.org>) и scikitlearn (<https://scikit-learn.org/>).

Общая численность зообентоса в р. Кан сформирована за счет трех отрядов насекомых: поденки и ручейники вносили по 31%, двукрылые – 23%. В низовье реки возросло количество олигохет, что связано с увеличением доли илистых фракций в гранулометрическом составе донных отложений. Анализ структуры бентосных сообществ выявил согласованное варьирование численности поденок, веснянок и ручейников (рисунок 50). Максимальный коэффициент корреляции  $R=0,65$ , соответствующий “заметной” зависимости по шкале Чеддока, выявлен для пары “поденки – ручейники”.

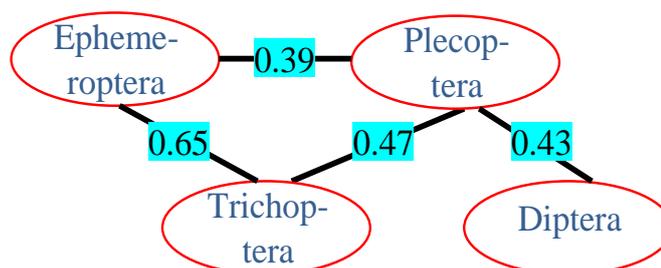


Рисунок 50. Корреляционный граф взаимодействий основных групп зообентоса (голубым выделены статистически значимые коэффициенты корреляции Спирмена при  $p<0.05$ ).

В результате линейного регрессионного анализа определена степень влияния температуры воды и содержания кислорода на численность основных таксономических групп зообентоса. Максимальная доля вариации данных объяснялась температурой воды: 23, 27 и 31% численности отрядов веснянок, двукрылых и группы “прочие” соответственно. Значения коэффициентов детерминации в отношении кислорода оказались ниже, чем для температуры. Лишь для ручейников кислород статистически значимо обуславливал 22% изменчивости их численности. Анализ структуры донных сообществ на различных участках р. Кан методом агломеративной кластеризации на основе доли крупных таксонов в общей численности зообентоса (рисунок 51а) выявил наличие четырех кластеров, каждый из которых характеризуется доминированием той или иной группы беспозвоночных (поденки, ручейники, двукрылые или “прочие”).

Кластеризация данных на уровне прологарифмированной численности семейств (рисунок 51б) выявила три кластера, которые согласуются с географическим районированием р. Кан.

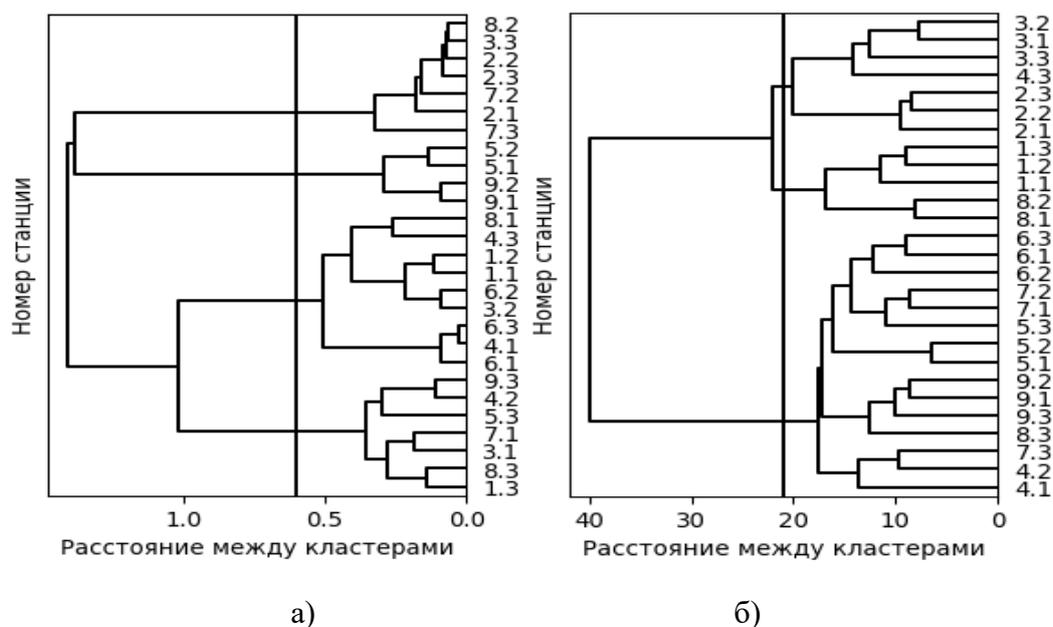


Рисунок 51 – Результаты кластерного анализа по методу Варда структурной организации сообществ зообентоса на различных станциях в р. Кан: а – по доли основных таксонов в общей численности зообентоса; б – по логарифмированной численности семейств.

