

Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) [Электронный ресурс]: Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием (22-25 августа 2023 г., г. Бердск). Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. 407 с.

Сборник трудов подготовлен по результатам работы всероссийской конференции с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2023), которая проходила в г. Бердске на базе парк-отеля «Хвоя» с 22 по 25 августа 2023 г. В сборнике представлены результаты исследований по 4 направлениям: интегрированные геоинформационные технологии и системы в задачах мониторинга; оперативный региональный спутниковый мониторинг окружающей среды; моделирование и мониторинг экологических и техногенных процессов и систем; фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Сборник будет полезен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, занимающихся проблемами мониторинга окружающей среды. Материалы сборника публикуются в авторской редакции.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Шокин Ю.И. академик РАН, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Заместители председателя:

Альт В.В. академик РАН, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем
СФНЦА РАН

Бычков И.В. академик РАН, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова
СО РАН

Потатуркин О.И. д.т.н., проф., Институт автоматизации и электротехники СО РАН

Члены программного комитета:

Винокуров Ю.И. д.г.н., проф., Институт водных и экологических проблем СО РАН

Гордов Е.П. д.ф.-м.н., проф., Институт мониторинга климатических и экологических систем
СО РАН

Добрецов Н.Н. к.г.-м.н., Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Жумагулов Б.Т. академик НАН Республики Казахстан

Калимолдаев М.Н. академик НАН Республики Казахстан, Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК

Лагутин А.А. д.ф.-м.н., проф., Алтайский государственный университет

Лупян Е.А. д.т.н., проф., Институт космических исследований РАН

Москвичев В.В. д.т.н., проф., Красноярский филиал ФИЦ ИВТ

Пестунов И.А. к.ф.-м.н., Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Потапов В.П. д.т.н., проф., Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ

Пузанов А.В. д.б.н., проф., Институт водных и экологических проблем СО РАН

Резник А.Л. д.т.н., проф., Институт автоматизации и электротехники СО РАН

Русаков С.Г. чл.-корр. РАН, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Сергеев В.В. д.т.н., проф., Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева

Смагин С.И. чл.-корр. РАН, Вычислительный центр ДВО РАН

Сойфер В.А. академик РАН, Институт систем обработки изображений РАН

Спектор А.А. д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет

Стемпковский А.Л. академик РАН, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Суторихин И.А. д.ф.-м.н., проф., Институт водных и экологических проблем СО РАН

Тулохонов А.К. академик РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН

Фаворская М.Н. д.т.н., проф., Институт информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева

Цибульский Г.М. д.т.н., проф., Институт космических и информационных технологий СФУ

Чимитдоржиев Т.Н. д.ф.-м.н., Институт физического материаловедения СО РАН

Шайдунов В.В. чл.-корр. РАН, Институт вычислительного моделирования СО РАН

Якубайлик О.Э. к.ф.-м.н., Институт вычислительного моделирования СО РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Цифровые двойники для современной климатологии <i>Гордов Е.П.</i>	7
Комплексная оценка предприятий горнопромышленного комплекса на основе методов аэрокосмического зондирования <i>Потапов В.П., Шокин Ю.И.</i>	14
Аналитическое исследование моделей глубокого обучения для создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения <i>Фаворская М.Н.</i>	17
Информационно-вычислительное обеспечение мониторинга атмосферы г. Красноярск <i>Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик Т.В., Заворуев В.В.</i>	26

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА

Подсистема работы с информационными продуктами о концентрации малых газовых составляющих в атмосфере Земли в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и опыт ее использования <i>Бриль А.А., Бурцев М.А., Константинова А.М., Мазуров А.А., Лупян Е.А.</i>	34
Оценка видового состава и состояния древостоев по изображениям сверхвысокого разрешения с использованием контуров отдельных деревьев <i>Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Сафонова А.Н., Мельник П.Г.</i>	40
Сравнительная оценка алгоритмов топографической коррекции мультиспектральных снимков <i>Добрецов Н.Н., Манасян Т.Л.</i>	48
Геоинформационная веб-система для решения задач экологического мониторинга Обь-Иртышского речного бассейна <i>Донцов А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Ловцкая О.В.</i>	51
Разработка ПО для вычисления температуры поверхности по данным Landsat 8-9 <i>Зайцев Н.Е., Гостева А.А., Матушко А.К.</i>	57
Технология совместной обработки радарных и мультиспектральных спутниковых снимков для обнаружения потенциальных оползневых зон <i>Замараев Р.Ю., Попов С.Е.</i>	63
Тренды и сезонные изменения радарного вегетационного индекса $dpRVI$ ALOS PALSAR-1/2 на тестовых участках соснового леса и молодняка <i>Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Балтухаев А.К.</i>	69
Интеллектуальный анализ больших объемов данных при построении прогнозных гидрологических моделей <i>Кирста Ю.Б., Трошкова И.А.</i>	75
Возможности использования технологии объектного мониторинга для исследования районов расположения крупных антропогенных объектов <i>Константинова А.М., Лупян Е.А., Кашицкий А.В., Саворский В.П.</i>	82
Трехканальная согласованная фильтрация малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых матричным фотоприемником <i>Косых В.П., Громилин Г.И., Яковенко Н.С.</i>	87
Оптимизация высоты расположения антенны при регистрации интерференционных рефлектограмм от ледового покрова с использованием сигналов навигационных спутников в диапазоне L1 <i>Макаров Д.С., Харламов Д.В., Малимонов М.И.</i>	93
Облачный сервис обработки данных рефлектометрии и радиопросвечивания сигналов навигационных спутников <i>Малимонов М.И., Макаров Д.С., Харламов Д.В.</i>	99

Методы глубоко обучения для прогнозирования гибели леса вследствие жизнедеятельности серой цапли (<i>Ardea Cinerea</i>), по данным БПЛА <i>Матко Е.В., Сафонова А.Н.</i>	104
Расчет вертикальных смещений земной поверхности на разрезе «Бачатский» на основе контейнерной обработки радарных данных <i>Милов Л.С., Попов С.Е.</i>	110
Подход к построению графиков повторяемости землетрясений с учетом неопределенностей в оценке магнитуд и изменением представительности каталога во времени <i>Миронов В.А., Перетокин С.А., Симонов К.В.</i>	115
Разработка методов и алгоритмов предварительного анализа данных аэромагнитной разведки полезных ископаемых <i>Морозов Ю.В., Мурасев А.А., Спектор А.А.</i>	120
Web-сервис для предоставления спутниковой информационной продукции <i>Пермяков Е.В., Амикишиева Р.А., Косторная А.А.</i>	127
Организация распределенной многопоточной обработки спутниковых данных в интересах систем мониторинга окружающей среды <i>Прошин А.А., Кобец Д.А.</i>	132
Определение породы дерева по данным БПЛА в задаче лесной таксации на территории Кузнецовского плато <i>Пятаева А.В., Гулютин Н.Н., Михалев А.С.</i>	137
Исследование нейросетевых моделей для процесса измерения параметров многофазного потока со скважины <i>Сидоров А.В., Будников К.И.</i>	143
Подбор архитектуры и параметров нейронных сетей для оценки качества природно-техногенных вод <i>Счастливец Е.Л., Юкина Н.И.</i>	149
Разработка программно-технологического решения для формирования локального архива данных модели GFS <i>Токарев А.В.</i>	156
Улучшение разрешения снимков ДЗЗ на основе глубоких генеративно-состязательных сетей <i>Фаворская М.Н., Пахирка А.И.</i>	163
Использование машинного обучения в задачах детектирования и мониторинга атмосферных явлений <i>Чурсин В.В., Косторная А.А., Голомолзин В.В.</i>	169
Анализ и обработка данных зондирования становлением поля в задаче рудной геофизики <i>Штабель Н.В.</i>	174

ОПЕРАТИВНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Применение методов машинного обучения для моделирования первичной валовой продукции для территории Алтайского края и Новосибирской области <i>Волков Н.В., Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю.</i>	180
Температура поверхности Новосибирской области по данным дистанционного зондирования Terra/MODIS <i>Воронина П.В.</i>	187
Использование методов машинного обучения для оценки экстремально низких температур в приземном слое воздуха в зимнее время по данным спутниковых СВЧ наблюдений <i>Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А., Волков Н.В.</i>	194
Содержание метана в стратосфере средних широт северного полушария в 2003-2021 гг. по данным спутниковых наблюдений <i>Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А., Волков Н.В.</i>	202

Оценка пространственно-временного распределения потоков метана по спутниковым данным и прогнозам по модели переноса и диффузии <i>Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.</i>	209
Сезонные изменения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое южной оконечности Телецкого озера по данным экспедиционных измерений и дистанционного зондирования <i>Суторихин И.А., Донцов А.А., Кириллов В.В., Литвиненко С.А.</i>	215

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Дифференцированное внесение удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН <i>Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П.</i>	221
Модели регрессии для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха города Красноярска <i>Володько О.С., Буряк Н.А., Полянчикова Д.В., Дергунов А.В.</i>	226
Возможности тепловых космических снимков при анализе городской территории <i>Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э.</i>	231
Сравнение температуры приземного слоя атмосферы по данным реанализа NCEP GFS и профилемера МТП-5 в Красноярске в зимний период <i>Дергунов А.В., Якубайлик О.Э.</i>	237
Анализ космоснимков системы разломов Алтае-Саянской сейсмоактивной области на основе алгоритмов Шиарлет-преобразования <i>Кабанов А.А., Зотин А.Г., Симонов К.В., Кругляков А.С.</i>	244
Комплексный анализ данных наземных постов наблюдений и данных глобальных моделей погоды и осадков <i>Кадочников А.А.</i>	251
Экспериментальное изучение влияния мелкомасштабных агроклиматических флуктуаций на ростовые характеристики посевов и сравнение с данными беспилотных измерений <i>Картушинский А.В., Картушинский С.А., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В.</i>	258
Мониторинг и анализ изменений техногенно-нарушенных территорий <i>Колесников А.А., Косарев Н.С.</i>	263
Оценка качества воздуха Красноярска по среднемесячным значениям PM _{2.5} <i>Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э.</i>	268
Динамика первичной продукции для оценки запасов углерода аграрного региона по данным MODIS <i>Красноярцева Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н.</i>	273
Организация каталога данных информационной системы аграрного мониторинга <i>Кузнецова А.С., Пушкарев А.А., Якубайлик О.Э., Ерунова М.Г.</i>	278
Оценка плавучести дымовых шлейфов от высотных труб по спутниковой информации <i>Леженин А.А., Рапута В.Ф., Амикишиева Р.А.</i>	284
Разработка программно-аппаратного комплекса для фенотипирования стресса зерновых культур по гиперспектральным изображениям <i>Максимов Л.В., Гурова Т.А., Елкин О.В.</i>	289
Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе данных Landsat <i>Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Ермаков Н.Б., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С.</i>	294
Математическая оценка эффективности применения технологий дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве на базе единой цифровой платформы управления отраслью <i>Меденников В.И.</i>	305

Комбинированное использование спутниковых радарных и мультиспектральных данных для определения возможных зон подземных пожаров <i>Миков Л.С.</i>	311
Принципы организации мониторинга для обеспечения безопасности территорий <i>Ничепорчук В.В.</i>	316
Проблемы навигационно-гидрографического мониторинга в условиях антропогенного воздействия <i>Пилипенко Т.В., Ботвинков И.В., Калашиников А.А.</i>	322
Оценка полевой всхожести подсолнечника и обнаружение сорняков по RGB-изображениям сверхвысокого разрешения с использованием глубокого обучения для разных агротехник (классическая плоскорезная обработка и система «No-Till») <i>Пестунов И.А., Овчарова Н.В., Калашиников Р.А., Беляев В.И., Радчиков А.Н., Рогозная А.О.</i>	327
Разработка аналитического модуля для системы аграрного мониторинга <i>Пушкарев А.А., Кузнецова А.С., Якубайлик О.Э.</i>	336
Оценка влажности почвы в районе Кулундинской степи по радарным данным на основе множественной регрессии <i>Родионова Н.В.</i>	342
Технология очистки пароперегревателей на угольных котлах ТЭЦ <i>Фаворский В.С.</i>	349
Экспериментальное исследование распространения газовых выбросов при техногенных катастрофах <i>Фаворский В.С.</i>	354
Точность описания температуры воздуха и осадков глобальным климатическим архивом CRU TS на сельскохозяйственных территориях Красноярского края <i>Якубайлик Т.В.</i>	361

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Информационная поддержка комплексного геофизического мониторинга БПТ <i>Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В., Семинский И.К.</i>	368
Комплексный мониторинг опасных геологических процессов на территории юга Байкальской рифтовой системы <i>Гладкочуб Д.П., Саньков А.В., Саньков В.А., Добрынина А.А.</i>	376
Результаты спутникового радиолокационного мониторинга динамики ледовых блоков центральной части оз. Байкал <i>Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н.</i>	379
Аномалии микросейсмических шумов как предвестник опасных геологических процессов <i>Добрынина А.А., Саньков В.А., Саньков А.В., Король С.А., Борняков А.С.</i>	384
Проблемы мониторинга и экологической обстановки Байкальской природной территории на примере участка р. Селенга и р. Турка особой экономической зоны «Байкальская гавань» <i>Пилипенко Т.В., Кудряшов А.Ю., Ревазов Д.Е.</i>	388
Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод в 2012-2023 гг. (центральная часть Байкальской рифтовой системы) <i>Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Чувашова И.С., Борняков С.А.</i>	392
Вибрационные волны в системе литосфера-атмосфера-гидросфера <i>Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В., Шиманская Г.М.</i>	396
Алгоритмы уточнения модели прибрежного рельефа по результатам воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки <i>Хмельнов А.Е., Гаченко А.С.</i>	403

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ КЛИМАТОЛОГИИ

Гордов Е.П.^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Томский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Томск

Обсуждается перспективный для использования в климатологии и ее приложениях подход – уже широко используемая в различных областях концепция «цифрового двойника». В частности, обсуждаются проекты создания цифрового двойника всей планеты, одним из ожидаемых результатов которых будет возможность получения ответов на актуальные вопросы современной климатологии: «Кто виноват?» и «Что делать?». Также, достаточно детально представлена постановка задачи и первые результаты разработки цифрового двойника такой значимой для формирования климата экосистемы, как болото, который является существенным элементом создаваемой в рамках ВИП ГЗ «Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации» информационно-аналитической системы мониторинга и прогноза пулов и потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири.

Ключевые слова: цифровой двойник, климат, большие гео-привязанные данные, потоки и пулы углерода.

DIGITAL TWINS FOR MODERN CLIMATOLOGY

Gordov E.P.^{1,2}

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk

² Tomsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Tomsk

A promising approach for use in climatology and its applications is discussed – the concept of a "digital twin" already widely used in various fields. In particular, projects of creating a digital twin of the entire planet are being discussed, one of the expected results of which will be the possibility of getting answers to topical questions of modern climatology: «Who is to blame?» and «What to do?». Also, the first results are presented of development of a digital twin for a swamp, which is very important ecosystem for climate formation. The digital twin is an essential element of the information and analytical system for monitoring and forecasting pools and fluxes of greenhouse gases in forest and swamp ecosystems of the South taiga zone of Western Siberia. This information and analytical system is created within the framework of the most important innovative project of national significance «National System for Monitoring Carbon Pools and Greenhouse Gas fluxes on the Territory of the Russian Federation».

Key words: digital twin, climate, big special data, carbon pools and fluxes.

Введение. Наблюдаемые и прогнозируемые изменения климата на первом этапе привели к бурному развитию инструментальных наблюдений характеристик окружающей среды и климатического моделирования. За последние десятилетия появились не только новые средства измерений, но целые сети (наземные, морские и космические), выполняющие скоординированные измерения большого числа величин, характеризующих состояние климатической системы. За это время модели общей циркуляции атмосферы трансформировались сначала в климатические модели, а в последнее время и в модели системы Земля, которые не только описывают взаимодействие всех компонент климатической системы (атмосфера, океан, литосфера, биосфера и криосфера), но и пытаются включить в описание социально-экономическую активность человечества. Все это вначале привело к взрывному росту объемов данных гео-привязанных наблюдений и моделирования и активному использованию существующих информационных технологий работы с большими пространственными данными, а затем и к развитию новых, тематически ориентированных инструментов прикладной информатики. В каче-

стве примера такой трансформации можно упомянуть во многом уже произошедшее преобразование центров хранения данных о характеристиках окружающей среды в центры их анализа, выполняемого специально разработанными информационно аналитическими системами. В ходе этих изменений нашли применения такие инструменты, как Интернет вещей, активно используемый для работы с многочисленными датчиками, суперкомпьютеры, на которых выполняется климатическое моделирование и нейронные сети (элементы искусственного интеллекта), обеспечивающие глубокий статистический анализ больших массивов данных наблюдений и моделирования.

В настоящее время областью, в которой происходит такая трансформация, является создание цифровых двойников (ЦД) климатических систем и процессов. Возникший в аэрокосмической промышленности подход [1] уже вошел в арсенал машиностроения и других отраслей промышленности и экономики, а в настоящее время активно развивается в науках об окружающей среде и климате. Широкое использование упомянутых выше элементов современных информационных технологий создает хорошую основу для этого. Так как общий анализ специфики разработки и использования ЦД в науках об окружающей среде приведен в недавно опубликованной работе [2], здесь, после обсуждения формальных определений цифрового двойника и его ключевых элементов будут представлены реализуемые в настоящее время наиболее амбициозные проекты создания цифровых двойников Земли, их цели и ожидаемые результаты их создания. Также будет представлен разрабатываемый в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации» ЦД болота, являющийся существенным элементом создаваемой информационно-аналитической системы мониторинга и прогноза пулов потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири.

Определения ЦД. Согласно ГОСТу Р 57700.37—2021 Компьютерные модели и моделирование ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ, цифровой двойник изделия — это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями. При этом, под цифровой моделью изделия понимается система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение изделия на различных стадиях жизненного цикла. ЦД может рассматриваться как цифровая копия реального объекта и происходящих с ним процессов. Одним из характерных свойств ЦД является связь реального и виртуального объектов с помощью обмена данными в режиме реального времени, которая обеспечивает их синхронизацию. Конечно, в первую очередь, данные от различных датчиков, описывающие состояние физического объекта, поступают к виртуальному, но обратный поток информации также существует и его наличие является принципиально важным для инженерных промышленных приложений. В общем случае, ЦД определяется как постоянно меняющийся цифровой профиль объекта или процесса, позволяющий пользователю, на основании анализа огромного объема исторических и актуальных данных, полученных в ходе измерений и моделирования целого ряда показателей объекта или процесса в реальном мире, получить ответы на поставленные вопросы, и управлять как ходом, так и результатом процесса.

Основным отличием того, что подразумевается в концепции ЦД в разработках для климатологии от исходной версии, является отсутствие требования о наличии передачи в реальном масштабе времени информации от виртуального образа к реальному объекту/процессу. Эта важная для инженерных приложений возможность вмешательств «на ходу» к счастью или к несчастью, практически нереализуема в этой области. Здесь не всегда является важным отличие ЦД от цифровой тени (системы связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, содержащихся в данных, получаемых с реального объекта и/или от его моделей) и даже тогда, когда для анализа используются только данные наблюдений, речь идет о ЦД. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных и для которых строилась описывающая его модель. Именно такая ситуация характерна для задач климатологии.

ЦД планеты. Развитие ЦД в науках об окружающей среде и климате шло параллельно с развитием технологий больших данных [3]. Сама концепция цифрового двойника Земли предусматривает конвергенцию данных "Большой Земли" с моделями, основанными на физике, в интерактивной вычислительной среде, которая позволяет осуществлять мониторинг и прогнозирование экологических и социальных возмущений для использования в устойчивом управлении. Хотя усвоение данных обеспечивает основу для включения наблюдений с высоким разрешением в модели земной системы, но ей не хватает интерфейса для принятия решений и способности к обучению, необходимых для цифрового двойника. Машинное обучение (и особенно глубокое обучение) в науке о системах Земли в настоящее время в большей степени способно учесть высокую размерность, сложность и нелинейность реальных систем Земли и расширяет возможности обучения на основе больших данных. Прогресс в изучении причинно-следственных связей обеспечивает интерпретируемость больших данных и создает основу для решения проблемы принятия решений.

Важность исследований и разработок в направлении создания ЦД Земли определяется их ожидаемой ролью в разработке ставших актуальными стратегий адаптации к изменениям климата. Так, в новой стратегии ЕС по адаптации к изменению климата (ЕС 2021. EU Strategy on Adaptation to Climate Change ..., 2022) утверждается, что цифровые технологии, в частности, ЦД, должны обеспечивать научную основу для принятия решений на основе оценки рисков от прошлых, настоящих и возможных в будущем последствий. Первые работы в направлении получения цифровой информации о состоянии планеты и процессах, происходящих на ее поверхности и предоставления ее пользователям, по сути, начались с появлением спутников и в настоящее время ведутся всеми национальными и международными космическими центрами. Интеграция этой информации позже получила название «Цифровая Земля» (http://www.isde5.org/al_gore_speech.htm). Ясно, что в этом процессе активно использовались развиваемые технологии больших данных и, наверное, наиболее масштабный проект, направленный на получение нового знания о состоянии и функционировании нашей планеты с использованием современных информационных технологий работы с данными реализуется консорциумом 8 организаций Ассоциации Гельмгольца в области наук о Земле и окружающей среде в проекте с тем же названием. Подход и первые результаты этого проекта представлены в недавно опубликованной монографии [4].

Следующим шагом в направлении использования больших данных в климатологии является создание ЦД нашей планеты. Он должен удовлетворять следующему набору требований. Это должна быть интерактивная многомасштабная цифровая реплика состояний и временной эволюции всех систем Земли, которая динамически интегрирует соответствующие модели системы Земля и результаты вычислений на их основе, другие, необходимые модели, такие как модели человеческой активности, исторические (долговременные) наборы данных, непрерывные и срочные наблюдения, поддерживаемые Интернетом вещей (метео, спутники, буи, социо-экономические данные), инструменты анализа, включая искусственный интеллект. Кроме того, ЦД планеты должен позволять запуск гипотетических (что если) сценариев, который должен привести не только к пониманию возможных откликов на естественные и антропогенные процессы, но и их прогнозированию и пониманию путей к уменьшению негативных последствий [5]. Такой десятилетний проект, названный Destination Earth, Европейский Союз запустил в рамках программ Green Deal и Digital Strategy в 2021 году [6]. В результате, должна быть создана высокоточная цифровая модель Земли – цифровой двойник Земли, позволяющая максимально точно отображать развитие климата и экстремальные явления в пространстве и времени. Данные наблюдений будут постоянно вводиться в цифровой двойник, чтобы сделать цифровую модель Земли более точной для отслеживания эволюции и прогнозирования возможных будущих траекторий изменений. Но в дополнение к данным наблюдений, обычно используемым для моделирования погоды и климата, исследователи также хотят интегрировать в модель новые данные о соответствующей деятельности человека. Новая модель системы Земли будет максимально реалистично отображать практически все процессы на поверхности планеты, включая влияние человека на управление водными ресурсами, продуктами питания

и энергией, а также процессы в физической системе. На первом этапе планируется создание цифровых двойников для шести экосистем: лесов, океанов, продовольственных систем, климата, круговорота воды и Антарктики, а их последующая интеграция и даст первый вариант ЦД Земли. Создаваемый ЦД Земли объединит в себе как новейшие достижения науки, так и технологии для предоставления информации об экстремальных явлениях и изменении климата в режиме реального времени в более широкой цифровой среде. Здесь пользователи могут взаимодействовать, изменять и, в конечном счете, создавать свою собственную индивидуальную информацию. Этому способствуют сложные рабочие процессы, управляемые механизмом, который тесно связывает вычислительные ресурсы для создания цифровых данных, управляет различными схемами доступа к данным и предоставляет широкий спектр инструментов для облегчения взаимодействия с пользователями и передачи данных [7].