*Основные публикации по разделу:*

- Андрианова А.В., Карепова Е.Д., Лепьявко М.П. Особенности пространственного распределения донной фауны в р. Кан (приток Среднего Енисея, Красноярский край) // «Вестник Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология». 2019 г. Т. 19. № 4. С. 440-452.
- Ponomareva Y., Korobko A. Analysis of spatiotemporal dynamics of phytoplankton in the up-stream of the Yenisei river (Krasnoyarsk) // CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2727, pp. 137-145.
- Andrianova A., Karepova E. Biometric data analysis for identifying features of the structural and spatial organization of hydrobiological communities // CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2727, pp. 1–7.

3.4. Оценка влияния абиотических факторов среды на функциональную активность планктонных сообществ Красноярского водохранилища

Изучение процессов развития фито- и бактериопланктона лежит в основе экологических исследований водоемов, поскольку планктонные сообщества определяют энергетическую основу круговорота вещества и энергии. Кроме того, основной практический интерес к изучению фитопланктона связан с тем, что его интенсивное развитие летом, называемое цветением воды, приводит к заметному ухудшению качества воды в водоемах. Учи-

тывая тот факт, Красноярское водохранилище является источником питьевой воды, поддержание его состояния и функционирования является первоочередной задачей экологического мониторинга.

На начальном этапе работ была сформирована единая база данных рядов натуральных наблюдений за 2000-2017 гг. по содержанию растворенного кислорода в водной среде, биологического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>), численности и биомассы бактериопланктона, доминантно-видового состава, численности и биомассы фитопланктона, продукционной активности фитопланктона в русле и заливах средней части Красноярского водохранилища с привязкой станций отбора проб к лоции Красноярского водохранилища в летний период с учетом уровня водонаполнения водотока, сроков летнего периода. Проанализирован состав и структура первичных данных экспедиционных наблюдений Красноярского водохранилища, по результатам анализа выполнено построение концептуальной модели данных, разработана реляционная схема хранения первичных данных экспедиционных наблюдений.

Анализ базы данных с использованием метода кластерного анализа выявил влияние уровня воды в водохранилище на размерные характеристики и численность клеток фитопланктона, выражающееся в обратной зависимости от водности (Рис. 52). Максимальная численность и биомасса фитопланктона наблюдается в маловодные годы. При анализе видового состава выявлено, что увеличение численности достигается за счет прироста сине-зеленых водорослей, а диатомовые не имеют характерных зависимостей от уровня наполнения водохранилища. Обратная зависимость между размером клеток фитопланктона и водностью года может свидетельствовать как о росте самой клетки, так и о смене видового состава фитопланктона при низком уровне наполнения водохранилища.

Основным показателем, характеризующим интенсивность развития водорослей, является коэффициент фотосинтетической активности (КФА), отражающий интенсивность использования водорослями световой энергии. Выявлено, что пики роста КФА (в 2011 и 2014 гг.) обусловлены многоводностью предшествующего года. Концентрация хлорофилла «а» также имела схожий характер изменения в межгодовой динамике. Пиковые значения концентрации хлорофилла и фотосинтетической активности фитопланктона могут указывать на начало “цветения” водохранилища. Высокие значения концентрации хлорофилла «а» соответствуют заливам, где вода более прогрета и скорость течения меньше чем в русле.

Продукционные и количественные характеристики бактериопланктона заметно изменяются в течение внутригодового вегетационного периода, возрастая от июня к августу на порядок и более. Показано, что в вегетационный период значение БПК<sub>5</sub> снижается от

июня к августу, но зависимости значений БПК<sub>5</sub> от температуры воздуха в летний период не отмечено. Однако оценка изменения значений БПК<sub>5</sub> от начальной равновесной концентрации кислорода в воде выявила прямо пропорциональную зависимость, что определяет опосредованное влияние температуры воды на процессы БПК. Таким образом, межгодовые изменения нивелируются и менее четко выражены без учета сроков вегетационного периода. Выявлено, что при увеличении водности увеличивается сапробность, которая является показателем качества воды, т.е. при увеличении уровня воды происходит снижение класса качества.

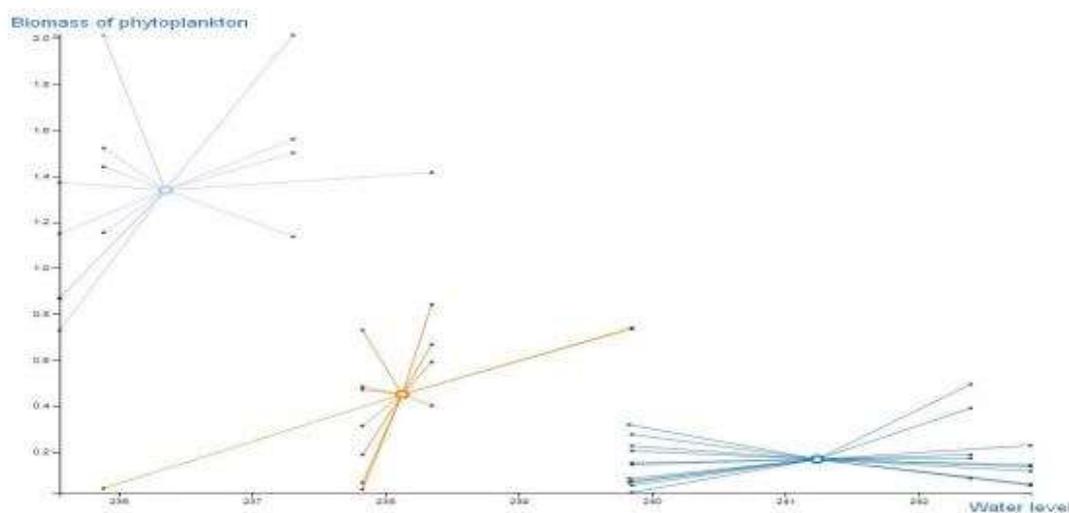


Рисунок 52 – Изменение биомассы фитопланктона в зависимости от уровня воды в Красноярском водохранилище.

Таким образом, изменения продукционной активности и числовых значений фито- и бактериопланктона не совпадают в межгодовой динамике. Следовательно, влияние абиотических факторов на них различно, что необходимо учитывать в дальнейших прогнозных оценках и при создании комплексной аналитической модели функционирования водохранилища. Особо пристального внимания и дальнейшего глубокого анализа заслуживает проблема вероятного “цветения” Красноярского водохранилища.

*Основные публикации по разделу:*

- Postnikova P., Korobko A., G. Makarskaya G. Analysis of the influence of abiotic factors on the functional activity of plankton communities of the Krasnoyarsk reservoir // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2018 Conference Proceedings, 2018, Vol. 18, Issue 3.1, p. 47-54.

### 3.5. Анализ кинетики образования свободных радикалов у амфипод из разнотипных водных объектов

Особое значение в поддержании гомеостаза гидробионтов и проявлении у них адаптационных потенций как в природных, так и в антропогенно измененных условиях среды обитания играют механизмы регуляции кислородного метаболизма. В настоящее время метаболическая антиоксидантная система (АОС) считается ключевым звеном адаптационных процессов, а ее активация рассматривается как универсальный отклик биоты на агрессивное воздействие окружающей среды. Сбои или отсутствие антиоксидантного статуса приводят к развитию окислительного стресса, возникновению и накоплению окислительных повреждений и в конечном итоге – возникновению патологических изменений. Использование компонентов АОС в качестве биомаркеров стрессовых воздействий на гидробионтов активно внедряется и имеет большие перспективы в системе мониторинга водных экосистем.

Проведена сравнительная оценка кинетики свободно-радикальных процессов в тканях амфипод из разнотипных водных объектов. Для определения антиоксидантной активности использовали метод люминолзависимой хемилюминесценции при инициации окислительного стресса *in vitro* перекисью водорода, который позволяет получить интегральную характеристику активности всего комплекса контроля радикалообразования исследуемого объекта. Амфипод отлавливали в среднем течении р. Енисей (выше и ниже г. Красноярска), р. Ус (природный парк Ергаки), в Хакасских озерах Иткуль (охраняемая зона Хакасского заповедника, пресное), Власьево (умеренносолоноватое), Шунет, Белё и Шира (слабосоленые, активно используются в рекреационных целях).