Следует добавить, что в мире реализуются и другие проекты, направленные на создание и использование ЦД Земли. Так, в США была представлена вторая версия проекта Energy Exascale Earth System Model (E3SM), представляющая собой цифрового двойника Земли для моделирования климата (<https://www.llnl.gov/news/updated-exascale-system-earth-simulations>). Эта модель *позволяет более реалистично моделировать настоящее, что дает больше уверенности при моделировании будущего, а увеличение вычислительной мощности позволяет детализировать процессы и их взаимодействия, что приводит к более точным и полезным результатам моделирования. Работы в этом направлении ведутся и в НАСА* (<https://esto.nasa.gov/earth-system-digital-twin>). Также NVIDIA объявило о планах по созданию цифрового двойника Земли с помощью платформы Omniverse. Для этого компания строит ИИ-суперкомпьютер Earth-2 предназначенный для моделирования изменений климата на цифровом двойнике Земли (<https://www.nvidia.com/en-us/high-performance-computing/earth-2>). Считается, что это позволит перейти в климатическом моделировании от пространственного разрешения 10-100 км к сотням и десяткам метров, необходимым для моделирования изменений в глобальном круговороте воды – движения воды из океана, морского льда, поверхности суши и грунтовых вод через атмосферу и облака и моделирования облаков, отражающих солнечный свет обратно в космос.

Цифровые двойники планеты могут революционизировать стратегии смягчения последствий изменения климата. Предоставляя точную и актуальную картину состояния окружающей среды, они могут помочь в разработке стратегий по сокращению выбросов и содействию устойчивому развитию. По мере того, как цифровые двойники получают все более широкое распространение, они станут важным инструментом не только для преодоления климатического кризиса, но и для достижения целей устойчивого развития [8].

ЦД болота. Как и все живое, болота – это экосистемы, депонирующие углерод и их важной особенностью, определяющей роль болот в углеродном цикле, является то, что образующийся в ходе из развития торф депонирует поглощенный из атмосферы углерод надолго. Для мониторинга и прогноза пулов потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири – задачи, решаемой ИМКЭС СО РАН в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации», необходимо разработать информационно-аналитическую систему, обеспечивающую заинтересованные стороны всей необходимой количественной информацией. Болота занимают значительную часть этой территории и для корректного учета современного и возможного в будущем вклада этой климатически существенной экосистемы в баланс климатически активных веществ разрабатывается ЦД болота и платформа его сопровождения.

Первым этапом работы является «оцифровка» всех доступных результатов наблюдений объекта (картирование, геоботанические описания, характеристики почвы, запасы торфа, гидрология, и т.п.) и организация оцифрованных данных и имеющихся (уже цифровых) доступных данных инструментальных наблюдений и моделирования (измерения и моделирование гидрометеорологических характеристик, потоков парниковых газов и т.п.) в реляционные базы данных, обеспечивающие централизованный сбор, хранение, поиск, выборку данных и

метаданных собранных характеристик объекта. Использование универсального SQL интерфейса обеспечивает основу для автоматизированного обновления и унифицированной комплексной обработки данных разных источников. Ключевым этапом создания ЦД является подбор математических моделей основных процессов формирования потоков парниковых газов. Для вычисления по заданному атмосферному форсингу локальных и площадных гидротермических характеристик почвы, включая потоки тепла и влаги, выбрана модификация модели поверхности суши ИВМ РАН – МГУ [9]. Ее функция здесь – это вычисление гидротермодинамических характеристик, влияющих на потоки парниковых газов, и результаты выполняемых измерений используются только для ее валидации и коррекции результатов моделирования. Основной моделью ЦД является эмпирическая модель потоков парниковых газов [10]. Эта модель позволяет определять потоки парниковых газов по заданным или измеряемым микрометеорологическим характеристикам и потоковым данным камерных и пульсационных измерений. Существенным этапом решения поставленных задач и создания, в конечном счете, прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных экосистем на основе цифрового двойника, является разработка необходимых сервисов и создание гибкой программной инфраструктуры цифровой платформы сопровождения цифрового двойника экосистемы. Это сервисы пополнения баз данных, запуска моделей, архивации и анализа результатов вычислений, в частности, вычисления потоков парниковых газов для заданных интервалов времени (30 минут, сутки, декада, месяц, вегетационный сезон и год) на ключевых участках и на выбранной территории и сервисы, обеспечивающие визуализацию полученных результатов на выбранной картографической основе и доступ к ним различных групп пользователей. Информационно-аналитическая система должна объединить эти сервисы и обеспечить возможность ее эффективного использования различным группам пользователей (опытным и начинающим исследователям, и лицам, принимающим решения) для получения достоверных количественных оценок пулов и потоков углерода в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири и их отклика на происходящие изменения климата. Возможность анализа откликов потоков на реализацию того или иного сценария изменения климата обеспечивается использованием в качестве форсинга результатов климатического моделирования.

Основой выполняемой разработки являются подходы и инструменты, созданные в процессе разработки прототипа цифровой исследовательской и образовательной платформы (виртуальной исследовательской среды) анализа и прогнозирования процессов, идущих в окружающей среде региона под влиянием глобальных изменений веб-ГИС Климат [11] (<http://climate.scert.ru>). Это, в частности, сервисы, предоставляющие доступ к климатическим и метеорологическим компонентам цифрового профиля объекта окружающей среды [12], обеспечивающие прослеживаемость изменения ее характеристик, сервис, обеспечивающий доступ к вычислительным мощностям, функционирующий по модели «on demand» и позволяющий пользователю выполнять вычисления, необходимые для анализа выбранных характеристик объекта, с помощью проверенных алгоритмов [13], сервис, позволяющий разработчику быстро включать в вычислительный конвейер новые элементы и добавлять новые архивы геопривязанных данных [14], а также, платформенные технологии управления процессами моделирования и данными, и вычислительными ресурсами.

К настоящему времени выбрана общая архитектура прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов болотных экосистем на основе цифрового двойника в виде концептуальной диаграммы. Основными программными компонентами комплекса являются структурированные архивы пространственных данных и их метаданные, вычислительное ядро, геопортал и веб-клиент ГИС. Вычислительное ядро является независимым программным компонентом, функциональность которого реализуется различными модулями, связанными унифицированным программным интерфейсом (API). Вычислительные модули ядра представляют собой набор независимых классов, реализованных на языке Python, которые обеспечивают численную обработку

пространственных данных, хранящихся в сетевом хранилище. Вычислительное ядро реализует архитектуру «клиент-сервер» и функционирует под управлением геопортала, решая задачи, определяемые пользователем через графический интерфейс веб-клиента ГИС. Геопортал комплекса включает веб-портал, реализующий серверные веб-приложения в виде независимых PHP-классов, связь с веб-сервисами OGC и базой метаданных; репозитарий Geoserver, содержащий базовые картографические слои (виды растительности, климатические зоны, ДЗЗ). Картографической основой этого является цифровая карта наземных экосистем [15], разработанная ИКИ РАН. Геопортал будет предоставлять авторизованным пользователям картографические веб-приложения для работы с пространственными данными на основе OGC WMS, WFS, и будет обеспечивать работу с цифровым двойником болотных экосистем в рамках прототипа информационно-аналитической системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов.

Также выполнен сбор, обработка и интеграция архивных данных о характеристиках и динамике болотных экосистем, пулах углерода и потоках парниковых газов, включая данные о структурных и продукционных характеристиках и факторах их динамики. Подготовлена для запуска в рамках модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ модель биогеохимического цикла для болотных экосистем и подготовлены данные для ее тестирования на болотах разного типа.

Общая часть работы выполнена в рамках тем FWNW-2021-0006 и FWRG-2021-0004. Раздел о ЦД болота выполнен в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Grieves M.* Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // White Paper / Melbourne, FL, USA, Florida Institute of Technology. 2014. P. 1-7.
- [2] *Gordov E.P.* Digital twins of systems and processes as an instrument of modern climatology // *Fundamental and Applied Climatology*. 2023. Vol. 9, N 3. P. 269-297. DOI:10.21513/2410-8758-2023-3-269-297.
- [3] *Li X., Feng M., Ran Y., Su Y., Liu F., Huang C., Huanfeng S., Xiao Q., Su J., Yuan, S., Guo H.* Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin // *Nat Rev Earth Environ*. 2023. V. 4, P. 319-332. DOI:10.1038/s43017-023-00409-w.
- [4] *Bouwer L.M., Dransch D., Ruhnke R., Rechid D., Frickenhaus S., Greinert J.* Integrating Data Science and Earth Science Challenges and Solutions // *Springer Briefs in Earth System Sciences*. Springer, 2022. ISSN:2191-589X. eISSN:2191-5903. ISBN:978-3-030-99545-4. eISBN:978-3-030-99546-1. DOI:10.1007/978-3-030-99546-1.
- [5] *Bauer P., Dueben P.D., Hoefler T., Quintino T., Schulthess T.C., Wedi N.P.* The digital revolution of Earth-system science // *Nature Computational Science*. 2021. V.1. P.104-113.
- [6] *Bauer P., Stevens B., Hazeleger W.* A digital twin of Earth for the green transition // *Nat. Clim. Change* 2021. V.11, P.80-83. DOI:10.1038/s41558-021-00986-y.
- [7] *Wedi N., Quintino T., Modigliani U., Baousis V., Geenen T., Sandu I., Bauer P., Hoffmann J., Thiemert D.* Destination Earth: Digital Twins of the Earth System // *EMS Annual Meeting*. 2022. Bonn. Germany. 5-9 Sep 2022, EMS2022-26. DOI:10.5194/ems2022-26.
- [8] *Hassani H., Huang, X., MacFeely S.* Enabling Digital Twins to Support the UN SDGs // *Big Data Cogn. Comput.* 2022. V.6, P.115. DOI:10.3390/bdcc6040115.
- [9] *Богомолов В.Ю., Дюкарев Е., Степаненко В.М.* Моделирование температурного и влажностного режима болотных и минеральных почв в модели деятельного слоя с учетом изменения термодинамических свойств почвы по глубине // *Избранные труды Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2020*. Томск: ЦНТИ, 2020. С. 92-96.

- [10] *Дюкарев Е.А.* Моделирование сезонного хода углеродного обмена в болотных экосистемах // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1, № 5. С. 56-61.
- [11] *Гордов Е.П., Гордова Ю.Е., Окладников И.Г., Рязанова А.А., Титов А.Г.* Веб-ГИС платформа «Климат» для исследования климатических процессов и откликов на них: потенциал и перспективы // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 02. С. 132-135. DOI:10.15372/AOO20220208.
- [12] *Okladnikov I., Titov A.* Approach to automation of spatial data processing for climate research // Proceedings of International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2022. Tomsk: TsNTI, 2022. P. 416-418
- [13] *Рязанова А.А., Окладников И.Г., Гордов Е.П.* Интеграция современных статистических инструментов анализа экстремальных явлений в веб-ГИС систему «КЛИМАТ» // Труды международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «СITES-2017». Томск: ЦНТИ, 2017. С.139-140.
- [14] *Okladnikov I.G.* Representation of spatial data processing pipelines using relational database // Supercomputing frontiers and innovations. 2021. V.8, No.4. P.40-49.
- [15] *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Потапов В.П.¹, Шокин Ю.И.²

¹ Кемеровский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Кемерово

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

В настоящей работе рассматриваются вопросы использования средств аэрокосмического зондирования для решения задач по оценке степени техногенного воздействия предприятий горнопромышленного комплекса на окружающую среду. Авторы выделяют три масштаба, которые с одной стороны оценивают размеры оцениваемых территорий, а с другой стороны каждый из масштабов имеет свои средства оценки конкретных физических процессов, связанных с изменением окружающей среды и массива горных пород, подвергаемых техногенному воздействию.

На основе многолетнего опыта исследований, авторы приводят разнообразные примеры использования средств аэрокосмического зондирования для задач горного производства. В работе делается вывод о эффективности использования данных методов, а также обсуждаются дальнейшие перспективы их применения в задачах нелинейной геомеханики.

Ключевые слова: аэрокосмическое зондирование, спектральный анализ, радарная интерферометрия, техногенное воздействие, нелинейная геомеханика горного массива, подземные пожары.

INTEGRATED ASSESSMENT OF MINING ENTERPRISES ON THE BASIS OF AEROSPACE SENSING METHODS

Potapov V.P.¹, Shokin Yu.I.²

¹ Kemerovo Branch of the Federal Research Center of the Information and Computational Technologies, Kemerovo

² Federal Research Center of the Information and Computational Technologies, Novosibirsk

In this paper, the use of aerospace sensing tools to solve problems in assessing the degree of technogenic impact of mining enterprises on the environment is considered. The authors distinguish three scales, which, on the one hand, estimate the size of the assessed territories, and on the other hand, each of the scales has its own means assessment of specific physical processes associated with changes in the environment and rock massifs subjected to technogenic impact.

Based on many years of research experience, the authors give a variety of examples of the use of aerospace sensing tools for the problems of mining production.

The paper makes a conclusion about the effectiveness of using these methods, and discusses further prospects for their application in the problems of nonlinear geomechanics.

Keywords: aerospace sensing, spectral analysis, radar interferometry, technogenic impact, nonlinear geomechanics of rock mass, underground fires.

Введение. Существующие сегодня горнопромышленные предприятия (разрезы, шахты, рудники, карьеры) представляют собой пространственные социально-природно-техногенные комплексы, чаще всего занимающие большие территории земной поверхности и активно воздействующие на состояние окружающей среды, массива горных пород, социальное состояние общества в заданном районе. Отслеживать интегральное воздействие таких объектов достаточно сложно и поэтому, на помощь приходят методы аэрокосмического зондирования, как с использующие космические спутники, так и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Диагностика состояния сложных протяженных техногенных объектов может проводиться мультиспектральной, гиперспектральной и радарной аппаратурой, при том, что каждая из них имеет свою специфику применений и используется для замеров определенных характеристик, как самого предприятия, так окружающей его природной среды.

Средства, подходы, модели. При оценке пространственных техногенных объектов, можно выделить три масштаба, каждый из которых отвечает за определенное состояние и степень воздействия объекта на систему. Это прежде всего мегамасштабы, которые характерны для наблюдений аппаратами с разрешением от нескольких километров до сотен метров на пиксель. (MODIS, ASTER и другие)

Макромасштабы от десятков метров до десятых долей метров – аппаратура среднего и высокого разрешения (Sentinel, Landsat, WordView).

Микромасштабы – аппараты сверхвысокого разрешения, дроны, БПЛА.

Каждый из масштабов может отвечать за группу соответствующих явлений либо глобального, либо регионального плана.

Более мелкие масштабы будут соответствовать степени локализации того или иного явления, например, загрязнения окружающей среды, но могут распространяться на большие расстояния и приводить к переходу на иной масштаб.

Например, такие процессы, как обрушение, смещение части горного массива будет соответствовать макромасштабу, а оползень может соответствовать мегамасштабу. Микромасштабы связаны в основном наблюдениями с помощью дронов и БПЛА и фиксируют изменения на небольших участках, до 10 м. Для геомеханических процессов более характерно использование макро и микромасштабов, но в тоже время, для продолжительных по времени, изменения среды будут уже переходить на глобальный масштаб.

Для оценки самих процессов, в горнопромышленных регионах, фиксируемых аэрокосмическими методами можно конкретизировать определенные их типы:

- геомеханические;
- экологические;
- комплексные (когда идет взаимодействие нескольких физических процессов – пожары и вызванные ими смещения – как термомеханические процессы, загрязнения почвы отвалами геомеханика + экология).

Для геомеханических явлений, основные наблюдения проводятся на макромасштабном уровне и с ориентацией на методы радарной интерферометрии, когда отслеживаются смещения в районах проводимых горных работ. Значительно реже встречаются случаи районов с активной сейсмикой, но это, в основном оценка постпроцессовых изменений, когда исследуются ретроспективные временные ряды в районах произошедших событий. Для примера, мы таким способом изучали оползневые явления, или катастрофу в Норильске, где температурные изменения привели к разрушению топливных баков.

В таком случае, целесообразно комбинировать геомеханические данные с метеорологическими данными. Детализация характерных взаимосвязей поможет в изучение влияния климатических изменений на геомеханические процессы.

Сегодня, нами формируются направления, основанное на применении БПЛА для изучения геомеханических процессов. Проводится анализ снимков методами искусственного интеллекта и для каждого процесса строится специализированная нейронная сеть с соответствующей архитектурой.

Отметим, разрабатывая данное направление, основанное на методах машинного зрения, мы пришли к выводу, что основная часть работы связана с формированием наборов размеченных данных, настраиваемых на архитектуру нейронной сети. Сама технология создания нейронной сети, уже достаточно автоматизирована за счет применения программных средств типа AutoML [1] и специализированных фреймворков. Однако подготовка исходящих данных (их разметка) достаточно длительный процесс, отнимающий значительную часть времени разработки. Следует отметить, что даже наличие специализированных баз данных незначительно упрощает подготовку датасетов. Выбор архитектуры нейронной сети средствами AutoML достаточно эффективен, однако, настройка самой сети, точнее ее гиперпараметров, процесс интерактивный и также может занять определенное время. И однако, несмотря на популярность и автоматизацию имеющихся технологии создания нейронных сетей, они до сих пор остаются «черным ящиком», так как объяснение результатов, полученных при их применении, все равно

остаётся за исследователем. Поэтому, у нас есть надежда на такие методы как *interability* и *explainability* (интерпретируемость и объясняемость) [2], которые начинаем использовать, помогут более детально получать эффективные результаты

Как мы уже указывали, для каждой группы процессов, существует комплекс методов обработки пространственных данных дистанционного зондирования, которые можно эффективно использовать именно с учетом специфики проблемной области [3]. Например, для процессов рекультивации нарушенных земель, наиболее эффективно применять спектральные методы и связанные с ними технологиями обработки, использующие разнообразные индексы, основанные на комбинации каналов. Для исследования оползней и других процессов наиболее подходят радарные данные и основанные на них методы радарной интерферометрии. На рис. 1 приведена концептуальная схема применения данных аэрокосмического зондирования, применительно к процессам происходящим в ходе добычи и переработки полезных ископаемых, используемая для нескольких регионах страны.

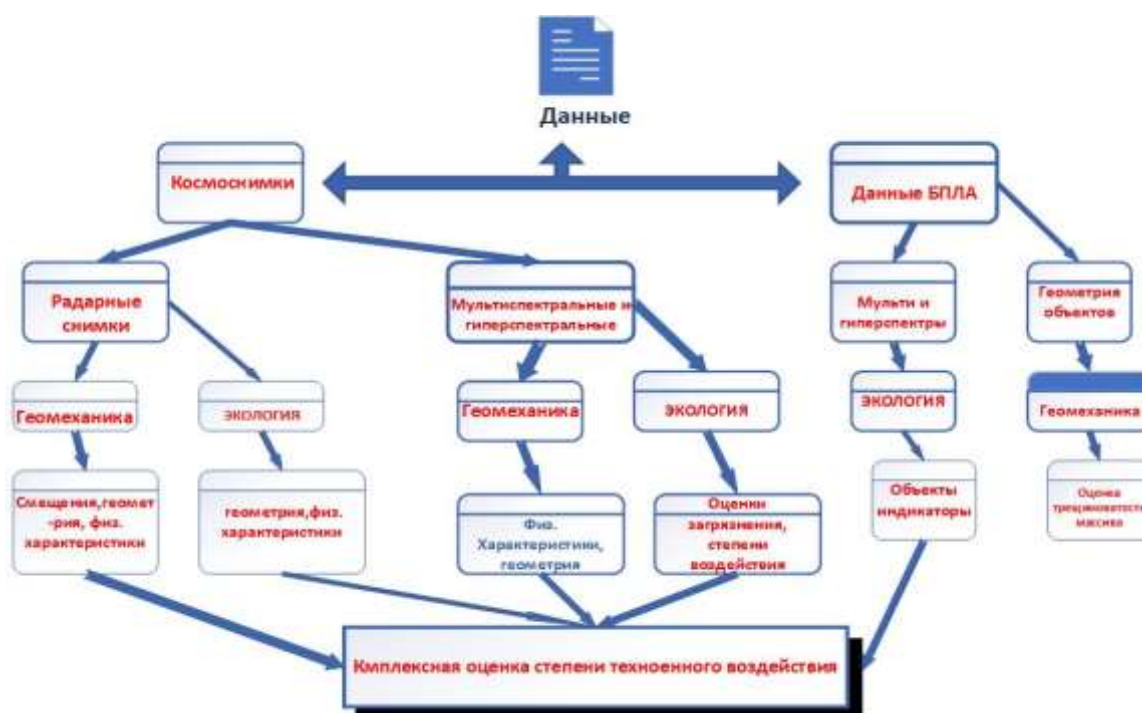


Рис. 1. Концептуальная схема обработки аэрокосмических данных для задач горнодобывающего комплекса

Заключение. Авторами работы на протяжении многих лет использовался подход, основанный на прилагаемой схеме при обработке многочисленных данных (радарных, мультиспектральных, аэрофотосъемки) для решения широкого круга задач, связанных с оценкой параметров геомеханических, геодинамических и экологических процессов, возникающих при добыче полезных ископаемых в социально-природно-техногенных системах. Используемые и созданные в ходе проведения исследований, методы показали свою высокую эффективность их применения. При этом, некоторые задачи другими методами просто не могли быть решены, что еще раз показывает возможности исследованного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Masood A. Automated Machine Learning. Pact Publishing, Birmingham, UK, 2021. 292 p. ISBN:978-1-80056-768-9.
- [2] Masís S. Interpretable Machine Learning with Python. Pact Publishing, Birmingham, UK, 2021. 710 p. ISBN:978-1-80020-390-7.
- [3] Oparin V.N., Potapov V.P., Kiryaeva T.A. New Methods and Information Technologies in Experimental Geomechanics. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2021. 293 p. DOI:10.53954/9785604642856.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СНИМКОВ ДЗЗ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Фаворская М.Н.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск

Глубокие нейронные сети оказали существенное влияние на развитие методов создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения, позволяя находить приближенные решения некорректной задачи реконструкции по одному исходному снимку малого разрешения. Существуют два основных подхода – на основе сверточных нейронных сетей и генеративно-сопоставительных нейронных сетей, причем последние демонстрируют лучшие результаты восстановления. В докладе представлен аналитический обзор решений на основе глубоких моделей, предложенных в последние годы, приведена краткая характеристика наборов снимков ДЗЗ, а также сформулированы основные тенденции в данной области.

Ключевые слова: спутниковые снимки, сверхвысокое разрешение, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, генеративно-сопоставительные нейронные сети.