Были выявлены отличия кинетики изменения скорости образования и дисмутации свободных радикалов у амфипод, обитающих в отличающихся по гидрохимическим характеристикам водоемах (рисунок 53). У амфипод *Gammarus lacustris* отмечается снижение максимальной интенсивности и объема генерации свободных радикалов с увеличением содержания сульфатов, хлоридов и повышением рН в среде их обитания, что свидетельствует о более высокой активности антиоксидантных систем в тканях гаммарид и согласуется с данными повышенного содержания ферментов АОС у амфипод в соленой водной среде.

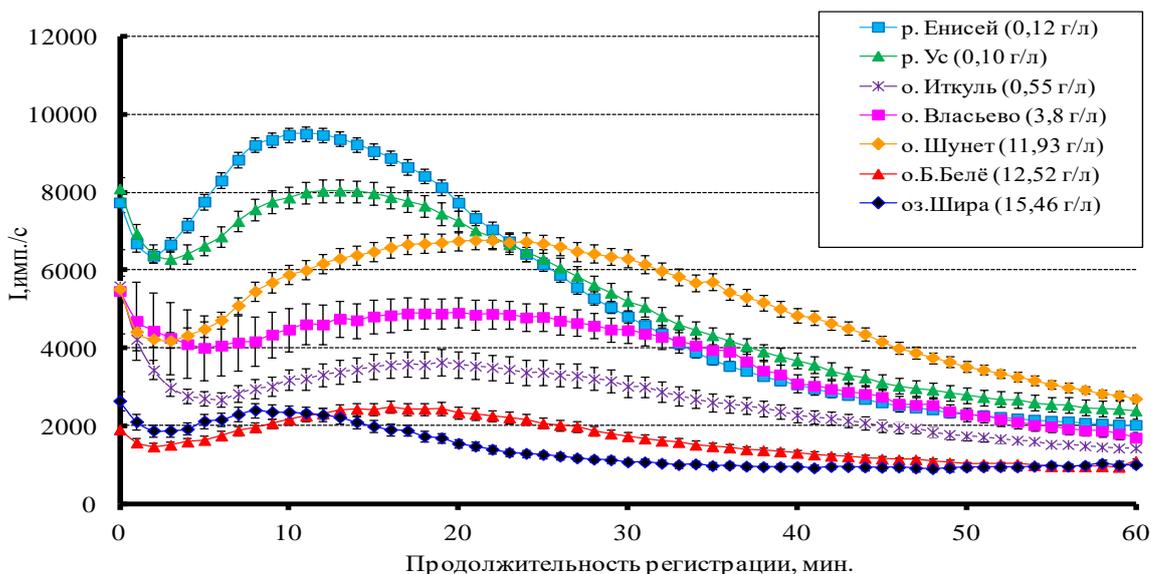


Рисунок 53 –Хемилуминесцентная кинетика радикалообразования у амфипод из водоемов с разной минерализацией.

Видовая специфика кинетики радикалообразования у амфипод может определяться степенью адаптированности вида к функционированию в определенных экологических условиях. Судя по объему и максимальной интенсивности образующихся радикалов, у *G. lacustris* система антиоксидантной защиты надежнее контролирует всплеск образования свободных радикалов в тканях особей, обитающих в озерах Белё и Шира, чем у особей из озер Власьево и Шунет (рисунок 54).

По величине времени достижения максимума антиоксидантная система одновидовых особей из оз. Белё более реактивна, чем у особей из более соленого оз. Шира. Достоверные отличия параметров кинетики генерации свободных радикалов у амфипод из речных систем и пресного оз. Иткуль вероятно связаны не только с разным видовым составом анализируемых особей, но и с различиями по температурным, гидрохимическим и гидродинамическим характеристикам мест обитания. Возрастная динамика процессов генерации свободных радикалов более выражена у *Gammarus* гр. *pulex* из р. Ус, у амфипод из оз. Иткуль, *G. lacustris* из оз. Белё. При этом, с возрастом наблюдалось увеличение максимальной интенсивности и объема генерации свободных радикалов (рисунок 54) у амфипод из пресноводных экосистем и снижение значения этих же характеристик для амфипод из оз. Белё при сокращении времени достижения максимума. Данный факт, очевидно, связан с возрастным изменением количественного содержания и функциональной активности компонентов антиоксидантной системы.