ANALYTICAL STUDY OF DEEP LEARNING MODELS FOR THE PROBLEM OF REMOTE SENSING SINGLE IMAGE SUPER RESOLUTION

Favorskaya M.N.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies, Krasnoyarsk

Deep neural networks have had a significant impact on the development of methods for creating super-resolution remote sensing images, making it possible to find approximate solutions to an ill-posed reconstruction problem from a single low-resolution image. There are two main approaches – based on convolutional neural networks and generative adversarial neural networks, the latter ones show the best recovery results. The report presents an analytical study of solutions based on deep models proposed in recent years, provides a brief description of remote sensing datasets, and also formulates the main trends in this field.

Keywords: satellite images, super-resolution, deep learning, convolutional neural networks, generative adversarial neural networks.

Введение. Снимки ДЗЗ высокого разрешения востребованы в задачах мониторинга окружающей среды, разведки ресурсов, военной разведки и т.д. Считается, что технология сверхвысокого разрешения является экономичным подходом улучшения спутниковых снимков, которая способна преодолеть технические ограничения устройств захвата изображений. Отправной точкой развития такой технологии явилась необходимость улучшения разрешения снимков ДЗЗ Landsat [1]. Методы создания снимков сверхвысокого разрешения классифицируются по количеству входных изображений как методы на основе одного изображения (так называемые методы SISR, Single Image Super-Resolution) и методы, использующие в качестве входных данных несколько изображений или кадров (методы MISR, Multi Image Super-Resolution). Отметим, что обе постановки задачи являются некорректными с математической точки зрения, так как реконструировать из одного или нескольких снимков низкого разрешения (low-resolution images, LR images) можно несколько вариантов снимка сверхвысокого разрешения (super-resolution image SR image), близкого к реальному снимку высокого разрешения (high-resolution image, HR image) по объективным характеристикам. Технология MISR использует несколько LR снимков, полученных под разными углами, которые содержат больше информации, чем одиночный снимок и, следовательно, лучше аппроксимируют SR снимок. Однако из-за сложностей получения нескольких LR снимков одной и той же местности обычно используется технология SISR.

Эволюция методов создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения на основе глубокого обучения. Известны три вида технологии SISR: на основе интерполяции, реконструкции и обучения. Обычно методы на основе интерполяции (билинейной, бикубической, Ланцоша) используются в качестве предварительной обработки для методов, основанных на реконструкции и обучении. Методы, основанные на реконструкции, применяют априорную информацию. Методы, основанные на обучении, используют информацию в пределах одного снимка или наборы данных для отображения взаимосвязи между снимками высокого и низкого разрешения. При этом методы, основанные на глубоком обучении, можно рассматривать как гибридные методы, основанные на реконструкции и обучении.

Быстрое развитие моделей глубокого обучения оказало сильное влияние на методы машинного зрения, в частности, на проблему создания снимка ДЗЗ высокого разрешения с использованием технологии SISR. В первых работах использовались сверточные нейронные сети (СНС). Они выполняли реконструкцию, применяя пары LR-HR ландшафтных изображений. Исследования показали, что использование различных моделей СНС даже с применением трансферного обучения на естественных ландшафтных снимках не приводит к хорошим результатам. Появление генеративно-сопоставительных сетей (ГСС) внесло существенный вклад в улучшение проблемы SISR. Классической ГСС является модель SRGAN [2], предложенная в 2017 г. Следует отметить, что ГСС постепенно вытесняют СНС, т.к. способны повышать разрешение в большее число раз, сохраняя визуальное восприятие.

Постановка задачи. Для задачи SISR создание снимка ДЗЗ сверхвысокого разрешения означает восстановление HR снимка ДЗЗ из соответствующего LR снимка, что можно записать в следующей форме:

$$I_{LR} = \Psi(I_{HR}, \delta),$$

где I_{LR} и I_{HR} – снимки низкого разрешения и высокого разрешения соответственно, Ψ – деградационная функция, δ – параметры понижающей дискретизации.

Проблема SISR относится к обратным задачам, означающая восстановление снимка сверхвысокого разрешения I_{SR} из снимка низкого разрешения I_{LR} :

$$I_{SR} = \Psi^{-1}(I_{LR}, \theta) = F(I_{LR}, \theta),$$

где θ – параметры модели сверхвысокого разрешения F .

В общем случае, процесс обучения заключается в минимизации функции потерь $Loss$ путем оптимизации параметров θ модели F . Процесс оптимизации можно представить как:

$$\hat{\theta} = \arg \min (Loss(I_{SR}, I_{HR})).$$

При обучении с учителем требуется создание пар изображений HR-LR. Однако зачастую снимки HR недоступны. Поэтому исходные снимки ДЗЗ считают изображениями HR, а затем создают снимки LR, например, методом бикубической интерполяции с коэффициентом масштабирования s :

$$I_{LR} = \downarrow_s (I_{HR}),$$

где \downarrow_s – оператор понижения размерности.

Однако этого, как правило, недостаточно для создания реальной деградационной модели. Так, некоторые исследователи [3] понижают размерность, используя фильтры Гаусса с добавлением размытия и шума

$$I_{LR} = \downarrow_s (I_{HR} \otimes k) + n,$$

где символ \otimes означает оператор свертки, k – ядро размытия, n – шум.

Отметим, что обучение сетей ГСС не является тривиальным и зависит, прежде всего, от исходного набора данных. При наличии снимков ДЗЗ высокого разрешения рекомендуется схема, представленная на рисунке 1а, в противном случае (рисунок 1б) процесс усложняется.

В обоих случаях для минимизации потерь приходится сравнивать восстановленные генератором изображения с имеющимися изображениями из набора данных. Для набора данных,

содержащих снимки высокого разрешения I_{HR} , минимизируются потери $\min Loss(I_{SR}, I_{HR})$, где I_{SR} – реконструированное изображение сверхвысокого разрешения. Для набора данных, содержащих снимки низкого разрешения I_{LR} , минимизируются потери $\min Loss(I'_{SR}, I_{LR})$, где I'_{SR} – уменьшенное до размеров снимка I_{LR} реконструированное изображение I_{SR} .

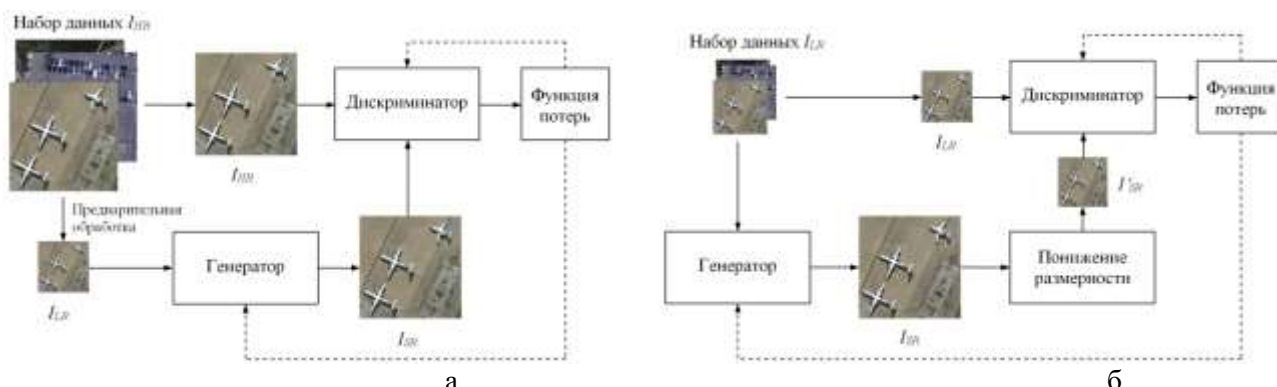


Рис. 1. Концептуальная схема обучения сетей ГСС: а) исходный набор снимков ДЗЗ высокого разрешения, б) исходный набор снимков ДЗЗ низкого разрешения.

Анализ моделей ГСС для создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения. Начиная с 2017 г., появилась возможность применения ГСС для решения проблемы SISR в виде модели SRGAN [2]. Однако только в 2019 г. была разработана архитектура ГСС для восстановления снимков ДЗЗ. В таблице 1 представлено соотношение моделей СНС и ГСС для решения проблемы SISR снимков ДЗЗ по годам. Из таблицы 1 видно, что ГНС начали активно применяться с 2020 г., постепенно вытесняя СНС. Далее приведем краткую характеристику архитектурных решений на основе моделей ГСС.

В работе [4] была представлена ГСС на основе трансферного обучения: модель TGAN (Transferred Generative Adversarial Network) сначала обучалась на наборе данных DIV2K, а затем дообучалась на наборе данных ДЗЗ. Это позволило превзойти результаты модели SRGAN. Восстановлению контуров спутниковых изображений ДЗЗ в условиях шума посвящена работа [5]. Авторами предложена модель EEGAN (Edge-Enhancement GAN), улучшающая контуры. Архитектура EEGAN состоит из двух подсетей: сверхплотной подсети (UDSN, UltraDense SubNetwork), извлекающей признаки, и подсети улучшения контуров (EESN, Edge-Enhancement SubNetwork). Особенностью ГСС на основе плотной остаточной сети (DRGAN, Dense Residual GAN) является использование иерархических особенностей изображений LR, а также механизма непрерывной памяти для повышения производительности сети [6]. Для более стабильного обучения была модифицирована функция потерь и применена модель дискриминантной сети Вассерштейна (Wasserstein GAN) с градиентным штрафом (WGAN-GP).

Как правило, снимки ДЗЗ из открытых источников имеют низкое разрешение. В работе [7] обучена улучшенная модель сверхвысокого разрешения (ESRGAN, Enhanced Super-Resolution GAN), работающая с парами изображений HR-LR, полученных со спутников WorldView и Sentinel соответственно. Модель, названная RS-ESRGAN (Remote Sensing-ESRGAN), позволяет создавать мультиспектральный снимок сверхвысокого разрешения с коэффициентом масштабирования 5. В 2022 г. авторы улучшили свой подход, разработав сеть SEG-ESRGAN (Segmentation ESRGAN) [8]. Сеть SEG-ESRGAN состоит из двух ветвей: ветви сверхвысокого разрешения, которая создает мультиспектральные изображения Sentinel-2 с разрешением 2 м (из исходных снимков Sentinel-2 с разрешением 10 м) и архитектуры кодер-декодер для ветви семантической сегментации, которая генерирует расширенную карту земного покрова. Аналогичный подход был протестирован в работе [9], где использовались снимки высокого разрешения со спутника PeruSat1 и спутника Sentinel-2. Для улучшения снимков ДЗЗ со спутника Sentinel-2 разработана двухэтапная модель ГСС сверхвысокого разрешения (TS-SRGAN, Two-Step SRGAN), использующая парные изображения LR-HR [10]. На первом этапе ГСС обучается на снимках LR. На втором этапе используется ГСС с усиленными

характеристиками восприятия. При этом ГСС имеет структуру генератора ESRGAN, извлекающего признаки сетью VGG-19, и дискриминатора PatchGAN.

Табл. 1. Модели ЧС и ГСС для восстановления снимков ДЗЗ.

Год	Модели ЧС	Модели ГСС
2016	SRCNN	
2017	RS-DRL, LGCNet	
2018	DMCN, DDRN, RSCNN	TGAN
2019	BiConvLSTM, CSAE, MRNN, RDBPN, WTCRR, MPSR, RS-RCAN, RSEB, Cycle-CNN, UDRB	EEGAN, DRGAN
2020	WDSR, PRDNN, AMFFN, EDCNN, SMSR, DSSR, PCRCAN, EUSR, CAFRN, NLASR, EBPN, MHAN, MSAN	RS-ESRGAN, SRPeruSatGAN, CCWGAN, ISRGAN, HRPGAN, EESRGAN, 3DASRGAN
2021	ERCNN, FGRDN, PMSRN, CARS, RASAF, WRSR, PGCNN, ERCNN, EIP, MIP, DRDAN, FGRDN, TransENet	SRAGAN, CGAN, SCSE-GAN, MIP, Enlighten-GAN
2022	FeNet, AMSSRN, RBAN-UNet	UVRSR, TE-SAGAN, MA-GAN, NDSRGAN, TS-SRGAN, SEG-ESRGAN, R-DHAN
2023		SA-GAN, EGASR, RaGAN

Улучшенная модель (ISRGAN, Improved SRGAN), предложенная в работе [11], предназначена для улучшения пространственного разрешения изображений растительного покрова, а также техногенных объектов. Модель была обучена на разных данных, полученных со спутников Landsat 8 OLI и GF 1, для улучшения способности к обобщению.

Архитектура каскадной условной ГСС, основанной на расстоянии Вассерштейна (CCWGAN, Cascaded Conditional Wasserstein GAN) с остаточным плотным блоком, предназначена для создания высококачественных снимков ДЗЗ [12]. Предложенный метод был проверен на наборе данных NWPU VHR-10 и показал более высокую производительность по сравнению с другими методами GAN. Авторы работы [13] представили архитектуру под названием сеть PatchGAN высокого разрешения (HRPGAN, High-Resolution PatchGAN) как модификацию сети PatchGAN. Из архитектуры HRPGAN удалены слои пакетной нормализации, а функция активации ReLU заменена функцией SELU (Scaled Exponential Linear Units). Суммарные потери определяются суммой состязательных потерь, потерь на реконструкцию и потерь регуляризации. Показано, что модель HRPGAN генерирует более разнообразные и реалистичные снимки ДЗЗ, чем бикубическая интерполяция и глубокая тензорная ГСС (Tensor GAN).

Для обнаружения малоразмерных объектов была спроектирована сквозная архитектура, состоящая из сети сверхвысокого разрешения и сети детектора (одноэтапного или двухэтапного) [14]. Модель позиционируется как ГСС сверхвысокого разрешения с улучшенными контурами (EESRGAN, Edge-Enhanced Super-Resolution GAN). Она содержит генератор, дискриминатор и сеть улучшения контуров (EEN, Edge-Enhancement Network) с применением плотных остаточных блоков. Результаты показали, что такая гибридная сеть показывает приемлемые результаты даже при небольшом объеме обучающих данных.

Как известно, гиперспектральные снимки ДЗЗ обладают более высоким спектральным разрешением по сравнению с мультиспектральными снимками ДЗЗ. Однако это достигается за счет малого пространственного разрешения из-за физических ограничений датчиков, что создает трудности для идентификации. В работе [15] был предложен новый метод создания снимков сверхвысокого разрешения за счет использования 3D свертки и механизма внимания для извлечения множественных признаков. Такая архитектура получила название 3DASRGAN (3D Attention-based Super-Resolution GAN).

Мотивацией работы [16] послужил тот факт, что на снимках ДЗЗ присутствуют разномасштабные объекты, однако их признаки учитываются одинаково и тем самым игнорируются долгосрочные зависимости. Для решения этой проблемы предлагается ГСС сверхвысокого

разрешения на основе внимания (SRAGAN, SR Attention GAN), в которой применяются как локальные, так и глобальные механизмы внимания. Локальные механизмы внимания исследуют структурные компоненты земной поверхности, требующие большего внимания, в то время как глобальные механизмы внимания используются для захвата долгосрочных взаимозависимостей в каналах и пространственных измерениях для дальнейшего уточнения деталей. Эти функции выполняет дискриминатор. При обучении минимизируется кусочно-линейная функция потерь (hinge loss), а также сумма потерь пикселей, потерь восприятия и относительных состязательных потерь. В работе [17] предложена ГСС множественного внимания (MA-GAN, Multi-Attention GAN) с достаточно сложной структурой генератора, включающего блок пирамидальной свертки на основе внимания и блок повышающей дискретизации на основе внимания. Суммарные потери вычисляются с учетом потери пикселей, состязательных потерь и потерь особенностей.

Несмотря на преимущества применения ГСС, методы SR характеризуются сильной зависимостью от изменений сцены неконтролируемой работы дискриминаторов, а также нестабильного обучения. В 2021 г. был предложен перспективный подход, основанный на каскадной ГСС (CGAN, Cascade GAN), повышающей достоверность контента [18]. Отметим, что каскадные ГСС получили широкое распространение для решения различных прикладных задач сверхвысокого разрешения.

Пространственно-канальная ГСС со сжатием и возбуждением (SCSE-GAN, Spatial and Channel Squeeze-and-Excitation GAN) предложена в работе [19]. Генератор содержит блоки SCSE после каждого остаточного блока для повторной калибровки и усиления высокочастотных деталей. Расстояние Вассерштейна со штрафом за градиент (WGAN-GP, Wasserstein distance with gradient penalty) стабилизирует процесс обучения

Своеобразный подход к обучению ГСС на парных изображениях HR-LR представлен в работе [20]. Авторы предложили новую модель обучения без учителя, названную как MIP (Migration Image Prior), которая выполняет задачи SR без парных изображений. Сначала карты случайного шума загружаются в ГСС для реконструкции, а эталонное изображение преобразуется в скрытое пространство. Затем входной шум обновляется неявным образом и внедряется в текстуру из эталонного изображения, что позволяет получить изображения LR.

Архитектура сети Enlighten-GAN предназначена для устранения артефактов на снимках ДЗЗ среднего разрешения в связи с тем, что оптические снимки ДЗЗ представляют собой гораздо более сложную картину, чем естественные изображения [21]. Авторы спроектировали специальный блок (enlighten block), который обеспечивает самоконтролируемые иерархические потери восприятия для повышения производительности. В качестве эксперимента использовались снимки со спутника Sentinel-2. Для устранения артефактов размытых контуров предложена модель ГСС с самостоятельным вниманием и улучшением текстуры (TE-SAGAN, Self-Attention and Texture Enhancement GAN) [22]. Модель использует улучшенный генератор на основе остаточного плотного блока с механизмом самоконтроля и нормализацией веса. Суммарные потери определяются по норме L1 как потери восприятия и текстуры.

В 2022 г. были предложены более сложные модели ГСС. Так, в работе [23] рассматривается новый неконтролируемый (обучение без учителя) кросс-платформенный метод сверхвысокого разрешения для реконструкции снимка ДЗЗ низкого разрешения при отсутствии снимка HR. Сеть, названная UVRSR (Unsupervised Visible image-guided Remote sensing image Super-Resolution), содержит видимую ветвь, управляемую изображением (VIG, Visible Image-Guided) и ветвь ДЗЗ, управляемую изображением (RIG, Remote sensing Image-Guided). Ветвь VIG доставляет высокочастотную информацию о текстурах и строится на основе сети CycleGAN для последующего масштабирования. Тем не менее, разрыв между реконструированными снимками SR и реальными снимками HR остается существенным, из-за чего предложена новая модель дискриминатора, управляемого доменом, на основе сети ZSSR (Zero-Shot Super-Resolution). Решение UVRSR демонстрирует очень хорошие результаты как современный непарный метод реконструкции на сложных наборах данных снимков ДЗЗ.

Специально для реконструкции реальных аэрофотоснимков LR, полученных с беспилотных летательных аппаратов, разработана плотная ГСС NDSRGAN (Novel Dense Generative Adversarial Network for real aerial imagery Super-Resolution reconstruction), использующая парные снимки HR-LR [24]. Артефакты текстуры устраняются за счет применения многоуровневых плотных блоков в генераторе, при этом дискриминатор обрабатывает фрагменты локально. Используется сглаженная функция потерь smoothL1 loss.

Для сохранения информации о текстуре при больших коэффициентах масштабирования (≥ 4) предложен новый метод сверхвысокого разрешения на основе эталонов в виде сети гибридного внимания с остаточной плотностью (R-DHAN, Residual-Dense Hybrid Attention Network) [25]. В качестве основы используется трансферная модель текстуры (SRNTT, Super-Resolution by Neural Texture Transfer), а также разработан гибридный канало-пространственный механизм внимания для фокусировки на важных фрагментах.

В работе [26] предложена модель ГСС, использующая генератор внимания второго порядка (SA-GAN, Second-order Attention GAN), который был обучен на разномасштабных снимках со спутника Gao Fen (GF). Применение механизма внимания канала второго порядка и нелокального модуля на уровне фрагментов позволяет использовать всю априорную информацию снимка LR. Качество реконструкции оценивалось по метрикам начального расстояния Фреше (FID) и визуального сходства фрагментов изображений (LPIPS, Learned Perceptual Image Patch Similarity).

Для извлечения реалистичной высокочастотной информации предлагается улучшение ГСС, основанное на концепции относительного среднего (RaGAN, Relative average GAN), с помощью разномасштабных остаточных блоков генератора [27]. Далее многомасштабные признаки объединяются в соответствии с механизмом внимания для получения контекстной информации. Дискриминатор предсказывает относительные вероятности вместо абсолютных вероятностей, что позволяет лучше изучить детали контуров и текстур.

Кросс-сенсорный метод сверхвысокого разрешения для устранения искажений между снимками, полученными от разных спутников, предложен в работе [28]. Помимо этого разработана сеть сохранения контуров с применением блока остаточного внимания (EGASR, Edge-Guided Attention-based SR). Также был сформирован кросс-сенсорный набор снимков LR/HR со спутников GF-2/GF-1 и GF-2/GF-6.

Наборы данных. Для экспериментов возможен как сбор снимков со спутников, так и использование имеющихся наборов данных. Наборы данных снимков ДЗЗ, пригодных для обучения глубоких нейронных сетей начали формироваться с 2010-х гг. Краткое описание наиболее известные из них приведено в таблице 2.

Метрики оценки изображений. Следует отметить, что помимо базовых метрик PSNR (Peak Signal-to Noise Ratio), индекса SSIM (Structural SIMilarity) и коэффициента корреляции (Correlation Coefficient) для снимков ДЗЗ применяются такие метрики, как:

1. SAM (Spectral Angle Mapper, картограф спектрального угла), оценивающий среднее значение угла между векторами. Значение SAM – среднее всех значений угла β для каждого пиксела. В идеале SAM = 0.
2. ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse, безразмерная глобальная относительная ошибка синтеза) индекс, учитывающий коэффициент масштабирования при оценке снимка сверхвысокого разрешения. Большее значение ERGAS индекса означает меньшие искажения.
3. Q2ⁿ (Universal Image Quality Index, универсальный индекс качества изображения) – комплексный показатель, учитывающий корреляцию, освещенность и контраст для мультиспектральных и гиперспектральных снимков.

Табл. 2. Краткая характеристика наборов данных.