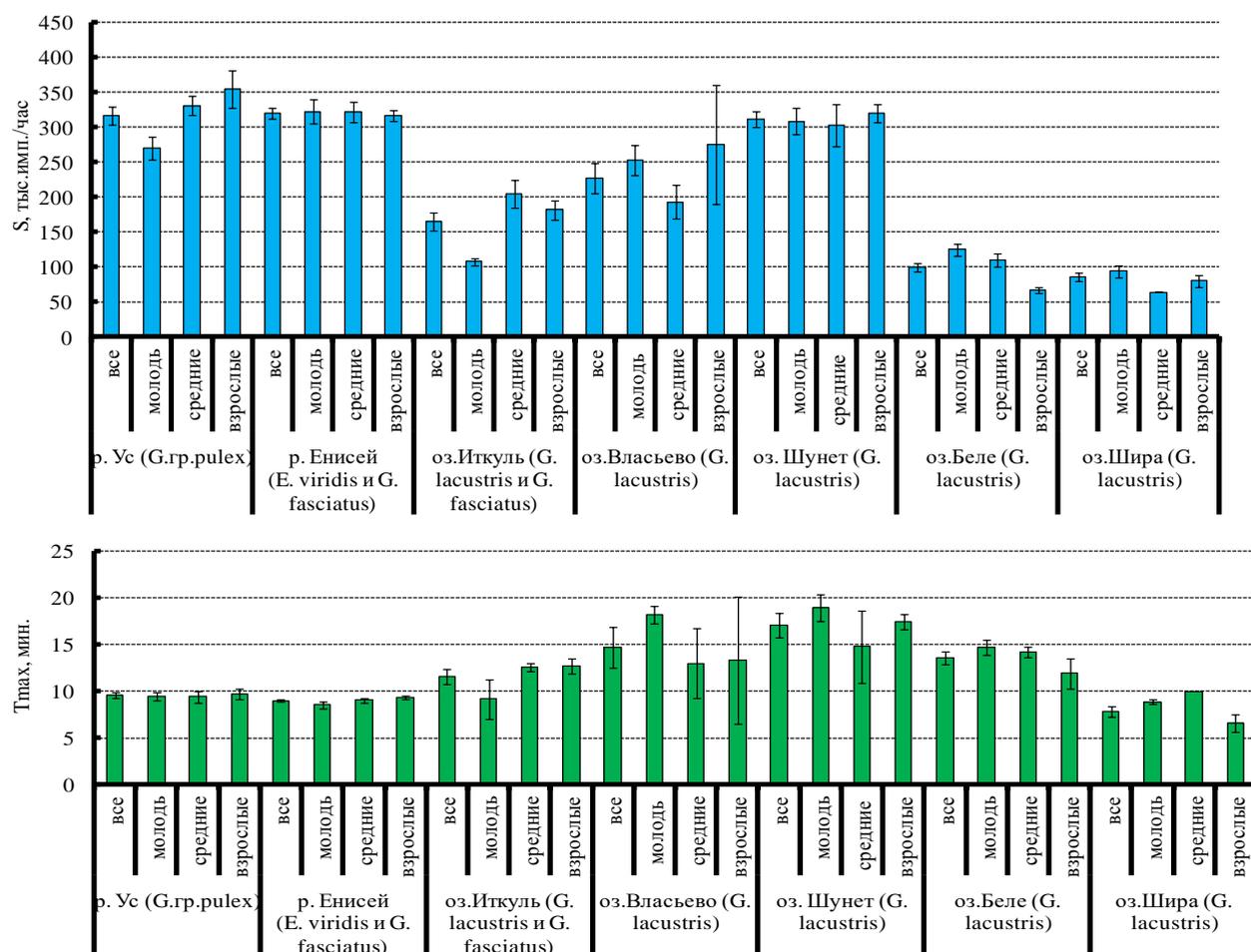


Рисунок 54. Параметры кинетики радикалообразования в тканях амфипод из различных водных экосистем при инициации оксидативного стресса.

Таким образом, выявлено, что у одновидовых амфипод (*G. lacustris*) из различных природных водоемов происходит снижение максимальной интенсивности и объема генерации свободных радикалов с увеличением содержания сульфатов, хлоридов и повышением pH в среде их обитания.

Основные публикации по разделу:

- Fedotova A.S., Turitsina E.G., Makarskaya G.V., Tarskikh S.V. Kinetics of formation of reactive oxygen species by blood cells when exposed to ultra-low doses of ionizing radiation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 315(6). 042017.

## 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.

Для прикладных геоинформационных веб-систем, систем мониторинга окружающей природной среды реализовано специализированное программно-технологическое, информационно-вычислительное обеспечение, ориентированное на решение широкого спектра научных и прикладных задач. Спроектированы и внедрены алгоритмы и модели данных, библиотеки программных компонент и аналитические сервисы.

В результате проведенных исследований разработан ряд оригинальных физико-математических моделей, оригинальных методик и методов обработки данных наземных наблюдений и дистанционного зондирования Земли. Ведется успешная разработка приборно-измерительного обеспечения для систем оперативного мониторинга параметров атмосферы.

Проведены исследования тепловых аномалий г. Красноярска и его окрестностей. Результаты показали, что использование сочетания спутниковых данных различного пространственного разрешения дает возможность проведения детального анализа температурных аномалий городской среды. Такая информация может быть использована при планировании развития города, освоении новых территорий, реконструкции жилых и производственных зон, для оценки комфортности условий жизни в различных городских районах.

Создан комплекс программно-технических средств для проведения оценки загрязнения атмосферы промышленного города. Решены задачи модернизации ранее созданного программного обеспечения для сбора, агрегации и визуализации данных оперативного экологического мониторинга на основе технологий геопортала ИВМ СО РАН. Разработанные типы данных и сервисы геопортала обеспечили возможности эффективной высокопроизводительной обработки данных, создания нового поколения веб-приложений. Они стали основой системы научно-исследовательского мониторинга загрязнения атмосферы г. Красноярска, получившей широкую известность последний год.

Создан публичный веб-интерфейс информационно-аналитической системы мониторинга воздуха в г. Красноярске, информация в которую поступает с распределенных по городу станций мониторинга. Выполнен анализ данных многолетних наблюдений по состоянию атмосферы в г. Красноярске в показателях устойчивого развития. Исследованы воз-

возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для рассматриваемых задач оценки состояния окружающей природной среды. В результате анализа данных установлены характерные метеорологические условия, определяющие возникновение смога над городом. Созданная сеть научно-исследовательского мониторинга позволила провести исследование пространственно-временной динамики загрязнения атмосферы города взвешенными частицами PM<sub>2.5</sub>.

На основе материалов экспедиционных исследований сформирована геопространственная база данных с результатами гидробиологического мониторинга р. Енисей от истока до устья, которая размещена на геопортале ИВМ СО РАН. Выполнено наполнение базы геоданных актуальными сведениями о пространственной динамике байкальских эндемичных амфипод в р. Енисей, распространившихся далеко за пределы оз. Байкал не только вниз, но и вверх по течению.

Проанализированы структурная организация и пространственное распределение сообществ реофильного зообентоса, являющегося основным кормовым ресурсом для сибирских видов рыб. Полученные сведения стали основополагающими для формирования представлений о рыбохозяйственном потенциале бассейна Енисея, который оценивается как достаточно высокий. Применение биометрического анализа данных позволило выявить особенности структурной и пространственно-временной организации гидробиологических сообществ (фитопланктона и зообентоса) в бассейне Енисея.

Систематизированы результаты многолетних комплексных исследований Красноярского водохранилища, разработана реляционная схема хранения первичных данных экспедиционных наблюдений. Статистический анализ базы данных с применением метода кластеризации выявил влияние уровня воды в водохранилище на размерные характеристики, численность и биомассу клеток фитопланктона, выражающееся в обратной зависимости от водности.