Название	Год	Краткое описание
UC Merced Land Use	2010	Содержит 21 сцену земного покрова и техногенных объектов. Каждый класс состоит из 100 изображений разрешением 256×256 и имеет пространственное разрешение около 0,3 м
WHU-RS19	2011	Получен из Google Earth, состоит из 19 сцен, всего 950 изображений (от 50 до 61 изображения в каждой категории) разрешением 600×600
RSCCN7	2015	Содержит 2800 снимков ДЗЗ из 7 сцен. Каждая сцена имеет 400 изображений из Google Earth в 4 масштабах по 100 изображений разрешением 400×400
European Cities	2010-2015	Большая коллекция общедоступных изображений WorldView-2, предоставленных Европейским космическим агентством (ЕКА)
Brazilian coffee scene	2015	Состоит из 2 сцен (кофе / без кофе), по 1438 фрагментов размером 64×64 пикселей, вырезанных из изображений спутника SPOT в штатах Бразилии
RSC11	2016	Собран из Google Earth, содержит 11 сцен городов США (по 100 изображений в сцене) разрешением 512×512 и пространственным разрешением 0,2 м
COWC	2016	Содержит 32716 изображений автомобилей из 6 наборов (Европа, Канада, Колумбия, США) разрешением 256×256
NWPU-RESIS45	2017	Состоит из 45 классов земной поверхности по 700 изображений в каждом классе разрешением 256×256
AID	2017	Содержит 30 классов сцен ДЗЗ. Каждый класс содержит сотни изображений с разрешением 600×600 пикселей
DIV2K	2017	Содержит 1000 естественных изображений HR и соответствующих изображений LR с масштабами ×2, ×3 и ×4
Draper	2017	Содержит 324 сцены по 5 изображений в каждой. Фотографии сделаны с самолета в разное время. Изображения HR имеют разрешение 3099×2329
DOTA	2018	Содержит 15 сцен из 2806 изображений, собранных, в основном, из Google Earth. Имеется сцены с высоким разрешением (около 4000×4000)
PeruSat-1	2019	Создан из 41 снимка со спутника PeruSat-1 в виде панхроматического (с разрешением 0,7 м) и мультиспектрального (с разрешением 2,8 м) изображений
OGST	2020	Содержит снимки ДЗЗ с пространственным разрешением 30 см из района нефтеносных песков (Канада). Содержит 1671 резервуар для хранения нефти и газа

Направления дальнейших исследований. Исходя из анализа ГСС для создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения, сформулируем следующие направления дальнейших исследований:

1. Методы обучения ГСС ограничиваются в настоящее время тремя стратегиями: обучением с учителем, обучением без учителя и трансферным обучением. Прогресс в этом вопросе позволит адаптировать конкретные архитектуры ГСС под конкретные приложения.
2. Наиболее перспективным направлением развития архитектур ГСС можно считать архитектуры с применением специальных модулей и блоков, в частности, механизмов внимания. Однако для практических применений требуются упрощенные, но обеспечивающие оптимальную производительность архитектуры сетей. Также при проектировании архитектур ГСС требуется учитывать последующие применения реконструированных снимков ДЗЗ (например, визуальное улучшение, обнаружение/отслеживание объектов, сегментация и классификация).
3. Требуется разработка новых метрик и индексов, которые бы оценивали визуальное качество реконструированных изображений с точки зрения зрительной системы человека.
4. Имеющиеся наборы данных зачастую являются контентно-зависимыми, что ограничивает выбор. Не все наборы данных общего назначения содержат снимки ДЗЗ такого пространственного разрешения, которое позволяло бы решать проблему SISR с точностью,

характерной для наземных снимков. Формирование больших наборов данных, содержащих снимки HR с пространственным разрешением менее 0,3 м, позволило бы более качественно выполнять обучение ГСС.

Заключение. Модели ГСС стали одними из самых значимых достижений в области глубокого обучения за последние годы. Они используются во многих практических задачах ДЗЗ таких, как устранение шума, семантическая сегментация, обнаружение и классификация объектов. Данное исследование показало, что ГСС показывают более точные результаты относительно других методов для задачи создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Tsai R.Y., Huang T.S.* Multi-frame image restoration and registration // *Adv. Comput. Vis. Image Process.* 1984. V. 1. P. 317-339.
- [2] *Ledig C., Theis L., Huszar F., Caballero J., Aitken A., Tejani A., Totz J., Wang Z., Shi W.* Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network // *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. IEEE: Honolulu, HI, USA. P. 105-114.
- [3] *Xiao, J., Yong, H., Zhang, L.* Degradation model learning for real-world single image super-resolution // In: *Ishikawa, H., Liu, CL., Pajdla, T., Shi, J. (Eds.) Computer Vision – ACCV 2020. ACCV 2020 / 2021*. Springer: Cham. LNCS, V. 12623, P. 84-101.
- [4] *Ma W., Pan Z., Guo J., Lei B.* TGAN Images based on transferred generative adversarial network // *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2018. IEEE: Valencia, Spain. P. 1148-1151.
- [5] *Jiang K., Wang Z., Yi P., Wang G., Lu T., Jiang J.* Edge-Enhanced GAN for remote sensing image superresolution // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. N: 8. P. 5799-5812.
- [6] *Ma W., Pan Z., Yuan F., Lei B.* Super-resolution of remote sensing images via a dense residual generative adversarial network // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. N. 21. P. 2578.1-2578.14.
- [7] *Salgueiro L.R., Marcello J., Vilaplana V.* Super-resolution of Sentinel-2 imagery using generative adversarial networks // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. N. 15. P. 2424.1-2424.27.
- [8] *Salgueiro L., Marcello J., Vilaplana V.* SEG-ESRGAN: A multi-task network for super-resolution and semantic segmentation of remote sensing images // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 22. P. 5862.1-5862.28.
- [9] *Pineda F., Ayma V., Beltran C.* A generative adversarial network approach for super-resolution of Sentinel-2 satellite images // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. V. XLIII-B1-2020, 2020XXIV ISPRS Congress. Copernicus Publications: Virtual Event. P. 9-14.
- [10] *Li Y., Wang Y., Li B., Wu S.* Super-Resolution of Remote Sensing Images for $\times 4$ resolution without reference Images // *Electronics*. 2022. V. 11. N. 21. P. 3474.1-3474.21.
- [11] *Xiong Y., Guo S., Chen J., Deng X., Sun L., Zheng X., Xu W.* Improved SRGAN for remote sensing image super-resolution across locations and sensors // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. N. 8. P. 1263.1-1263.22.
- [12] *Liu B., Li H., Zhou Y., Peng Y., Elazab A., Wang C.* A super resolution method for remote sensing images based on cascaded conditional Wasserstein GANs // *2020 IEEE 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP)*. 2020. IEEE: Shanghai, China. P. 284-289.
- [13] *Sun H., Wang P., Chang Y., Qi L., Wang H., Xiao D., Zhong C., Wu X., Li W., Sun B.* HRPAN: A GAN-based model to generate high-resolution remote sensing images // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 428. P. 012060.1-012060.10.
- [14] *Rabbi J., Ray N., Schubert M., Chowdhury S., Chao D.* Small-object detection in remote sensing images with end-to-end edge-enhanced GAN and object detector network // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. N. 9. P. 1432.1-1432.25.
- [15] *Dou X., Li C., Shi Q., Liu M.* Super-resolution for hyperspectral remote sensing images based on the 3D attention-SRGAN network // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. N. 7. P. 1204.1-1204.27.
- [16] *Li Y., Mavromatis S., Zhang F., Du Z., Sequeira J., Wang Z., Zhao X., Liu R.* Single-image super-resolution for remote sensing images using a deep generative adversarial network with local and global attention mechanisms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 60. P. 3000224.1-3000224.24.

- [17] *Jia S., Wang Z., Li Q., Jia X., Xu M.* Multi-attention generative adversarial network for remote sensing image super-resolution // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 60. P. 5624715.1-5624715.12.
- [18] *Guo D., Xia Y., Xu L., Li W., Luo X.* Remote sensing image super-resolution using cascade generative adversarial nets // *Neurocomputing*. 2021. V. 443. P. 117-130.
- [19] *Moustafa, M.S., Sayed, S.A.* Satellite imagery super-resolution using squeeze-and-excitation-based GAN // *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 2021. V. 22. P. 1481-1492.
- [20] *Wang J., Shao Z., Lu T., Huang X., Zhang R., Wang Y.* Unsupervised remoting sensing super-resolution via migration image prior // *2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2021. IEEE: Shenzhen, China. P. 1-6.
- [21] *Gong Y., Liao P., Zhang X., Zhang L., Chen G., Zhu K., Tan X., Lv Z.* Enlighten-GAN for super resolution reconstruction in mid-resolution remote sensing images. *Remote Sensing*. 2021. V. 13. N. 6. P. 1104.1-1104.16.
- [22] *XuY., Luo W., Hu A., Xie Z., Xie X., Tao L.* TE-SAGAN: An improved generative adversarial network for remote sensing super-resolution images // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 10. P. 2425.1-2425.17.
- [23] *Zhang Z., Tian Y., Li J., Xu Y.* Unsupervised remote sensing image super-resolution guided by visible images // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 6. P. 1513.1-1513.22.
- [24] *Guo M., Zhang Z., Liu H., Huang Y.* NDSRGAN: A novel dense generative adversarial network for real aerial imagery super-resolution reconstruction // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 7. P. 1574.1-1574.23.
- [25] *Yu B., Lei B., Guo J., Sun J., Li S., Xie G.* Remote sensing image super-resolution via residual-dense hybrid attention network // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 22. P. 5780.1-5780.19.
- [26] *Zhao J., Ma Y., Chen F., Shang E., Yao W., Zhang S., Yang J.* SA-GAN: A second order attention generator adversarial network with region aware strategy for real satellite images super resolution reconstruction // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. N. 5. P. 1391.1-1391.26.
- [27] *Zhu F., Wang C., Zhu B., Sun C., Qi C.* An improved generative adversarial networks for remote sensing image super-resolution reconstruction via multi-scale residual block // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2023. V. 26. P. 151-160.
- [28] *Qiu Z., Shen H., Yue L., Zheng G.* Cross-sensor remote sensing imagery super-resolution via an edge-guided attention-based network // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. V. 199. P. 226-241.

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ Г. КРАСНОЯРСКА

Якубайлик О.Э., Токарев А.В., Кадочников А.А., Якубайлик Т.В., Заворуев В.В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Рассматривается разработанный аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния и оценки загрязнения атмосферы г. Красноярск, в составе которого сеть датчиков для измерения температуры воды и метеопараметров атмосферы, приборы для измерения концентрации взвешенных частиц, видеокамеры для регистрации туманов и профиломеры для регистрации вертикальных температурных профилей атмосферы, софт для анализа взаимосвязей между различными регистрируемыми характеристиками природной среды.

Ключевые слова: датчики температуры, сеть мониторинга, PM2.5, загрязнение атмосферы, инверсия температуры, туманообразование, НМУ, видеомониторинг.

INFORMATION AND COMPUTING SOFTWARE FOR MONITORING THE ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK

Yakubailik O.E., Tokarev A.V., Kadochnikov A.A., Yakubailik T.V., Zavoruev V.V.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The developed hardware and software tools for monitoring the state and assessing air pollution in the city of Krasnoyarsk is considered. These one includes a network of sensors for measuring water temperature and meteorological parameters of the atmosphere, devices for measuring the concentration of particulate matter, video cameras for recording fogs and profilers for recording vertical temperature profiles of the atmosphere, software for analyzing the relationships between various recorded characteristics of the natural environment.

Keywords: temperature sensors, monitoring network, PM2.5, air pollution, temperature inversion, fogging, adverse weather conditions, video monitoring.

Введение. Красноярск – один из крупнейших промышленных центров Сибири с развитой экономикой. Население города составляет около 1,2 млн. человек, а в Красноярской агломерации проживает более 1,5 млн. жителей. Город является крупнейшим транспортным узлом Восточной Сибири, здесь расположен ряд крупных предприятий металлургической, машиностроительной и химической промышленности.

Как и все крупные города мира, Красноярск подвержен негативному воздействию на экологическую обстановку. По данным Минприроды России – это один из лидеров в списке населенных пунктов страны с наиболее высоким показателем загрязнения атмосферы. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе обусловлен многочисленными факторами – пространственной структурой и временной динамикой загрязняющих выбросов, особенностями метеорологических условий, которые на территории г. Красноярска также обладают значительной временной и пространственной изменчивостью. Наряду с упомянутыми выше промышленными предприятиями и автотранспортом, заметный вклад в загрязнение города вносит большое количество маленьких малоэффективных котельных с невысокими дымовыми трубами [1].

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на климат г. Красноярска, является Красноярская ГЭС, расположенная в 40 км от города. Перекрытие р. Енисей плотиной Красноярской ГЭС в 1960-е годы привело к изменению температурного режима реки, рекреационных и микроклиматических условий у г. Красноярска. Температура воды стала существенно ниже летом и увеличилась в зимний период; незамерзающая зимой полынья в нижнем бьефе Красноярской ГЭС распространяется на расстояние до 300 км. Летом миллионный город потерял обычные места отдыха, а зимой открытая водная поверхность благоприятствует образованию туманов парения над рекой [2].

Особенности рельефа г. Красноярска, расположенного в долине с высокими и крутыми склонами (город географически находится в котловине), оказывают существенное влияние на динамику движения воздушных масс над городом. В многочисленных исследованиях отмечается, что в подобных условиях – в долинах – в результате термических неоднородностей генерируется локальная система ветров, создаются весьма благоприятные для накопления загрязняющих веществ условия [3]. Повышенный уровень загрязнения воздуха города Красноярска в наибольшей степени проявляется при слабых ветрах (< 3 м/с), при возникновении температурных инверсий в пограничном слое атмосферы – загрязняющие вещества скапливаются под инверсионной «крышкой».

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

Материалы и методы. Формирование измерительного аппаратно-программного комплекса для мониторинга атмосферы г. Красноярска выполнялось поэтапно, на протяжении нескольких лет. Стоит отметить, что подобные решения внедряются о многих городах и странах мира [4, 5]. В их основе – как правило современные сервис-ориентированные технологии [6, 7], широко применяется беспилотные летательные аппараты [8]. Предметом исследований выступает поиск и установление взаимосвязей между особенностями местности, метеорологическими характеристиками и загрязнением [9, 10].

Работы авторов по данной теме ведутся уже несколько лет [11]. В настоящее время в его состав входит следующее оборудование и соответствующее программное обеспечение:

- Станции мониторинга «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН», которые измеряют концентрации взвешенных частиц (PM_{2.5}), метеорологические характеристики атмосферы (температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление). Создан и постоянно дорабатывается комплекс программных средств для работы с регистрируемой информацией.
- Сеть датчиков, метеостанций и анемометров, созданных в ИВМ СО РАН и размещенных в разных точках города, включающая регистраторы скорости/направления ветра в нескольких точках вдоль русла р. Енисей, приборы для измерения концентрации взвешенных частиц (PM_{2.5}), цифровые датчики температуры воды в р. Енисей. Перечисленное оборудование реализовано в виде самодостаточных устройств на основе микроконтроллеров с соответствующими датчиками, с передачей данных в реальном времени через сотовую сеть на геопортал ИВМ СО РАН. Корпуса приборов напечатаны на 3D-принтере.
- Термокосы над поверхностью р. Енисей для измерений температуры и влажности воздуха, предназначенные для изучения процесса теплообмена между водой и воздухом в приповерхностном слое атмосферы над водой (от 10 см до нескольких метров):
 - «Термокоса плавающая» – это «поплавок» (буй) с установленным на нем стержнем длиной около 1 м, на котором на разной высоте закреплены датчики-регистраторы температуры (дата-логгеры), установленные на высотах 10, 30, 50, 70, 90 см над уровнем воды. Дата-логгеры ведут запись в свою память с периодичностью 1 час.

- «Термокоса навесная» расположена над поверхностью воды, закреплена на прибрежном сооружении вертикальным стальным тросом, обеспечивает измерение температуры и влажности воздуха на высоте до 8 метров от поверхности воды. Ориентировочное местоположение дата-логгеров на термокосе: 2, 3, 5, 7 метров от поверхности воды; периодичность записи – также 1 раз в час.

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

- *Измерительный комплекс на основе БПЛА (квадрокоптера)*, которые обеспечивает измерение характеристик атмосферы (метеоданные и концентрации взвешенных частиц PM2.5) на вертикальных профилях до высоты в 500 метров над уровнем земли. Используемый БПЛА промышленного типа обладает повышенной стойкостью к условиям эксплуатации (сильный ветер, отрицательные температуры). Для обеспечения измерений в зимних условиях для квадрокоптера был напечатан на 3D-принтере теплоизоляционный кожух. Все регистрируемые навесным оборудованием квадрокоптера данные поступают в специализированную подсистему геопортала ИВМ СО РАН в процессе постобработки.
- *Метеорологический температурный профилемер МТР-5*, который позволяет измерять вертикальный профиль температуры атмосферы до высоты 1000 метров с шагом 50 метров. Эта информация необходима для выявления периодов температурных инверсий. Разработан набор программных средств для передачи регистрируемых данных профилемера на сервер в ИВМ СО РАН. Созданы база данных и веб-интерфейсы для визуализации получаемых данных в различных представлениях.
- *Система видеонаблюдения с помощью IP-видеокамер*, предназначенная для регистрации образования туманов над рекой Енисей. В разных точках города размещены видеокамеры, передающие данные на геопортал ИВМ СО РАН через Интернет в реальном режиме времени, в том числе цилиндрического и купольного типов. Съемка выполняется в интервальном фоторежиме – один фотоснимок за 10 минут. Поворотная камера купольного типа обеспечивает съемку в нескольких ракурсах по заданному сценарию. Разработан блок визуального мониторинга геопортала ИВМ СО РАН, который обеспечивает сбор, обработку изображений, загрузку в структурированный файловый архив и организацию доступа через веб-приложения и сервисы.

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

На рис. 1 показаны полученные с помощью навесного оборудования БПЛА типичные вертикальные профили распределения концентрации PM2.5 в зависимости от наличия или отсутствия температурной инверсии. Экспериментально установлено, что наличие инверсии препятствует вертикальному распространению аэрозольных частиц, их концентрация вблизи земной поверхности заметно выше по сравнению с ситуацией, когда инверсия отсутствует.

На рис. 2 показана взаимосвязь изменения вертикального профиля температуры по данным профилемера МТР-5 и концентрации взвешенных частиц PM2.5 по данным сети мониторинга КНЦ СО РАН. Радиационное выхолаживание в ночные и утренние часы обуславливает возникновение температурных инверсий, в результате которых синхронно повышается концентрация PM2.5 в городе.

Рис. 3 иллюстрирует динамику изменений температуры воды в летние месяцы в нижнем бьефе Красноярской ГЭС. Обнаружены значительные колебания температуры воды ($> 8^{\circ}\text{C}$) с периодом порядка недели, связанные с текущими погодными условиями (температура, облачность) и режимом сброса воды через плотину ГЭС.

На рис. 4 представлены данные о повторяемости температурных инверсий в Красноярске. В зимние месяцы она превышает 60%, в летнее составляет не более 25%.

Взаимосвязь относительной влажности в периоды туманообразования от разницы температур вода/воздух показана на рис. 6. Туманы парения в зимнее время возникают при разнице температур порядка 20°C . Среднегодовое значение относительной влажности, при которой возникают туманы, составило 77%.

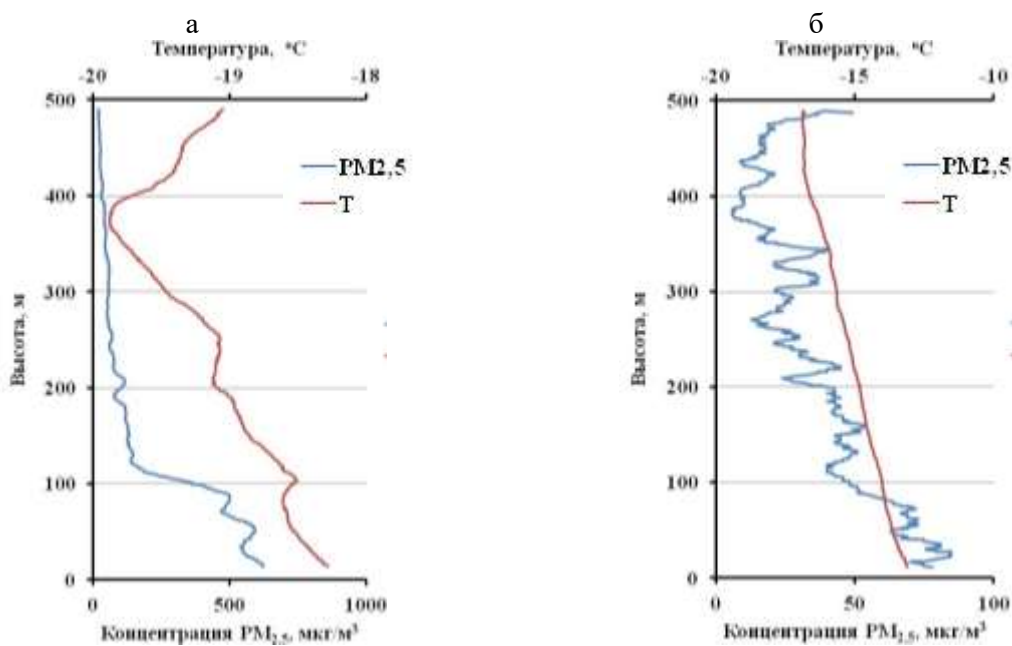


Рис. 1. Вертикальное распределение концентрации аэрозольных частиц PM_{2.5} и температуры воздуха при наличии (а) и отсутствии (б) атмосферной температурной инверсии. Начало измерения: (а) 2022-12-15 в 14:07; (б) 2022-12-16 в 10:49.

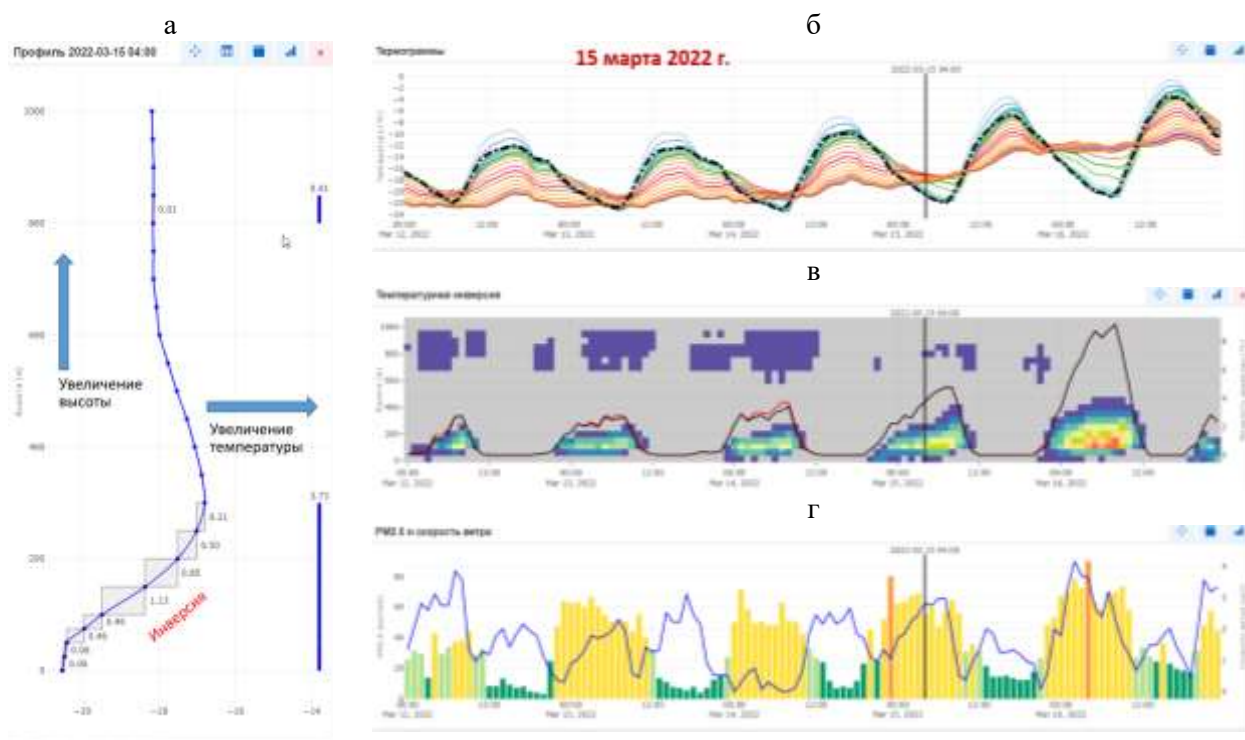


Рис. 2. Температурные инверсии и загрязнение атмосферы в Красноярске в период с 12 по 16 марта 2022 года: а) вертикальный профиль температуры воздуха (ось X – температура, ось Y – высота над поверхностью) 15 марта 2022 г. в 04:00, б) термограммы – графики температуры воздуха на разных высотах (черная штрих-пунктирная линия – температура у поверхности, которая ниже значений на других высотах в ночные часы, когда наблюдается инверсия), в) тепловая карта инверсий, наблюдаемых с полуночи до утра, г) гистограмма концентраций PM_{2.5} и график скорости ветра.

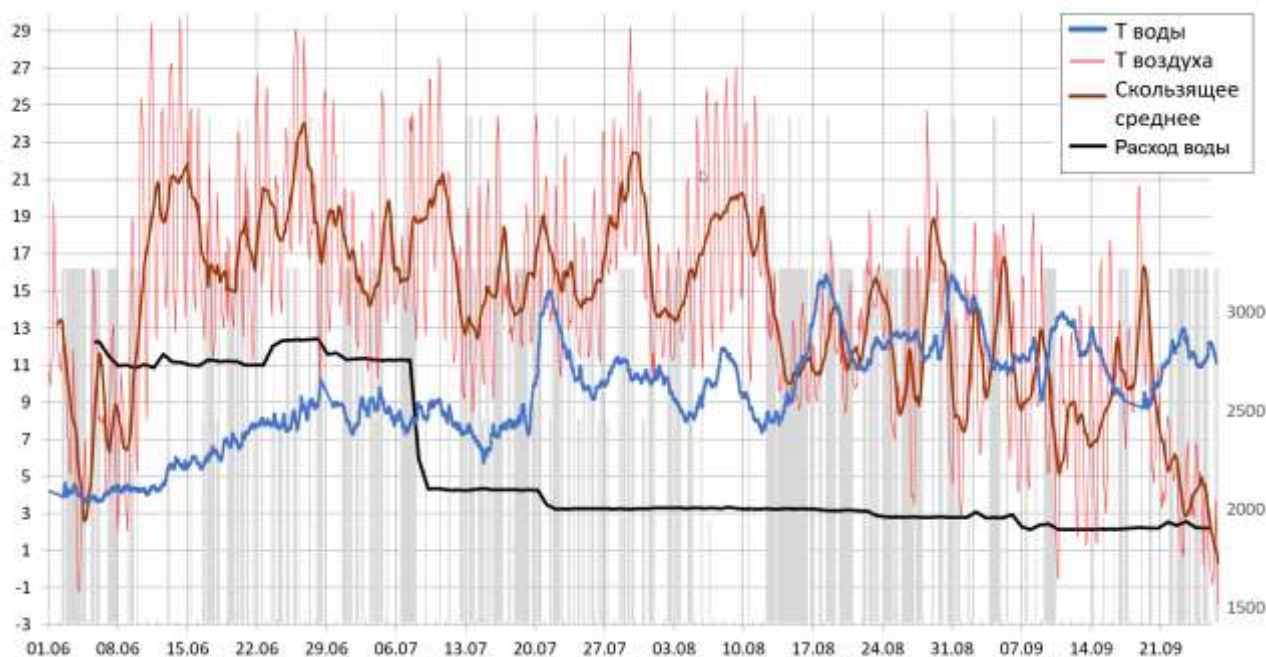


Рис. 3. Анализ взаимосвязи колебаний температуры воды в районе нижнего бьефа Красноярской ГЭС в летний период 2022 года от температуры воздуха (на рисунке также приведена скользящее среднее), облачности (периоды облачного неба обозначены серым цветом) и расхода воды через плотину Красноярской ГЭС (значения расхода воды через плотину в м³/сек – на оси Y справа). Данные по температуре воздуха и облачности – по измерениям метеостанции Росгидромета в г. Дивногорске.

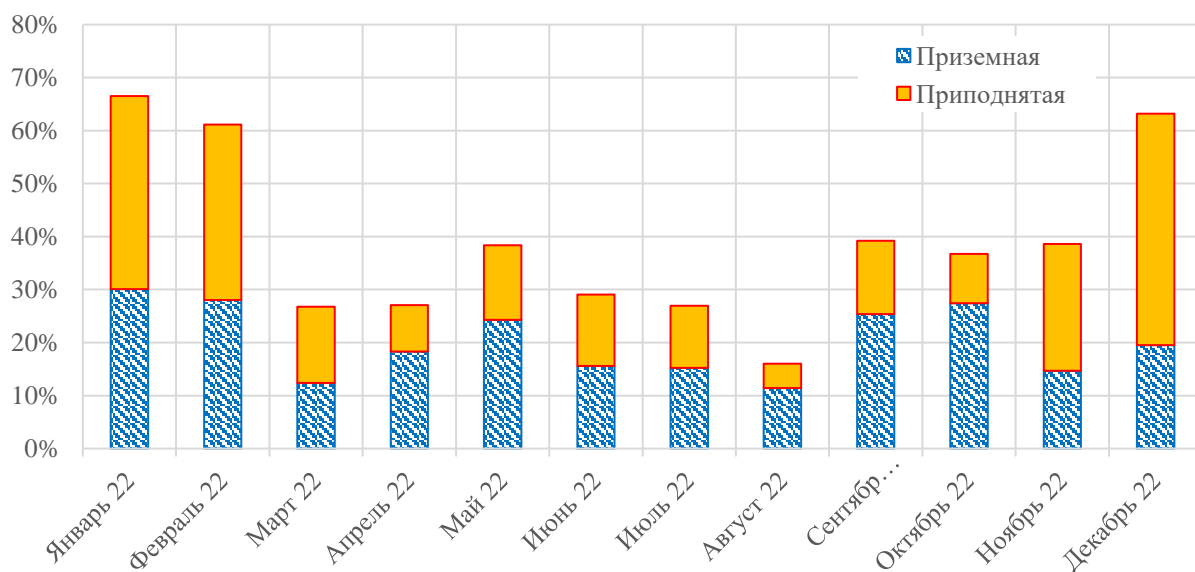


Рис. 4. Повторяемость температурных инверсий (доля количества часов с инверсиями) и их типы по данным наблюдений в 2022 году с помощью температурного профилера МТР-5.

Рис. 5 иллюстрирует данные о повторяемости туманов над Енисеем. Анализ данных показал, что в подавляющем большинстве случаев в момент образования туманов наблюдалась температурная инверсия. В те моменты времени, когда наблюдались туманы, доля периодов с отсутствием инверсии составила 3%, приземной инверсии – 24%, приподнятой – 73%.

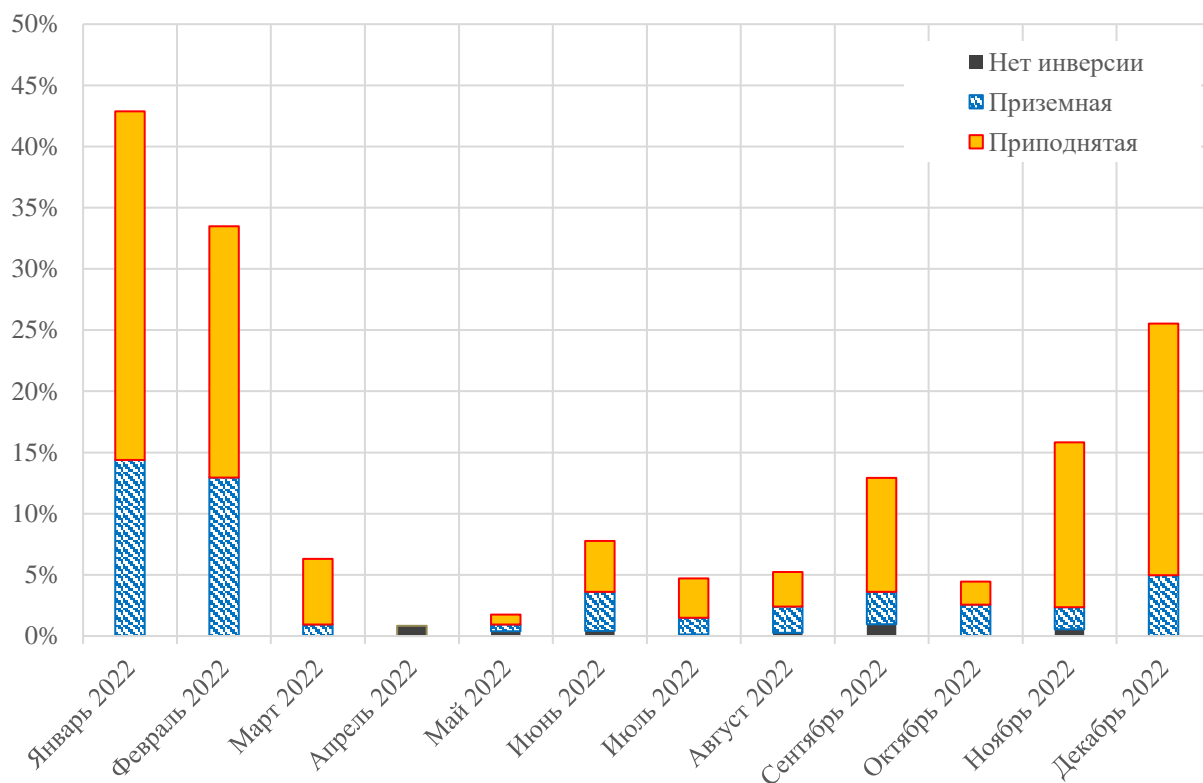


Рис. 5. Повторяемость туманов в 2022 году по данным мониторинга с помощью IP-видеокамер и температурная инверсия при наличии туманов.

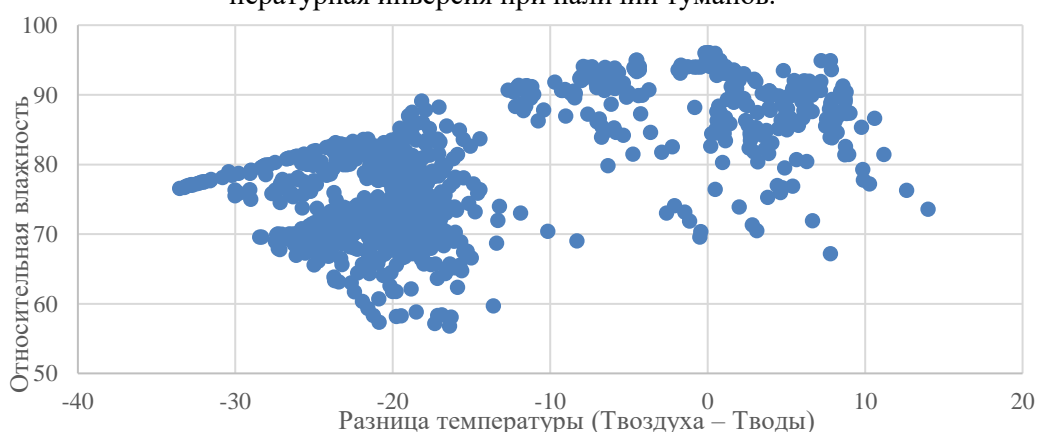


Рис. 6. Характеристики метеоусловий в периоды образования туманов: относительная влажность в зависимости от разности температур (Твоздуха – Тводы) в 2022 году.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Romanov A.A., et al. Environmental efficiency of the fossil fuels to electricity transition in Eastern Siberia cities // Atmospheric Pollution Research. 2023. 14(2). 101672.
- [2] Shaparev N.Y., Tokarev A.V., Yakubailik O.E. Formation of fogs downstream of the Krasnoyarsk hydropower plant on the Yenisei River // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. 35(5), 397–401.

- [3] *Hrebtov M., Hanjalić K.* Numerical Study of Winter Diurnal Convection Over the City of Krasnoyarsk: Effects of Non-freezing River, Undulating Fog and Steam Devils // *Boundary-Layer Meteorol.* 2017. 163(3), 469-495.
- [4] *Gulia S., Shiva Nagendra S.M., Khare M., Khanna I.* Urban air quality management – a review // *Atmospheric Pollution Research.* 2015. 6(3). 286-304.
- [5] *Wiemann S., Brauner J., Karrasch P., Henzen D., Bernard L.* Design and prototype of an interoperable online air quality information system // *Environmental Modelling & Software.* 2016. 79. 354-66.
- [6] *Schmitt R.H. and Voigtmann C.* Sensor information as a service – component of networked production // *Journal of Sensors and Sensor Systems.* 2018. 7. 389-402.
- [7] *Singh D., Dahiya M., Kumar R., Nanda C.* Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review // *Journal of Environmental Management.* 2021. 289, 112510.
- [8] *Li X., Wang D., Lua Q., Peng Z., Wang Z.* Investigating vertical distribution patterns of lower tropospheric PM_{2.5} using unmanned aerial vehicle measurements // *Atmospheric Environment.* 2018. 173. 62-71.
- [9] *Li X., Song H., Zhai S., Lu S., Kong Y., Xia H., Zhao H.* Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017) // *Environmental Pollution.* 2019. 246. 11-18.
- [10] *Jian L., Yinkun L.* Research on the correlation between meteorological factors and pollutants based on Pearson coefficient // *Journal of North China Institute of Science and Technology.* 2019. 16(04). 93-97.
- [11] *Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A., Tokarev A.V.* Web Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2018. 54(3). 243-249.

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА**

ПОДСИСТЕМА РАБОТЫ С ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПРОДУКТАМИ О КОНЦЕНТРАЦИИ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ЦКП «ИКИ-МОНИТОРИНГ» И ОПЫТ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Бриль А.А., Бурцев М.А., Константинова А.М., Мазуров А.А., Лупян Е.А.
Институт космических исследований РАН, Москва

В работе описывается технология построения продуктов с информацией о концентрации различных малых газовых составляющих за разные временные периоды. На примере данных прибора TROPOMI спутника Sentinel-5P приводятся примеры построенных продуктов. Описываются некоторые возможности по анализу таких продуктов, доступные в тематических информационных системах, развиваемых в ИКИ РАН.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, малые газовые составляющие, ЦКП «ИКИ-Мониторинг», TROPOMI, мониторинг качества воздуха, загрязнение атмосферы, технология построения композитных изображений.

SUBSYSTEM SERVICE FOR WORK OUT INFORMATIONAL PRODUCTS OF SMALL GAS COMPONENTS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE IN «IKI-MONITORING» CENTER FOR COLLECTIVE USE AND THE EXPERIENCE OF ITS USE

Bril A.A., Burcev M.A., Konstantinova A.M., Mazurov A.A., Loupian E.A.
Space Research Institute RAS, Moscow

The paper describes the technology for constructing products with information on the concentration of various small gas components for different time periods. On the example of the data of the TROPOMI instrument of the Sentinel-5P satellite, examples of the built products are given. Some possibilities for the analysis of such products, available in thematic information systems developed at the IKI RAS, are described.

Keywords: remote monitoring, trace gases, CCU «IKI-Monitoring», TROPOMI, air quality monitoring, atmospheric pollution, composite imaging technology.

Введение. Загрязнения атмосферного воздуха являются одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и на здоровье населения. Повышение концентрации различных веществ в атмосфере разрушает озоновый слой Земли, приводит к возникновению кислотных дождей, к снижению плодородия почвы, воздействует на дыхательные пути, особенно на легкие человека, вызывает изменения состава крови. Поэтому необходим комплексный мониторинг состояния атмосферы, включающий оценку концентрации определенного вещества в атмосфере. Для решения задачи мониторинга качества воздуха могут быть использованы данные различных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Такие данные позволяют не только получать информацию о концентрации определенного вещества в атмосфере в режиме, близком к реальному времени, но и предоставляют информацию о состоянии атмосферы на труднодоступных территориях, которую невозможно получить другими способами.

Настоящая работа посвящена технологии построения автоматизированной цепочки обработки и усвоения данных о концентрации малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере Земли. Описывается формирование различных информационных продуктов на основе этих данных, приводятся примеры таких продуктов. Также приведены некоторые возможности работы с информационными продуктами на базе тематических информационных систем, развиваемых в Институте космических исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН).

Данные МГС в архивах ЦКП. В последние годы в ИКИ РАН на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>) [1] создана и развивается подсистема, обеспечивающая возможность работы с различными информационными продуктами о концентрации МГС в атмосфере Земли. В настоящее время подсистема обеспе-

чивает возможность работы с различными информационными продуктами, которые формируются на основе данных спутников Sentinel-5P (TROPOMI) [4] и OMI (AURA) [5]. Такие продукты предоставляются в открытом доступе из американского и европейского центров распространения данных, а именно LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) и Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) соответственно. В ИКИ РАН реализована процедура полностью автоматического получения информационных продуктов из различных центров распространения. Также в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» реализовано автоматизированное формирование и ведения архивов этих данных с помощью созданной в ИКИ унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных UNISAT [2]. Ведутся работы по существенному расширению архивов данных МГС за счет увеличения списка спутниковых систем, предоставляющих информации о концентрации МГС. Состав информации, входящей в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» сегодня, представлен в таблице 1.

Табл. 1. Состав информационных продуктов о концентрации МГС, доступных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Спутник	Прибор	Газ	Доступность данных в архивах ЦКП
Sentinel 5P	TROPOMI	NO ₂	2018 – по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	SO ₂	2018 – по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	O ₃	2018 – по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CO	2018 – по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	Aerosol	2018 – по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CH ₄	2018 – по настоящее время
AURA	OMI	SO ₂	2004 – по настоящее время
AURA	OMI	NO ₂	2004 – по настоящее время
AURA	OMI	Aerosol	2004 – по настоящее время

Технология построения информационных продуктов. Для изучения динамики концентраций МГС, в том числе для анализа долговременных рядов измерений во многих случаях удобно использовать композитные изображения, сформированные за различные периоды времени. Под композитными изображениями концентраций МГС понимаются изображения, в каждой точке которых содержится информация о какой-либо характеристике, полученной по серии наблюдений за заданный период. Например, среднее, максимальное или минимальное значение концентрации МГС за выбранный период времени. На сегодняшний день в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» реализована полностью автоматическая схема построения таких композитных изображений. Блок-схема технологии построения представлена на рисунке 1.

Обработка осуществляется следующим образом: на первом этапе проверяется наличие в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» продукта временного статистического композита за определенную дату. Если записи о наличии такого продукта отсутствуют, то инициируется процесс построения композитного изображения. Этот процесс состоит из нескольких этапов. Для начала из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» запрашиваются все исходные данные за определенный промежуток времени, после чего они переводятся в одну проекцию с одинаковыми параметрами (координата верхнего левого угла, пространственное разрешение и т. п.). Далее формируется 3-х мерный массив (id, x_size, y_size), где id – номер сцены, а x_size и y_size – количество пикселей по горизонтали и вертикали соответственно. После того, как этот массив сформирован, рассчитываются статистики для каждого пикселя изображения и на выходе получают статистические матрицы, которые записываются в файл в формате GeoTiff. На последнем этапе запускается модуль аннотации, который формирует готовые продукты в требуемом формате, который необходим для добавления созданных продуктов в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Если запись о наличии продукта в базе данных уже существует, запускается процесс проверки актуальности данных, который заключается в сравнении времени добавления композитного изображения в архивы с последним временем добавления сцены-сенса. В случае если оказывается, что композитное изображение уже сформировано, но без

учета всех доступных в архивах сеансов, то есть требуется обновление продукта, запускается процесс построения композитного изображения с учетом актуальных данных. Стоит отметить, что для экономии вычислительных ресурсов ежегодные композитные изображения строятся на базе уже имеющихся в архивах данных ежемесячных композитных изображений. Продукты композитов строятся по территории всего Земного шара. Также стоит отметить, что программное обеспечение по построению композитных изображений универсально и может быть применимо к любому спутнику и прибору, а также кроссплатформенно, и может быть развернуто на любую операционную систему.

Отметим, что ключевым элементов автоматизированной системы формирования композитов стал программный модуль, созданный на базе языка программирования python3 с использованием стандартных библиотек работы с растровыми и векторными данными. Программный модуль позволяет формировать композитное изображение за любой промежуток времени. Так, например, для более глубокого анализа данных, с помощью данного модуля были построены многолетние статистические композиты по данным TROPOMI за период с апреля 2018-го года по декабрь 2022-го. Пример такого композита приведен на рисунке 2.

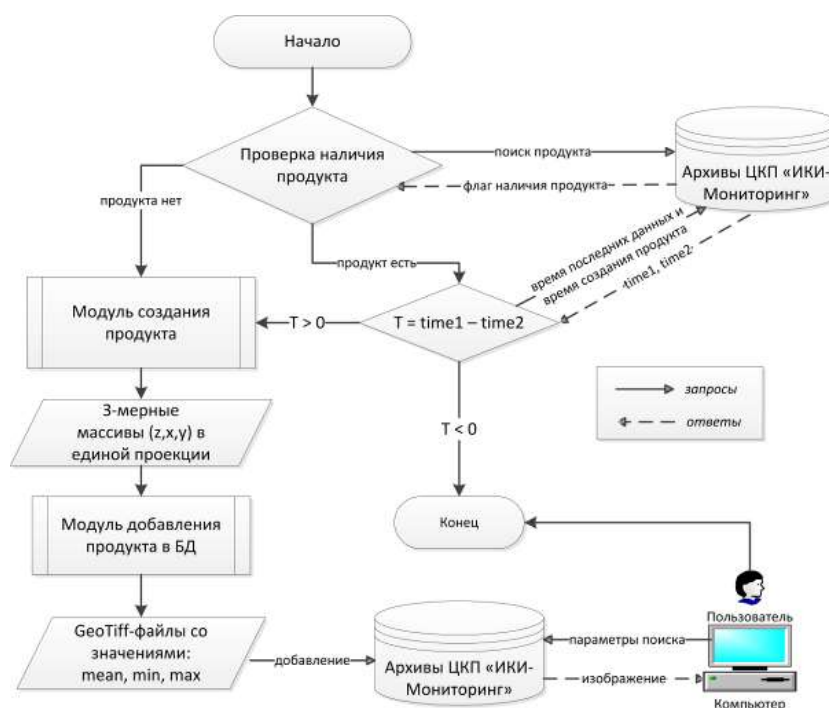


Рис. 1. Блок-схема алгоритма построения композитного изображения.