В качестве биомаркеров стрессовых воздействий на гидробионтов рассмотрены компоненты антиоксидантной системы у амфипод, обитающих в разнотипных природных водоемах. Выявлено снижение максимальной интенсивности и объема генерации свободных радикалов с увеличением содержания сульфатов, хлоридов и повышением pH в среде их обитания.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Научные публикации по проекту за 2020 год

1. Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O. The state of the atmosphere in the city of Krasnoyarsk (Russia) in indicators of sustainable development // International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2020, 27 (4), 349-357. DOI: 10.1080/13504509.2019.1699879
2. Gosteva A.A., Yakubailik O.E., Shaparev N.Y. Wildfires and the spread of smoke from forest fires in the Krasnoyarsk territory in summer 2019 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062057. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062057
3. Kadochnikov A.A. Experience in the development a regional geoportal for the Krasnoyarsk region // InterCarto-InterGIS, 2020, 26, 203-214. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-203-214
4. Bondarenko E.V., Gosteva A.A., Shaparev N.Y. Thermal bar studies in the Krasnoyarsk Reservoir based on remote sensing datasets // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (5), 052039. DOI: 10.1088/1757-899X/862/5/052039
5. Erunova M.G., Yakubailik O.E. Zoning of the territory on the basis of morphometric analysis of basin geosystems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 421 (6), 062039. DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062039
6. Tokarev A.V., Shaparev N.Ya. Assessment of air pollution trends in Krasnoyarsk using indicators of sustainable development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062068. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062068
7. Tokarev A.V., Shaparev N.Ya. Assessment of the influence of weather conditions on the concentration of PM<sub>2.5</sub> in the atmosphere of Krasnoyarsk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062040. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062040
8. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Concentration of PM<sub>25</sub> in the surface layer of the Krasnoyarsk atmosphere during the winter anticyclone // Proceedings of SPIE, 2019, 11208, 112084J. DOI: 10.1117/12.2540744
9. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Concentration of particulate matter in the surface layer of the atmosphere of the village of Drokino (Krasnoyarsk territory) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862 (6), 062092. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062092
10. Ponomareva Yu.A., Andrianova A.V. Application of hydrobiological analysis for improving the efficiency of water treatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537 (6), 062040. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062040

11. Andrianova A. Characteristics of the zoobenthos communities in the mountain rivers of the Yenisei basin // International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM, 2019, V.19, No 3.1. – pp. 81-88. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.011
12. Andrianova A.V. Assessment of the ecological state of the Boguchany reservoir by zoobenthos organisms // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 548 (7), 072054. DOI: 10.1088/1755-1315/548/7/072054
13. Fedotova A.S., Makarskaya G.V., Tarskikh S.V. Turitsina E.G., Kolesnikov V.A. An impact of low doses radiation on the kinetics of reactive oxygen species generation in sheep peripheral blood // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 421, 052016. DOI: 10.1088/1755-1315/421/5/052016
14. Gerasimova L.A., Eremina I.Yu., Makarskaya G.V., Kuklina A.I. Analysis of some chemical indicators of soils of industrial-oil-polluted territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 862, 062012. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062012

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Избранные научные публикации по проекту за 2017 – 2019 годы

1. Андрианова А.В., Кареева Е.Д., Лепьяк М.П. Особенности пространственного распределения донной фауны в р. Кан (приток Среднего Енисея, Красноярский край) // «Вестник Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология». 2019 г. Т. 19. № 4. С. 440-452. DOI: 10.18500/1816-9775-2019-19-4-440-452
2. Andrianova A.V., Derbineva E.V., Gadinov A.N., Krivolutskiy D.A., Melnikov I.I. Feed base and potential fish productivity of the Yenisey basin (upstream and midstream) // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya. 2019, Issue 45, pp. 142-163. DOI: 10.17223/19988591/45/8
3. Andrianova A.V., Yakubailik O.E. (2019) Geoinformational Web-System for the Analysis of the Expansion of the Baikal Crustaceans of the Yenisei River. In: Bychkov I., Voronin V. (eds) Information Technologies in the Research of Biodiversity – Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019, pp. 125-130. DOI: 10.1007/978-3-030-11720-7\_17
4. Matuzko AK, Yakubailik OE. Assessment of thermal conditions in Krasnoyarsk urban area with use of different satellite data and geographic information system // Thermal Science, 2019, Vol. 23, Suppl. 2, pp. S615-S621. DOI: 10.2298/TSCI19S2615M
5. Shaparev, N.Y. Modelling summer water temperature on the Yenisei River // Thermal Science, 2019, Vol. 23, Suppl. 2, pp. S607-S614. DOI: 10.2298/TSCI19S2607S
6. Tokarev A, Shaparev N. Using the Monitoring Network and Geoportal Technologies to Analyze the State of the Atmosphere in Krasnoyarsk (Russia) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 516 (1), 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012045
7. Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A., Tokarev, A.V. WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(3), с. 243-249, DOI: 10.3103/S8756699018030056
8. Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O., Soldatov A. Web technologies for rapid assessment of pollution of the atmosphere of the industrial city // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 363(1), 012034, DOI: 10.1088/1757-899X/363/1/012034
9. Андрианова А.В., Якубайлик О.Э. Геоинформационная база данных для анализа пространственного распределения байкальских эндемичных амфипод в р. Енисей // Вычислительные технологии 2018, т. 23, № 4, с. 5-14. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.16487