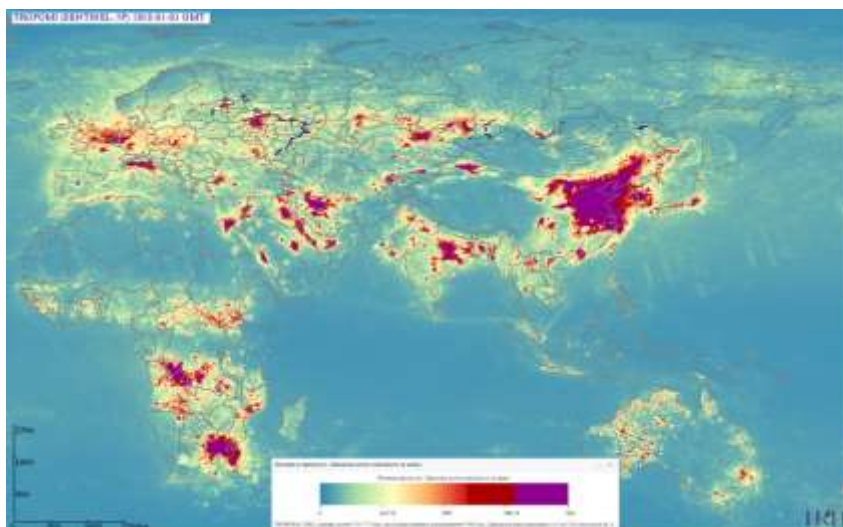


Рис. 2. Композитное изображение с информацией о максимальной концентрации диоксида азота по данным TROPOMI за 2018-2022 годы

Следует также отметить, что формируемые в системе информационные продукты покрывают всю территорию Земного шара. Эти продукты позволяют, в частности, анализировать устойчивые источники загрязнений, оценивать особенности пространственных распределений газовых составляющих и многое другое. Например, по композитным изображениям аэрозольного индекса можно анализировать динамику выбросов от крупных лесных пожаров.

Возможности работы с информационными продуктами о концентрации МГС в атмосфере на базе тематических информационных систем. Пользователи ЦКП «ИКИ-Мониторинг» могут получить доступ к различным информационным продуктам с концентрацией МГС, накопленным в центре, работая с информационными системами (ИС), развиваемыми в ИКИ РАН, в веб-интерфейсах которых предоставляется доступ к спутниковым архивам ЦКП. В ИС доступен набор инструментов для распределенного анализа этих продуктов, в том числе анализа их временных рядов, например, с помощью данных инструментов пользователи могут:

1. Рассчитывать различные статистические характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения, площади пикселей с определёнными значениями и т. п.) внутри границ произвольных полигонов на основе создаваемых композитных изображений с концентрацией МГС. Строить временные ряды этих характеристик в модуле анализа временных рядов [3] и, таким образом, следить и анализировать состояние некоторых объектов, например, локализованных источников выбросов различных газов. Так было проведено исследование по анализу концентраций диоксида азота над территорией крупных городов России, был составлен рейтинг загрязнённости таких городов. Данные инструменты реализованы в рамках развиваемой в ИКИ РАН технологии объектного мониторинга и доступны в ИС Vega-Science (<http://sci-vega.ru>) [6, 7]. Описываемый подход может быть применён к анализу источников выбросов любых МГС, с информацией о концентрации которых строятся композитные изображения. Данный подход позволяет проводить анализ многолетней динамики выбросов, выявлять сезонные тренды и различные аномалии, такие как снижение выбросов во время распространения COVID-19, когда были введены ограничительные меры на передвижение и деятельность человека.
2. С помощью инструмента «Цветосинтез», доступного в ИС, создавать цветные продукты, для трех каналов (RGB) которых могут быть использованы разные композитные изображения с информацией о концентрации МГС. Например, в ИС Vega-Science был создан продукт, в трех каналах которого были задействованы годовые композитные изображения со средней концентрацией диоксида азота по прибору TROPOMI (спутник Sentinel-5P) за разные года: в красном канале (R) – 2018 год, в зеленом канале (G) – 2019 год, в голубом канале (B) – 2020 год, Созданный продукт позволил выявить интересные факты, которые плохо проявлялись на отдельных композитных изображениях. В частности, на нем хорошо видно, что заметный вклад в загрязнения вносят суда, перемещающиеся по стандартному маршруту, связывающему Европу с Восточной Азией. На рисунке 3 приведен пример такого продукта, где красные стрелки указывают на маршрут судов.
3. С помощью инструмента создания анимации, доступного в ИС, строить анимации временных серий композитных изображений (ежедневных: еженедельных, ежемесячных и т.д.) за разные периоды. Анимация - удобное средство визуализации данных, которое позволяет отслеживать переносы различных МГС с разной частотой (день, неделя и т.д.). Например, в ИС Vega-Science была создана анимация на основе ежедневных композитных изображений (<http://sci-vega.ru/animation/1681817616.gif>), на которой хорошо видна циркуляция аэрозолей: вызванных мощными лесными пожарами в Сибири в июле-августе 2019 года.
4. Проводить интерактивный, визуальный и количественный анализ значений концентраций МГС в каждом пикселе на конкретных композитных изображениях. Например, в ИС дистанционного мониторинга активности вулканов Камчатки и Курил «VolSatView» (<http://volcanoes.smislab.ru>) [8] есть возможность детектировать повышение концентра-

ции различных МГС, например, диоксида серы в момент извержений вулканов. На рисунке 4 приведено изображение с концентрацией диоксида серы во время крупных извержений вулкана Шивелуч, которые начались с 10 апреля 2023 года.



Рис. 3. Распределение выбросов в атмосферу диоксида азота от крупных антропогенных объектов и природных пожаров

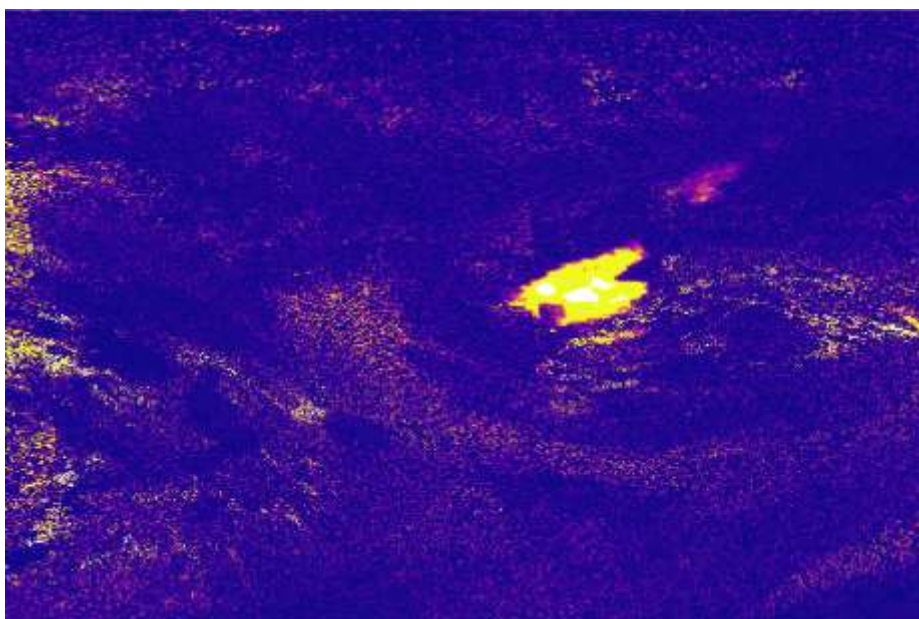


Рис. 4. Концентрация диоксида серы во время крупного извержения вулкана Шивелуч 11 апреля 2023 года.

Заключение. Таким образом, уже сегодня, реализованная на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» подсистема сбора, автоматизированной обработки и анализа данных о концентрации МГС в атмосфере может быть использована для решения различных научных и прикладных задач. Описываемую подсистему предполагается активно использовать для реализации темы «Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли».

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки, госрегистрация № 122042500031-8. В настоящее время подсистема развивается при поддержке темы «Эмиссия» госрегистрация № 122101700045-7.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- [2] *Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Бурцев М.А.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9-27. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
- [3] *Балашов И.В., Марченков В.В., Прошин А.А., Руткевич Б.П., Уваров И.А.* Разработка сервисов для эффективного предоставления доступа к временным сериям данных сверхбольших распределённых архивов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 113-122. DOI:10.21046/2070-7401-2023-20-2-113-122.
- [4] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>.
- [5] https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/OMI/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.2_ProductRequirements_Designs/README.OMI_DUG.pdf.
- [6] *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Бриль А.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9-31. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- [7] *Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Radchenko M.V., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. № 1. P. 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
- [8] *Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Бриль А.А., Константинова А.М., Бурцев М.А., Маневич А.Г., Гордеев Е.И., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П.* Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249-265. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.

ОЦЕНКА ВИДОВОГО СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТУРОВ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ

Дмитриев Е.В.^{1,2}, Кондранин Т.В.², Сафонова А.Н.², Мельник П.Г.^{3,4}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный, Московская область

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лесоведения РАН, Успенское, Московская область

Аэрокосмические изображения сверхвысокого пространственного разрешения (0.5 м и выше) являются эффективным инструментом для осуществления локального и регионального мониторинга лесных территорий. В данной работе предлагается метод совместной тематической обработки мультиспектральных и фото ортомозаик с использованием сегментации отдельных деревьев и текстурного анализа. Метод адаптирован к наличию шумов, возникающих при сшивке изображений, позволяет повысить точность классификации видового состава и получить оценки классов жизненного состояния древостоев.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, текстурный анализ, сегментация контуров отдельных деревьев, мониторинг лесных территорий.

ASSESSMENT OF SPECIES AND LIVING STATE OF FOREST STANDS FROM VERY HIGH RESOLUTION IMAGES WITH THE USE OF INDIVIDUAL TREE DELINEATION

Dmitriev E.V.^{1,2}, Kondranin T.V.², Safonova A.N.², Melnik P.G.^{3,4}

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Moscow

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow

⁴ Institute of Forest Science RAS, Uspenskoe, Moscow region

Very high spatial resolution remote sensing images (less than 0.5 m) are an effective tool for local and regional monitoring of forest areas. In this paper, we propose a method for joint thematic processing of multispectral and photo orthomosaics using individual tree delineation and texture analysis. The method proposed is adapted to the noise from stitching images and allows us to improve the species classification accuracy and to estimate the living status of forest stands.

Keywords: remote sensing, pattern recognition, texture analysis, individual trees delineation, monitoring of forest areas.

Введение. На сегодняшний день, основу дистанционного мониторинга лесных территорий на региональных масштабах составляют мультиспектральные спутниковые изображения среднего пространственного разрешения (10-30 м). Преимуществом использования такого рода данных является их высокая оперативность и доступность, что позволяет соответствующим службам лесного хозяйства получать актуальную информацию о различных изменениях параметров древостоев. Однако, для решения задач мониторинга локального масштаба, включая определение видового состава и жизненного состояния отдельных деревьев, необходимо использовать изображения сверхвысокого пространственного разрешения.

Современные спутниковые системы, такие как WorldView, SuperView, Pleiades и ASNARO, позволяют получать панхроматические изображения с разрешением 0.5 м, при котором удастся сегментировать отдельные деревья в древостоях определенного типа. Для повышения детализации тематической обработки также используют фото и мультиспектральные изображения, получаемые с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). По сравнению данными коммерческих спутниковых систем сверхвысокого разрешения, использование БПЛА для мониторинга лесной растительности является более затратным методом [1], даже если речь идет о получении ортофотомозаик RGB. С другой стороны при использовании БПЛА удастся лучше контролировать условия съемки, что особенно важно для решения ряда задач точного лесоводства и мониторинга охраняемых природных территорий [2].

В последние годы опубликован ряд научных результатов по использованию методов сегментации крон отдельных деревьев (ITCD – individual tree crowns delineation) для решения задач дистанционной оценки таксационных характеристик и структурных параметров древостоев [3-5]. ITCD алгоритмы также используются для мониторинга древостоев в пределах городских территорий. Так, например, в работе [6] был предложен комплексный метод ITCD основанный на применении энтропийного текстурного фильтра, морфологических операций и аппроксимации окружностей. В задаче подсчета количества отдельных деревьев метод позволил достигнуть точностей в интервале 67-75%. В дополнение к этому можно отметить ICTD алгоритмы, адаптированные для обработки БПЛА изображений, сделанных под значительными углами к надиру, для которых характерны значительные вариации яркости целевых объектов относительно фоновых [7].

Повышение точности тематической обработки аэрокосмических изображений сверхвысокого пространственного разрешения также возможно за счет использования текстурных признаков [8-12], в том числе и для задач, связанных с определением видового состава древостоев. В работе [8] показано, что привлечение текстурной информации позволяет повысить точность определения видов на 5-15%, в зависимости от района обследования. Использование текстурных признаков повышает информативность методов аэрокосмического ДЗ не только лесов средних широт, но других глобальных лесных территорий (влажные тропические леса). Текстурная обработка панхроматических спутниковых данных территории Мата-де-Санта-Женебра (Сан-Паулу, Бразилия) [13] позволила классифицировать большее число пород деревьев и улучшить интегральную точность спектральной обработки более чем на 25%.

В данной работе рассматривается задача совместной тематической обработки RGB и мультиспектральных изображений лесных территорий и использованием текстурного анализа и ITCD алгоритма. Исходные изображения тестовой территории подвержены влиянию искажений, возникающих при сшивке изображений. В результате обработки производится оценка видов и классов жизненного состояния отдельных деревьев.

Методика тематической обработки. Предлагаемая методика предусматривает определение видового состава и классов повреждения древостоев на основе совместной тематической обработки геопривязанных RGB и мультиспектральных изображений с пространственным разрешением 0.5 м и выше. Методика состоит из следующих основных этапов.

1. Предварительная обработка и совмещение RGB и мультиспектрального изображений с использованием опорных точек.
2. Выделение маски лесного полога с использованием алгоритма текстурной сегментации RGB изображения.
3. Попиксельная классификация видового состава на основе мультиспектрального изображения.
4. Сегментация контуров отдельных деревьев на RGB изображении.
5. Постобработка результатов попиксельной классификации с использованием контуров отдельных деревьев.
6. Оценка классов жизненного состояния отдельных деревьев.

Среди стандартных методов извлечения текстурных признаков большую популярность имеет метод Харалика, который состоит в оценке функции вероятности совместной встречаемости уровней серого и расчете соответствующих статистических моментов, называемых текстурными признаками. При обработке панхроматических спутниковых изображений сверхвысокого разрешения метод позволяет построить достаточно точные контуры древостоев, однако в случае обработки БПЛА изображений зачастую возникают значительные ошибки. Одной из основных причин таких ошибок является наличие артефактов, которые появляются при сшивке. Часто артефакты плохо видны на исходных изображениях, однако становятся хорошо различимыми после проведения коррекции контрастности. Характерные примеры представлены на рисунке 1.

Для повышения точности текстурной обработки был предложен усовершенствованный подход, использующий предварительную фильтрацию и декомпозицию исходного изображения. Схема подхода представлена на рисунке 2. На первом этапе проводится формирование изображения в градациях серого с учетом энергетической калибровки спектральных каналов. Далее следует циклическая фильтрация нижних частот на основе дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). Циклы прекращаются, когда изменение шумовой составляющей становится статистически незначимым. Для устранения артефактов обычно достаточно 10-15 циклов. Далее следует декомпозиция изображения на низкочастотную и высокочастотную составляющие с использованием фильтра гаусса. Масштаб фильтра выбирается в соответствии с характерным масштабом структурных элементов. В нашем случае использовалось трехкратное превышение.

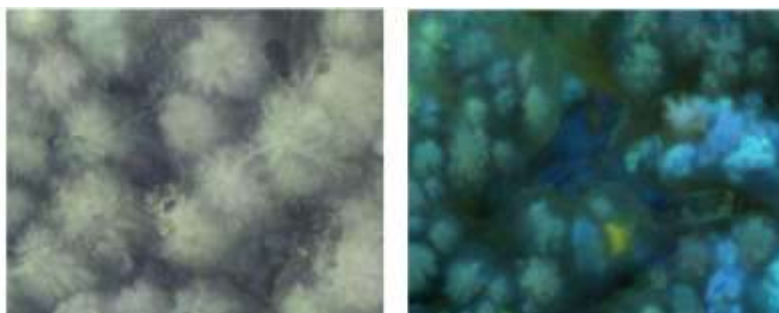


Рис. 1. Искажения сшивки фото (слева) и мультиспектральных (справа) изображений.

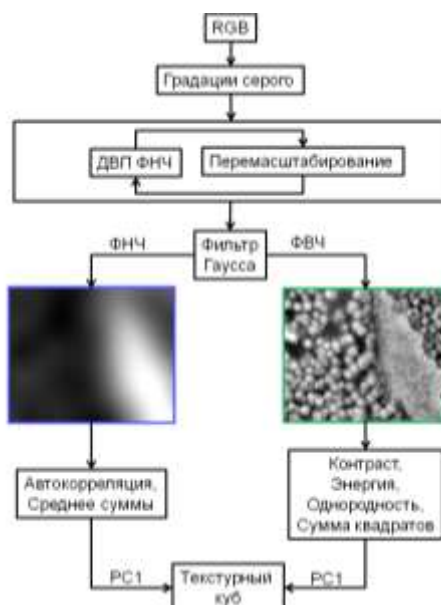


Рис. 2. Общая схема усовершенствованного алгоритма текстурной обработки изображений с артефактами сшивки. ФНЧ – фильтр нижних частот, ФВЧ – фильтр верхних частот.

Декомпозиция изображения дает возможность дополнительной оптимизации признаков Харалика. Для низкочастотной части достаточно использовать автокорреляцию и среднее суммы. Для высокочастотной части информативными признаками являются контраст, энергия, однородность и сумма квадратов. Далее для каждого набора признаков выделяется первая главная компонента (PC1), которые затем объединяются в единый куб текстурных признаков.

Для сегментации контуров отдельных деревьев использовался ITCD алгоритм, предложенный в работе [14]. Алгоритм состоит из трех основных этапов. На первом этапе проводится предварительная обработка, направленная на усиление контрастности крон и межкрупного пространства. На вход поступает изображение в формате RGB, представленное в естественных или ложных цветах. Также могут быть использованы панхроматические изображения. Предварительная обработка заключается в применении усовершенствованного алгоритма выравнивания гистограммы яркости, что упрощает сегментацию крон отдельных деревьев. На втором этапе производится первичная сегментация крон деревьев с помощью фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования (DWT) и алгоритмов многопороговой обработки. Далее проводится постобработка с применением морфологических операций для сглаживания границ сегментов и окончательная сегментация крон отдельных деревьев с помощью водораздельного метода. Третий этап состоит в определении контуров крон на основе градиентных операторов и анализа данных.

Результаты оценки точности данного ITCD алгоритма представлены в работе [14]. Для этого были рассмотрены небольшие однородные тестовые участки с различным породным составом и сомкнутостью полога: хвойные древостои со средней и высокой сомкнутостью полога, полные лиственные древостои, лиственные и смешанные древостои с высоким разбросом диаметров крон, поврежденные древостои. В качестве параметров, используемых для оценки точности оконтуривания, использовались коэффициент Жаккара (Jaccard Similarity Coefficient, JSC) и мера отношения пересечения к объединению (Intersection over Union, IoU). Типичная точность оконтуривания составила величину порядка 95%. Наиболее низкая точность соответствует лиственным древостоям с высоким разбросом диаметров крон и составляет величину чуть более 90%.

Для проведения попиксельной классификации использовался ансамблевый метод самокорректирующих кодов (МСК) известный в зарубежных источниках как ЕСОС (Error-Correcting Output Codes). МСК который позволяет решать задачу многоклассовой обучаемой классификации на основе выбранного базового алгоритма бинарной классификации. С учетом предполагаемого количества определяемых классов, в качестве матрицы кодирования использовалась матрица ОВО (One-Versus-One). В качестве бинарного классификатора использовался метод опорных векторов (МОВ) с гауссовским ядром.

Численные эксперименты. Для отработки метода был выбран тестовый участок на территории биосферного заповедника Чупрене (Болгария). Заповедник Чупрене включен в список ЮНЕСКО и является уникальным природным комплексом, который требует проведения регулярных обследований с целью принятия своевременных мер по решению проблем, связанных с повреждением древостоев стволовыми вредителями и изменением параметров структуры древостоя. Основными видами деревьев, произрастающих на тестовом участке являются ель обыкновенная (*Picea abies*) и бук европейский (*Fagus sylvatica*). Также присутствуют примеси сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и черной сосны (*Pinus nigra*). Расположение тестового участка и его изображения представлены на рисунке 3.

Фотоизображения, полученные с БПЛА DJI-Phantom 4 Pro, имеют наиболее высокое пространственное разрешение, около 7 см на пиксель. Мультиспектральные изображения были получены с помощью сенсора Parrot Sequoia, который был установлен на БПЛА SenseFly eBee X. Пространственное разрешение составило около 15 см на пиксель. Камера Parrot Sequoia оснащена датчиком солнечного излучения, поэтому мультиспектральные изображения были откалиброваны по спектральной отражательной способности. Облеты тестовой территории проводились в течение периода вегетации в 2017 году на высоте около 120 метров.

Проведены уточнение геопривязки и сшивка фото и мультиспектральных изображений тестового участка с использованием опорных точек. По нашим оценкам, ошибки совмещения мозаик не превосходят 2 пикселей.

Результаты построения маски леса представлены на левом изображении рисунка 4. Желтым цветом выделены прочие объекты: луговая растительность, открытая почва и камни. Результаты сегментации кроны отдельных деревьев представлены на правом изображении рисунка 4. Проведенные эксперименты показали, что при применении алгоритма к высокочастотной части изображения возникает меньшее число ошибок, чем при использовании исходного изображения.

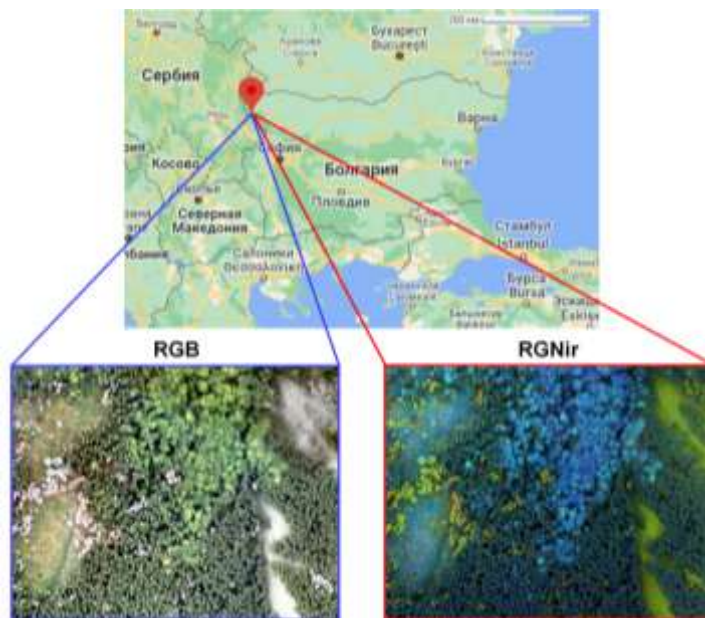


Рис. 3. Расположение тестовой территории Чупрене (Болгария) и соответствующие ортофотомозаики: слева – фотоизображение, справа – мультиспектральное псевдоцветное изображение.

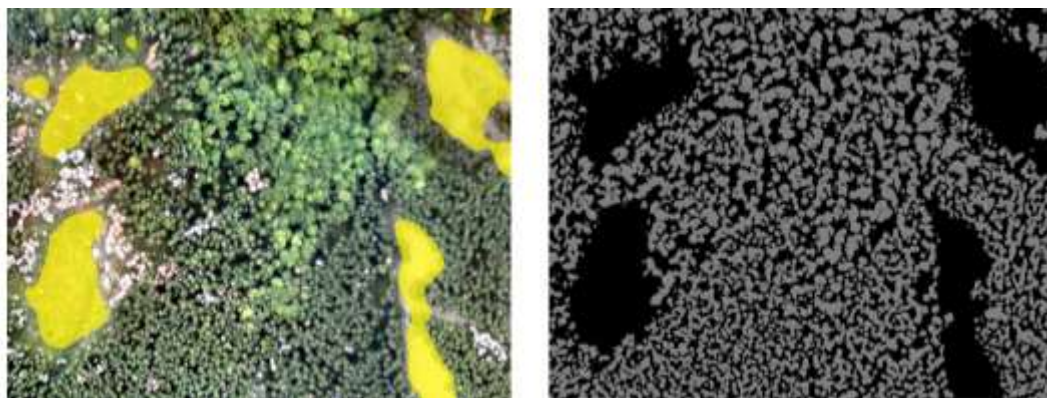


Рис. 4. Промежуточные результаты обработки. Слева – построение маски леса на основе текстурного анализа. Справа – сегментация кроны отдельных деревьев с учетом маски леса.

Результаты попиксельной классификации мультиспектрального изображения представлены на рисунке 5а. Рассматривалось 4 класса: ель, бук, поврежденные деревья и межкروновое пространство. В качестве спектральных признаков использовались нормализованные спектральные яркости. Обучающие множества сбалансированы и содержат 1000 реализаций для каждого класса. Важность использования сбалансированных обучающих множеств обусловлена необходимостью выравнивания априорных вероятностей классов для используемого классификатора.

Для оценки точности попиксельной классификации использовались методы переклассификации (априорная оценка ошибки) и перекрестная проверка (кросс-валидация k-folds). В

методе перекрестной проверки обучающий набор делится на k равных сбалансированных множеств группированных данных, $k-1$ из которых используется для обучения алгоритма МСК МОВ, а 1 используется для независимой классификации (тестовое множество). Тестовое множество пробегает все возможные позиции и, таким образом, мы получаем полное множество реализаций ошибок классификации. Априорная оценка использует тот же набор для обучения и тестирования и дает нам зависимые ошибки классификации. Сравнение оценок переклассификации и перекрестной проверки указывает на способность классификатора к обобщению. Таким образом можно надеяться, что реальные ошибки классификации будут согласоваться с их оценками, полученными из данных обучения.

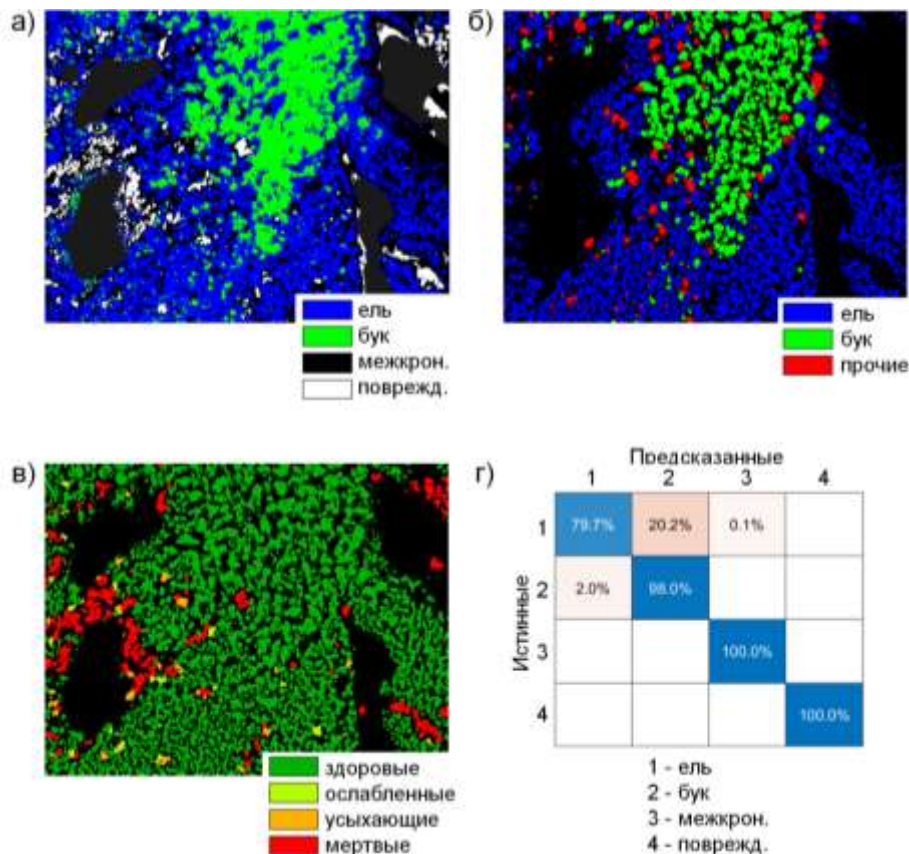


Рис. 5. Результаты тематической обработки мультиспектрального изображения: а) – попиксельная классификация, б) – классификация породного состава, в) – оценка жизненного состояния отдельных деревьев, г) – матрица ошибок попиксельной классификации.

При обработке мультиспектрального изображения априорные оценки ошибок не имеют значимых различий с ошибками кроссвалидации. Полная вероятность ошибки составляет величину менее 6%, при этом ошибки ложной тревоги и пропуска цели различаются менее чем на 1%, что указывает на сбалансированность обученного алгоритма относительно совокупности объектов. Матрица ошибок представлена на рисунке 5г. Наибольшие погрешности возникают при классификации видового состава.

Построение контуров крон отдельных деревьев позволяет улучшить результаты попиксельной классификации пород, определить градации жизненного состояния, а также оценить количество особей распознаваемых видов. Результаты распознавания видов отдельных деревьев представлены на рисунке 5б. Использование ИТСД алгоритма позволяет устранить большинство артефактов попиксельной классификации. Красным цветом выделены деревья, которые относятся к прочим видам. Оценка жизненного состояния (4 градации) представлена на рисунке 5в. По нашим оценкам, около 10% особей относятся к поврежденным деревьям и сухостю.

При отсутствии мультиспектрального оборудования, метод может быть применен также и только к фотоизображениям, однако точность тематической обработки при этом заметно

ухудшится. Результаты обработки представлены на рисунке 6. Можно видеть, что на качественном уровне результаты на рисунках 5 и 6 схожи. Однако, полная вероятность ошибки кроссвалидации возрастает до 10%. Также можно видеть наличие дополнительных артефактов на рисунке 6а и значимое увеличение ошибки для всех классов на рисунке 6г.

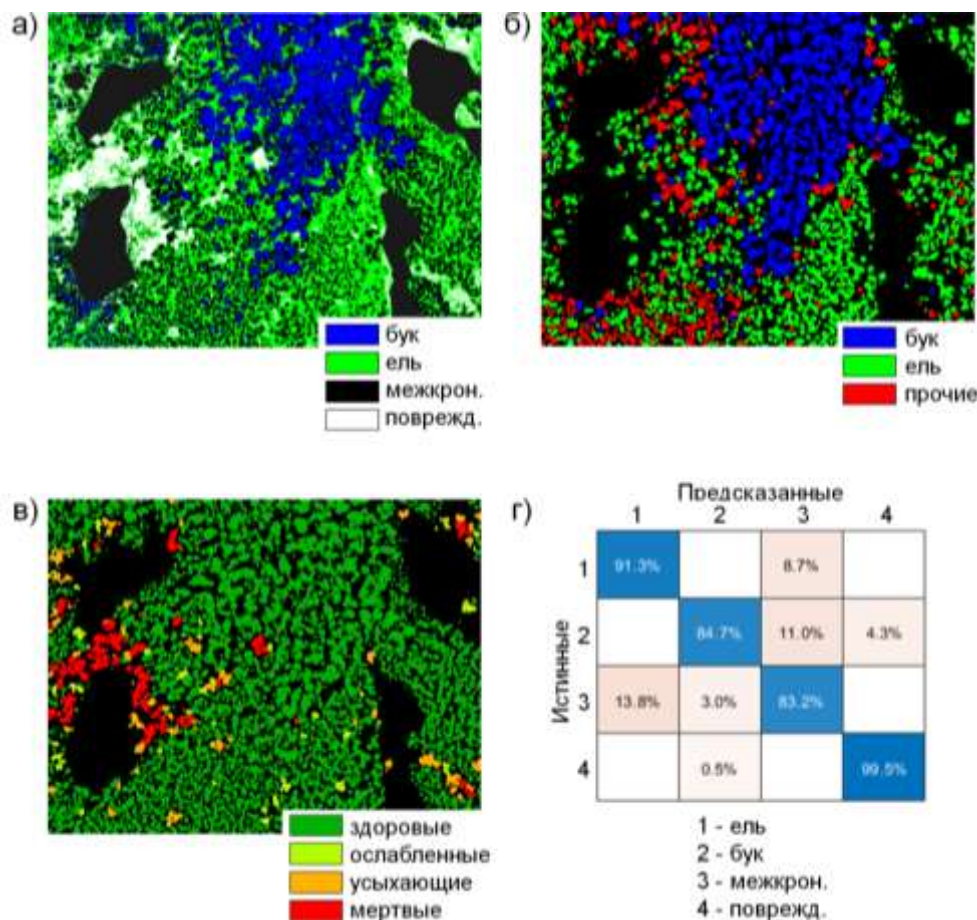


Рис. 6. Результаты тематической обработки фотоизображения: а) – попиксельная классификация, б) – классификация породного состава, в) – оценка жизненного состояния отдельных деревьев, г) – матрица ошибок попиксельной классификации.

Заключение. Представлен метод дистанционной оценки видового состава и жизненного состояния древостоев на основе совместной обработки фото и мультиспектральных изображений. Предложен усовершенствованный метод текстурной обработки, нечувствительный к артефактам сшивки изображений. Использование ИТСД алгоритма позволяет улучшить результаты попиксельной классификации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 23-29-00128 «Методы машинного обучения в задаче автоматизации обработки данных космических систем высокоточного мониторинга растительного покрова».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ørka H.O., Hauglin M. Use of remote sensing for mapping of non-native conifer species. INA Fagrapport 33, 2016. 76 p.
- [2] Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2015. V. 81(4). P. 281-329.
- [3] Jing L., Hu B., Noland T., Li J. An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2012. V 70. P. 88-98.
- [4] Ma Z., Pang Y., Wang D., Liang X., Chen B., Lu H., Weinacker H., Koch B. Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features // Remote Sensing. 2020. V. 12. P. 1078.

- [5] *Maschler J., Atzberger C., Immitzer, M.* Individual Tree Crown Segmentation and Classification of 13 Tree Species Using Airborne Hyperspectral Data // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. P. 1218.
- [6] *Hassaan O., Nasir A.K., Roth H., Khan M.F.* Precision forestry: trees counting in urban areas using visible imagery based on an unmanned aerial vehicle // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49(16). P. 16-21.
- [7] *Lin Y., Jiang M., Yao Y., Zhang L., Lin J.* Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments // *Urban forestry & urban greening*. 2015. V. 14(2). P. 404-412.
- [8] *Franklin S.E., Hall R.J., Moskal L.M., Maudie A.J., Lavigne M.B.* Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images // *International journal of remote sensing*. 2000. V. 21(1). P. 61-79.
- [9] *Johansen K., Phinn S.* Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using IKONOS and Landsat ETM+ data in Australian tropical savannahs. *Photogramm // Eng. Remote. Sens.* 2006. V. 72(1). P. 71-80.
- [10] *Mallinis G., Koutsias N., Tsakiri-Strati M., Karteris M.* Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2008. V. 63(2). P. 237-250.
- [11] *Рылов С.А., Мельников П.В., Пестунов И.А.* Спектрально-текстурная классификация гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. Т. 4(1). С. 78-84.
- [12] *Dmitriev E.V., Sokolov A.A., Kozoderov V.V., Delbarre H., Melnik P.G., Donskoi S.A.* Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia // *Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, t. XXI*. 2019. P. 111491J.
- [13] *Ferreira M.P., Wagner F.H., Aragão L.E., Shimabukuro Y.E., de Souza Filho C.R.* Tree species classification in tropical forests using visible to shortwave infrared WorldView-3 images and texture analysis // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2019. V. 149. P. 119-131.
- [14] *Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M.* Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images // *Drones*. 2021. V. 5. P. 77.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЛГОРИТМОВ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ

Добрецов Н.Н.^{1,2}, Манасян Т.Л.¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

Топографическая коррекция востребована для предварительной обработки и последующего анализа мультиспектральных космоснимков. Разработано большое количество методов топографической коррекции. Некоторые из них получены эмпирическим путем, некоторые базируются на упрощенных физических моделях освещения. Однако универсального решения для топографической коррекции не существует, как не существует общепринятого метода сравнительной оценки полученных результатов. Авторами разработан программный продукт, позволяющий выполнить топографическую коррекцию с применением различных методов, а также провести ранжирование результатов топографической коррекции на основе нескольких критериев, в качестве которых выступают статистические метрики качества.

COMPARATIVE EVALUATION OF ALGORITHMS FOR TOPOGRAPHIC CORRECTION OF MULTISPECTRAL IMAGES

Dobretsov N.N.^{1,2}, Manasyan T.L.¹

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

Topographic correction is in demand for pre-processing and subsequent analysis of multispectral satellite images. A large number of topographic correction methods have been developed. Some of them are obtained empirically; and some are based on simplified physical models of lighting. However, there is no universal solution for topographic correction, just as there is no generally accepted method for comparative assessment of the results obtained. The authors have developed a software product that allows you to perform topographic correction using various methods, as well as to rank the results of topographic correction based on several criteria, which are statistical quality metrics.

Мультиспектральные космические снимки Земли имеют множество практических применений, в том числе и в сфере геологии. Однако рельеф исследуемой местности может значительно влиять на вариации значений сигналов, регистрируемых дистанционными зондами. Например, в горных районах при одинаковом типе покрытия поверхности склоны, ориентированные в противоположную от солнца сторону, будут иметь более низкую спектральную яркость, чем освещенные солнцем склоны. Такое поведение создает множество проблем для различных видов анализа изображений дистанционного зондирования, таких как последующая классификация земного покрова и тематическая оценка. Для устранения негативных эффектов освещения, вызванных топографией, и получения значений освещенности, близких к случаю идеально ровной поверхности, применяют методы топографической коррекции.

За последние полвека было разработано большое количество методов топографической коррекции различных видов. Некоторые из них получены эмпирическим путем, некоторые базируются на упрощенных физических моделях освещения, а некоторые разрабатываются для конкретных типов поверхностей. Однако универсального решения для топографической коррекции не существует. Помимо этого, на данный момент не существует общепринятого метода сравнительной оценки результатов обработки изображений различными методами для выбора наиболее оптимального решения для конкретного снимка.

Ручная оценка результатов по каждому методу может занимать значительное время, при том, что зачастую пользователи ГИС рассматривают топографическую коррекцию только как

этап предварительной обработки изображений перед проведением их последующего анализа. В идеале требуется универсальный инструмент, который автоматизировано выбирает наиболее подходящие алгоритмы топографической коррекции для конкретного изображения.

В рамках данной работы был разработан алгоритм, осуществляющий ранжирование результатов топографической коррекции на основе нескольких критериев. Для каждого результата коррекции критерии комбинируются в число с плавающей запятой, являющееся полуколичественной оценкой применимости соответствующего алгоритма к исходному снимку. В качестве критериев выступают статистические метрики качества, возвращающие для входных данных число с плавающей запятой.

Для того, чтобы иметь возможность комбинировать значения метрик в одномерный результат, проводится нормализация значений. Результатом нормализации является трехмерная матрица из значений метрик – для каждой метрики имеется по одному численному значению из диапазона $[-1, 1]$ для каждого канала каждого изображения. Вес метрики, задаваемый пользователем, означает «важность» данной метрики, чем он больше, тем больший вклад вносит данная метрика в итоговое значение рейтинга для снимка. Значения рейтингов каналов для каждого скорректированного изображения комбинируются в одно скалярное значение рейтинга для всего снимка.

Чем больше рейтинг, тем лучше данный алгоритм топографической коррекции справился с исходным снимком. Отрицательные же значения будут указывать пользователю на тот факт, что данный метод коррекции только ухудшил большинство метрик для снимка (либо метрики с наибольшими весами).

Плагин к QGIS доступен в официальном списке дополнительных модулей к QGIS (плагин «Terraform»), или по адресу: <https://plugins.qgis.org/plugins/Terraform>.

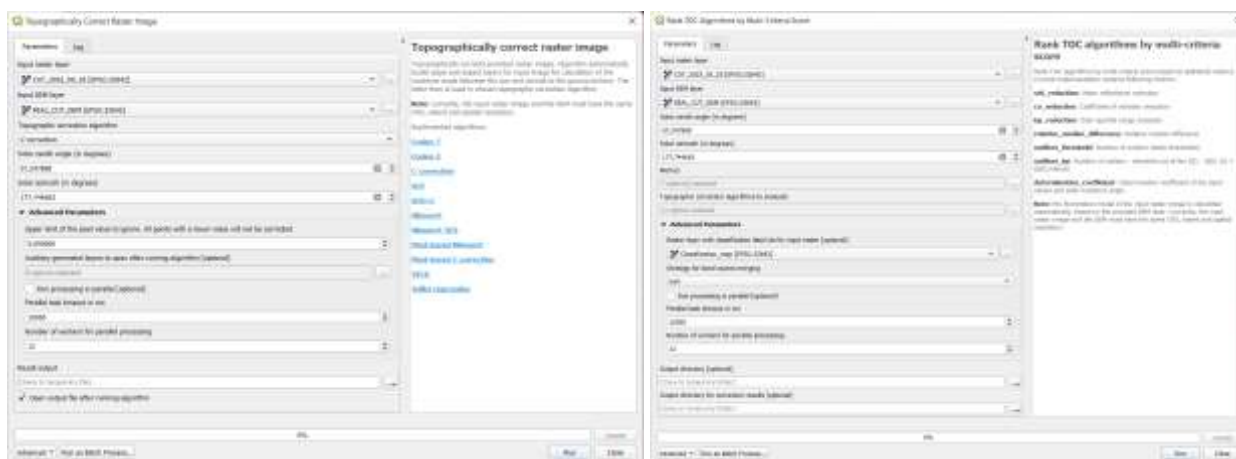


Рис. 1. Графический интерфейс processing-алгоритмов топографической коррекции и ранжирования результатов.

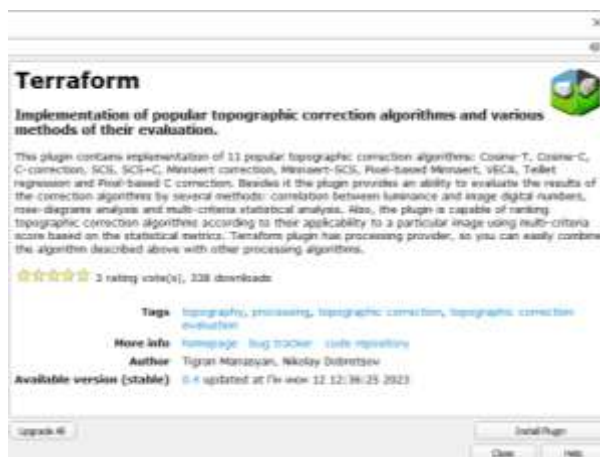


Рис. 2. Форма загрузки плагина в QGIS.

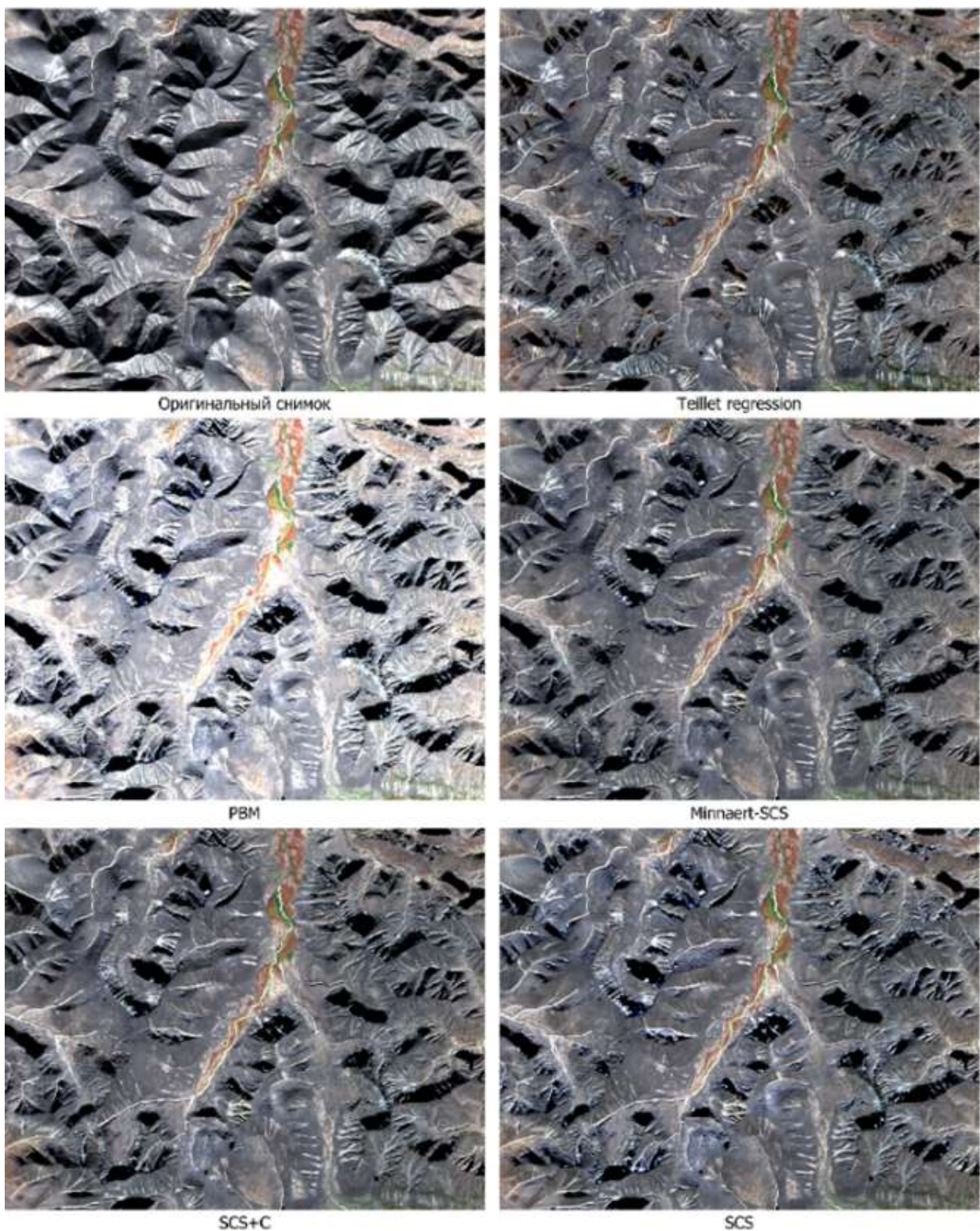


Рис. 3. Результаты топографической коррекции различными методами (Sentinel-2, Анадырский район, Чукотка).

В качестве дополнительной (аналитической) функциональности, разработаны модули построения корреляционных диаграмм и диаграмм-роз, которые позволяют количественно и графически оценить результаты топографической коррекции.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задания 122010800028-4, 122041400252-1).