10. Andrianova A.V., Yakubailik O.E., Shan'ko Y.V. Modern data on the spatial distribution of the Baikal amphipods in the Yenisei River and their visualization in the geoinformational web system // Russian Journal of Biological Invasions. Vol. 9. № 4. pp. 299–312. DOI: 10.1134/S2075111718040021
11. Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2018, 11(8), 934-945. DOI: 10.17516/1999-494X-0115.
12. Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Мониторинг температуры земной поверхности территории Красноярска и окрестностей на основе спутниковых данных Landsat 8 // Успехи современного естествознания, 2018, № 7, С. 177-182. DOI: 10.17513/use.36822.
13. Шапарев Н.Я., Шокин Ю.И. Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии, 2018, Т. 23, № 6. С. 108-115. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.010.
14. Shaparev N.Ya., Andrianova A.V. The Yenisei river in terms of sustainable water management // Geography and Natural Resources, 2018, V. 39, No. 4, pp. 307-315. DOI: 10.1134/S1875372818040030.
15. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N. Dynamics of PM2.5 concentration in the atmospheric surface layer over Krasnoyarsk in winter (2017-2018) // Proceedings of SPIE, 2018, Vol. 10833, article 108338Y. DOI: 10.1117/12.2505205.
16. Ivanova Y., Kovalev A., Yakubailik O., Soukhovolsky V. The use of satellite information (MODIS/Aqua) for phenological and classification analysis of plant communities // Forests, 2019, 10(7), 561. DOI: 10.3390/f10070561
17. Sadovsky M.G., Bukharova E.B., Tokarev A.V., Yakubailik O.E. Mathematical modelling of Krasnoyarsk transportation web: Preliminary results // Journal of Siberian Federal University - Mathematics and Physics, 2018, 11(4), pp. 438-448. DOI: 10.17516/1997-1397-2018-11-4-438-448
18. Krasnoshchekov K.V., Yakubailik O.E. Assessment of air pollution in Krasnoyarsk based on satellite data of different spatial resolution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062083. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062083
19. Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062051. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062051
20. Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., Zavoruev V.V., Yakubailik O.E. Prototype of city environmental monitoring system based on geoportal technologies // IOP Conference Series:

- Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062052. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062052
21. Kadochnikov A., Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O. Software tools for web mapping systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 516(1), 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012007
  22. Yakubailik O., Romas'ko V., Pavlichenko E. Complex for reception and real time processing of remote sensing data // E3S Web of Conferences, 2019, 75, 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/20197503003
  23. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. Development of computational technologies and software for assessment of air pollution in Krasnoyarsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1), 012080. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012080
  24. Yakubailik O. Backbone mapping resources, services and applications for information support of regional management // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(2.2), pp. 103-110. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2/S08.014
  25. Kadochnikov A.A. Application of geoinformation technologies for arranging a satellite monitoring system // Geodezia i Kartografia, 2019, 80(1), pp. 110-118. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-110-118
  26. Tokarev A.V., Shaparev N.Ya. Analysis of the state of the air environment in Krasnoyarsk based on atmospheric pollution indexes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062055. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062055
  27. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., Yakubailik O.E. Assessment of the possibility of using CityAir air monitoring station in environmental engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 537(6), 062053. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062053
  28. Shaparev N.Y., Shokin Y.I., Yakubailik O.E. Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei river (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 211(1), 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012022