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ВЕБ-СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЬ-ИРТЫШСКОГО РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Донцов А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Ловцкая О.В.
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Показаны результаты разработки геоинформационной веб-системы (ГИС), предназначенной для формирования единой научно обоснованной системы высокотехнологического комплексного экологического мониторинга (гидрологического, гидрохимического, гидробиологического) Обь-Иртышского речного бассейна и позволяющей прогнозировать экологическое состояние водных объектов с учётом изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки. Представлена архитектура геоинформационной системы, основные модули и компоненты, функциональные возможности и интерфейс пользователя. Рассмотрена структура проблемно-ориентированной базы данных, используемой для хранения и обработки информации в составе геоинформационной веб-системы.

Ключевые слова: ГИС, ДЗЗ, спутниковые данные, базы данных, экспедиционные данные, экологический мониторинг, веб-технологии.

DEVELOPMENT OF INTEGRATED GEOINFORMATION SYSTEM ARCTIC-GIS

Dontsov A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Lovtskaya O.V.
Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, Barnaul

The first results of the development of a web-based geoinformation system designed to form a unified scientifically based system of high-tech integrated environmental monitoring (hydrological, hydrochemical, hydrobiological) of the Ob-Irtysh river basin are shown, which makes it possible to predict the ecological state of water bodies, taking into account the changing climate and increasing anthropogenic load. The architecture of the geographic information system, the main modules and components, functionality and user interface are presented.

Key words: GIS, remote sensing, satellite data, databases, expeditionary data, environmental monitoring, web technologies.

Введение. Проблемы сохранения и использования водных ресурсов интернациональны и становятся все более актуальными. Вместе с тем, увеличивается число задач, связанных с достоверной и оперативной оценкой состояния параметров водных объектов, а также с предотвращением доступа к результатам измерений широкому кругу заинтересованных организаций и лиц, начиная с государственных структур и заканчивая общественными организациями. Поэтому является актуальной разработка модульных геоинформационных веб-систем, реализующих алгоритмы обработки, хранения и предоставления разноплановой информации о состоянии водных объектов [1].

В работе показаны результаты разработки геоинформационной веб-системы, предназначенной для формирования единой научно обоснованной системы высокотехнологического комплексного экологического мониторинга (гидрологического, гидрохимического, гидробиологического) Обь-Иртышского речного бассейна и позволяющей прогнозировать экологическое состояние водных объектов с учётом изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки (на примере Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области).

В настоящее время на акватории Обской губы, ее берегах и территории водосборного бассейна работают, строятся и планируются к строительству крупнейшие в России и мире объекты добычи и транспортировки углеводородов. В заливе осуществляется круглогодичная навигация на полуостров Ямал в порт Сабетта, на полуостров Гыдан к Салмановскому причалу, на Мыс Каменный к Новопортовскому терминалу. Для расширения поставок углеводородного сырья из ЯНАО, уже определяющих значительную часть морских перевозок по Се-

верному морскому пути, продолжается строительство новых танкеров-газовозов. Значительная, определяющая роль России в обеспечении углеводородным сырьем жителей Азии и Европы в настоящее время остается неизменной.

Анализ ретроспективных и современных данных позволяет установить особенности пространственно-временной организации экотональных экосистем Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области, определить соотношение глобальных, зональных, региональных и локальных, природных и антропогенных факторов их формирования и функционирования. Значительные размеры, мелководность, слабая проточность и ярко выраженная многофакториальная неоднородность по пространству и времени физических, химических и биологических характеристик Обской губы, при существующем и планируемом значительном увеличении объемов добычи и переработки углеводородов, и соответствующем развитии воднотранспортной системы, определяют необходимость оптимизации экологического мониторинга Обской губы и Обь-Тазовской устьевой области в целом. В связи с этим актуальна разработка геоинформационной системы, реализующей агрегацию тематических данных, обработку и их предоставление широкому кругу организаций и лиц, связанных с экологическим мониторингом [1].

Информационная основа и база данных ГИС. В единую информационную систему были включены следующие данные:

1. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. В настоящее время используются данные космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat-8, которые получены из открытых архивов спутниковой информации ESA (European Space Agency) и USGS (United States Geological Survey). В дальнейшем планируется разработка программных модулей для работы с Российскими космическими аппаратами.
2. Результаты контактных измерений гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик Нижней Оби, полученные в ИВЭП СО РАН при экспедиционных исследованиях в различные сезоны 2015, 2020-2022 годов совместно с Тюменским государственным университетом.
3. Результаты математического моделирования температурного и ледового режимов, солености воды в Обской губе, в том числе, в подледный период.
4. Разномасштабные векторные и растровые топографические и тематические карты.

При построении базы данных была использована модель данных CUASHI HIS и стандартизированная структура реляционной базы данных, предложенная Консорциумом университетов по развитию гидрологии для хранения и описания точечных наблюдений. Эта модель данных достаточно универсальна и может быть использована для организации хранения, поиска и извлечения информации, собранной множеством организаций для решения задач комплексного экологического мониторинга. Схема такой базы с единой расширяемой системой справочников позволяет собрать и объединить наиболее важные данные по предметной области исследования и использовать их для последующих анализа, расчётов, отображения результатов. На рисунке 1 показана общая модель базы данных ГИС, которая предназначена для хранения результатов точечных измерений.

Стандартизированная структура данных облегчает анализ информации из различных источников как для одного, так и для различных объектов исследования. Данные контактных измерений, в общем случае, имеют следующие основные характеристики:

1. Место проведения наблюдения (пространство).
2. Дата и время проведения наблюдения (время).
3. Тип и значение наблюдаемой переменной (идентификатор и значение).

Помимо этих характеристик существует много других отличительных признаков, сопровождающих данные контактных измерений. Многие из дополнительных атрибутов уточняют основные характеристики. Основными элементами такой схемы являются таблица фактов и множество таблиц измерений. Таблица фактов, как правило, содержит сведения об объектах или событиях, совокупность которых будет в дальнейшем анализироваться. Таблицы измерений содержат не изменяемые либо редко изменяемые данные. Таблицы измерений также содержат, как минимум, одно описательное поле и, как правило, целочисленное ключевое поле

для однозначной идентификации рассматриваемого параметра. Каждая таблица измерений должна находиться в отношении «один ко многим» с таблицей фактов. Структура базы данных контактных измерений не зависит от используемой геоинформационной системы. Координаты задаются в географической или проекционной системе координат либо другим способом, специально определённым для решаемой задачи. Каждая точка измерений имеет уникальный идентификатор, который может быть логически связан с одним или многими объектами в модели данных ГИС. Подобное отношение между точками измерений и объектами ГИС имеет общий характер и не несет никакой информации о структуре и значении данных, хранящихся в ГИС. Такая архитектура позволяет использовать предлагаемую структуру базы данных контактных измерений в любой геоинформационной системе.



Рис. 1. Концептуальная модель базы данных.

Для реализации базы данных использована СУБД PostgreSQL [5]. СУБД PostgreSQL – свободно распространяемая СУБД с открытым исходным кодом, поддерживающая большую часть стандарта SQL и предлагающая множество дополнительных сервисов. Приложение PostGIS добавляет PostgreSQL поддержку пространственных объектов [6]. Фактически PostGIS представляет собой пространственное расширение PostgreSQL-сервера, что позволяет использовать его как пространственную базу данных для ГИС.

Описание ГИС. ГИС разработана с применением свободно распространяемых базовые программных продуктов с открытым исходным кодом, которые предназначены для работы с пространственными данными. Серверная часть ГИС основывается на компонентах веб-платформы Symfony, которая позволяет реализовывать модульные приложения на языке программирования PHP [7]. Для работы с системой разработан веб-интерфейс, который можно разделить на две части:

- открытый раздел для посетителей веб-ресурса;
- панель администратора, через которую осуществляется управление данными, загруженными в систему, и вычислительными процессами.

Работа ГИС состоит из двух основных блоков – работа со спутниковыми данными и работа с данными-контактных измерений. На стороне сервера для визуализации пространственных данных в виде карт используется картографическая система GeoServer, которая помимо веб-интерфейса имеет развитый программный интерфейс, позволяющий автоматизировать процессы, связанные с загрузкой и отображением данных [8].

При разработке архитектуры информационной системы использован паттерн API Gateway. Этот паттерн программирования основан на применении специального шлюза, кото-

рый находится между клиентским приложением (веб-интерфейсом) и вычислительными модулями, обеспечивая единую точку входа для клиента. Применение этого паттерна сокращает число вызовов, обеспечивает независимость клиента от протоколов, используемых в программных сервисах: REST, AMQP, gRPC и других, и обеспечивает централизованное управление сквозной функциональностью [9].

Программный слой, основанный на компонентах платформы Symfony, выступает в качестве шлюза, выполняющего обработку запросов пользователей, авторизацию и разграничение доступа к данным и функциональности ГИС. С помощью программного брокера сообщений Apache Kafka происходит обмен данным между веб-системой и вычислительными модулями [9]. На рисунке 2 показана общая схема функционирования ГИС. В качестве хранилища спутниковых данных используется облачное объектное хранилище файлов S3. Данный подход позволяет гибко реализовывать масштабирование, разграничение доступа к данным. При этом существует довольно много программных библиотек, реализующих функции работы с файловыми хранилищами S3.



Рис 2. Общая схема устройства ГИС.

В ГИС можно выделить следующие основные компоненты:

1. Блок обработки, который содержит программные модули для работы со спутниковыми данными и данными экспедиционных работ.
2. Каталог данных – надстройка над СУБД ГИС, через которую выполняется поиск и фильтрация данных по произвольным запросам пользователей. Результаты поиска выдаются пользователю в виде графиков, таблиц и карт.
3. Программные интерфейсы для интеграции с наземными измерительными комплексами, сторонними сервисами пространственной информации и настольными ГИС (QGIS, GRASS, ENVI и т.д.).
4. Веб-интерфейс, при помощи которого осуществляется управление компонентами ГИС (панель администратора) и предоставление результатов обработки (публичный и закрытый разделы).

Веб-интерфейс ГИС сделан на основе платформы Bootstrap. Это свободный набор инструментов для создания сайтов и веб-приложений, который включает в себя HTML и CSS-шаблоны оформления для типографики, веб-форм, кнопок, меток, блоков навигации и прочих компонентов веб-интерфейса, включая JavaScript-расширения. Bootstrap позволяет создавать пользовательские интерфейсы, которые корректно отображаются на экранах разных устройств (компьютеры, планшеты, телефоны и т. д.). Одним из ключевых компонентов веб-интерфейса является карта, которая формируется на основе библиотеки Leaflet. Это JavaScript-библиотека для создания браузерных и адаптированных под мобильные устройства интерактивных веб-карт.

На рисунках 3 и 4 показаны примеры визуализации экспедиционных данных при помощи веб-интерфейса ГИС. На рисунке 3 показана визуализация данных в виде таблицы; при этом реализована фильтрация данных по дате, измеряемому параметру, станции, месту сбора. Также сделаны функции экспорта данных в форматах CSV, Excel, JSON. Аналогичным образом реализовано отображение данных в виде графика.

Дата	Параметр	Значение	Горизонт, м	Станция	Координаты	Место отбора
дд.мм.гггг						
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3	0.6	К1.2	64.6556, 65.6343	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3.3	0.2	К2.1	64.6584, 65.6344	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	4.4	0.2	К1.1	64.6556, 65.6343	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3	0.8	К2.3	64.6584, 65.6344	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3.4	0.8	К1.3	64.6556, 65.6343	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	5.6	0.6	К3.2	64.6612, 65.6353	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3.4	0.6	К2.2	64.6584, 65.6344	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	2.7	0.1	К7	64.6691, 65.6312	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3.5	0.8	К5.3	64.6655, 65.6305	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс
08.06.2022	Хл.а, мг/л ³	3.2	0.6	К5.2	64.6655, 65.6309	протока Большая Обь, с. Казым-Мыс

Рис. 3. Визуализация экспедиционных данных в виде таблицы.



Рис. 4. Визуализация экспедиционных данных в виде графика.

Для обработки спутниковых данных разработаны специальные вычислительные модули, которые основываются на компонентах библиотеки GDAL и программного пакета SNAP. На рисунке 5 показан пример визуализации обработанного снимка космического аппарата Sentinel-2 в виде комбинации спектральных каналов «естественные цвета» (4-3-2) и комбинации SWIR (12-8A-4), данная комбинация хорошо подходит для выделения водной поверхности и ледового покрова на спутниковом снимке.

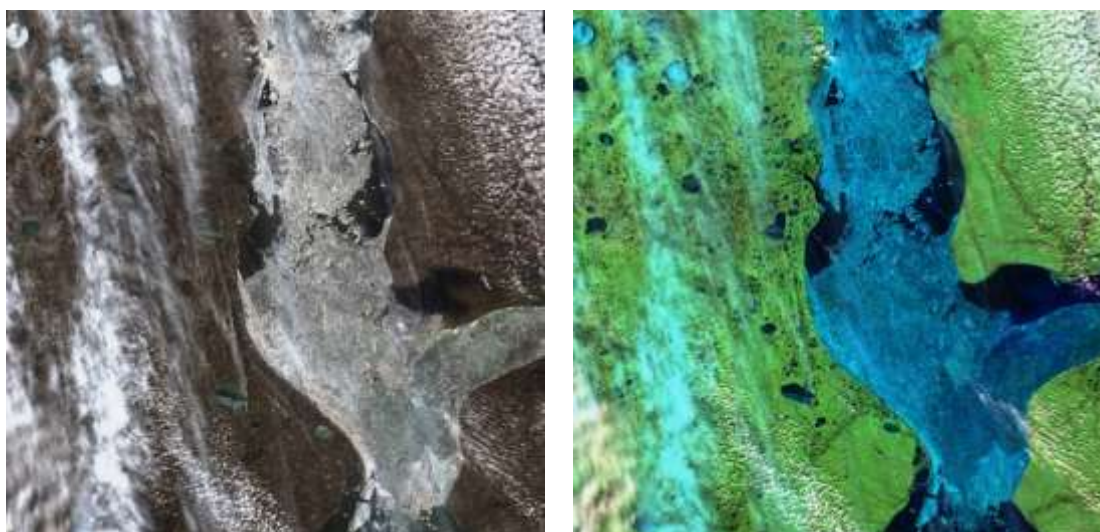


Рис. 5. Пример визуализации данных КА Sentinel-2 (13.06.2023), слева комбинация каналов 4-3-2 (естественные цвета), справа комбинация 12-8A-4 (SWIR).

Заключение. Разработанная ГИС позволяет предоставлять разноплановую информацию о состоянии водных объектов. Программные интерфейсы позволяют принимать данные с разных измерительных приборов и комплексов, а также загружать результаты экспедиционных работ при помощи веб-интерфейса.

Результаты работы используются при организации комплексного мониторинга экологического состояния водных объектов Субарктики, реализации экологической политики, образовательной и просветительной деятельности, для решения важных социальных, экономических и экологических проблем, в том числе в рамках Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВЭП СО РАН при финансовой поддержке Российского Центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Безматерных Д.М., Пузанов А.В., Папина Т.С. и др.* Перспективы совершенствования технологии экологического мониторинга поверхностных вод Обь-Иртышского бассейна // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2020. № 2(57). С. 49-58.
- [2] *Maidment D.R., ed.* CUAHSI Hydrologic Information System: Overview of Version 1.1. Consortium of Univ. for the Advancement of Hydrologic Science, Inc, 2008. 96 p. Available at: <http://his.cuahsi.org/documents/HISOverview.pdf>.
- [3] *Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Красношеев С.А., Бугаец Н.Д.* Опыт обработки информации модернизированной гидрологической сети с использованием системы управления данными CUAHSI HIS ODM // Метеорология и гидрология. 2013. № 5. С. 91-101.
- [4] *Зиновьев А.Т., Ловцкая О.В., Балдаков Н.А., Дьяченко А.В.* Геоинформационное обеспечение для решения гидрологических задач // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 60-72.
- [5] PostgreSQL. <https://www.postgresql.org> (дата обращения 25.06.2023).
- [6] Spatial and Geographic objects for PostgreSQL. <https://postgis.net> (дата обращения 25.06.2023).
- [7] Symfony. <https://symfony.ru> (дата обращения 25.06.2023).
- [8] GeoServer. <https://geoserver.org> (дата обращения 25.06.2023).
- [9] Microservice Architecture. Available from: <https://microservices.io/patterns/microservices.html> (дата обращения 25.06.2023).
- [10] *Dontsov A.A., Sutorikhin I.A.* Development of a geographic information system for data collection and analysis based on microservice architecture // CEUR Workshop Proceedings, Novosibirsk, 2021. P. 280-287.

РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ LANDSAT 8-9

Зайцев Н.Е.¹, Гостева А.А.^{1,2}, Матушко А.К.²

¹ Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В данной статье изложены описание, алгоритм работы и структура приложения, направленного на автоматизацию вычислений температуры поверхности Земли по данным Landsat, а также на решение проблем, связанных с неполнотой данных, предоставляемых Landsat.

Ключевые слова: Landsat, дистанционное зондирование, температура поверхности Земли, LST, ПО.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CALCULATING SURFACE TEMPERATURE FROM LANDSAT DATA 8-9

Zaytsev N.E.¹, Gosteva A.A.^{1,2}, Matuzko A.K.²

¹ Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

This article includes the description, operation algorithm and structure of the application aimed at automating the calculation of the Land surface temperature according to Landsat data, as well as solving problems associated with the incompleteness of the data provided by Landsat.

Keywords: Landsat, remote sensing, land surface temperature, LST, software.

Введение. В настоящее время, тема исследования температуры Земли набирает популярность, в связи с громкими исследованиями о глобальном изменении климата и о влиянии человека на температуру окружающей среды. Все больше исследователей пытаются оценить вклад урбанизации и индустриализации в процесс изменения климата. В этой связи появилось направление исследований городских островов тепла, влияющих как на локальные климатические зоны внутри городов, так и на глобальные климатические процессы.

Как правило, исследование городских островов тепла строится на основе данных дистанционного зондирования Земли, поскольку эти данные имеют наибольшее разрешение, среди всех имеющихся в настоящее время инструментов измерения наземной и приземной температуры.

Данная работа направлена на упрощение процесса получения и обработки данных дистанционного зондирования Земли для последующего анализа и исследования температуры поверхности Земли.

Исходные данные. Наиболее доступными среди спутников с тепловым каналом с высоким разрешением являются спутники серии Landsat. Для территории Сибири доступны наборы данных Landsat 8-9 OLI/TIRS коллекции 2 уровня 2, среди которых находится слой ST_B10, из которого, в свою очередь, можно получить карту температуры поверхности Земли [1].

Продукт Landsat 8-9 Surface Temperature (ST) генерируется с помощью одноканального алгоритма версии 1.3.0. Landsat 8-9 Collection 2 ST получен из 10 канала теплового инфракрасного датчика (TIRS) Collection 2 уровня 1 с использованием коэффициента отражения в верхней части атмосферы (TOA), яркостной температуры TOA (BT), усовершенствованного космического теплового эмиссионного и отражательного радиометра (ASTER). Данные глобального набора данных об излучательной способности (GED), данные нормализованного разностного индекса растительности ASTER (NDVI) и атмосферные профили геопотенциальной вы-

соты, удельной влажности и температуры воздуха, извлеченные из данных повторного анализа. Значение ST_B10 необходимо калибровать и перевести в градусы Цельсия для получения температуры поверхности Земли (Land surface temperature – LST) по следующей формуле:

$$LST = (a \cdot ST_{B10} + b) - 273.15, \quad (1)$$

где ST_B10 – значение 10 канала Landsat 8-9, a – это temperature_mult_band_ST_B10, b – это temperature_add_band_ST_B10 (их значение указано в метафайле *MPL.txt).

Проблема неполных данных. Получив вышеописанным способом температуру поверхности Земли для территории Сибири, исследователь в большинстве случаев сталкивается с отсутствием данных в некоторых областях. На рисунке 1 показаны сцены с температурой земной поверхности, рассчитанные по формуле 1 покрывающие территорию таких городов как Новосибирск, Томск, Новокузнецк, Кемерово, Красноярск, Абакан, Кызыл, Братск, Иркутск, Улан-Удэ. Области с отсутствующими данными не зависят от даты снимка, поскольку алгоритм расчета температуры поверхности с учетом всех возможных ошибок опирается на данные по излучательной способности поверхности Земли продукта ASTER GED, являющиеся статичными, рассчитанными как среднее за период с 2000 по 2008 годы [2].

Как видно на рисунке 1, некоторые интересующие исследователей территории не могут быть верно оценены из-за отсутствия данных. Области, отсутствующие из-за использования данных ASTER, не меняются в зависимости от даты полученных снимков, поскольку, как было сказано выше, данные ASTER являются статичными.

Таким образом, чтобы получить целостные карты, следует применить алгоритм расчета температуры поверхности Земли, аналогичные примененным, но рассчитанные на основе данных Landsat 8-9 уровня обработки 1 [3].

Описание алгоритма. Подробно алгоритм описан в работе авторов [4], кратко его представить можно схемой на рисунке 2.



Рис. 1. Пустые значения в данных Landsat 8-9 C2L2 в городах СФО.



Рис. 2 Алгоритм расчета температуры поверхности Земли.

Интерфейс приложения для вычисления температуры поверхности. Приложение позволит пользователю беспрепятственно загружать карты температуры поверхности Земли для интересующей его области и на доступную дату. Рассчитать температуру поверхности и сохранить результаты в каталоге пользователя. Более подробно работа приложения описана на рисунке 3.

На схеме, изображенной на рисунке 3, описаны переходы между экранами приложения. За каждый переход отвечает свой значок на экране приложения. В таблице 1 описаны элементы управления.

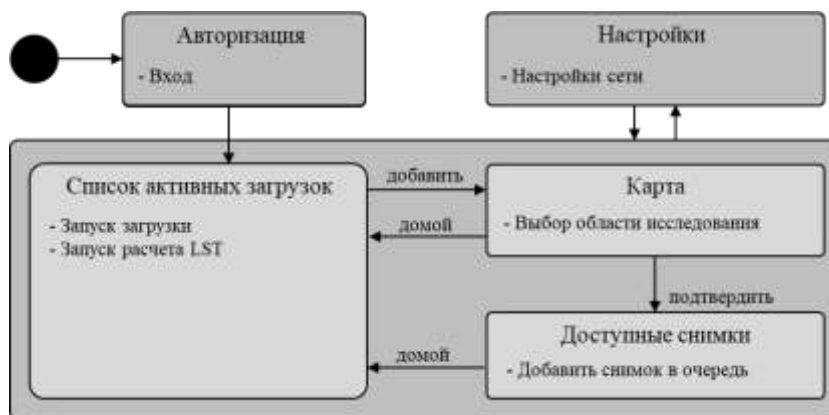


Рис. 3 Диаграмма состояний приложения.

Таблица 1. Назначение элементов управления

Наименование	Значок	Расположение	Переходы	Действия
Домой		Панель заголовка приложения	* -> список активных загрузок	-
Настройки сети			* -> настройки сети	-
Папка вывода			-	Открытие папки с файлами
Обновить			-	Обновление окна
Закреть			-	Закрытие приложения
Изменить область		Панель выбора области на карте	-	Сбросить выбор на карте
Подтвердить выбор области			Карта -> Доступные снимки	-
Добавить сцену		Управление загрузками	Список активных загрузок -> Карта	-
Запустить расчет			-	Запуск скрипта расчета LST
Начать загрузку			-	Запуск загрузки исходных данных

Поскольку загружать спутниковые снимки, с использованием M2M API [5] неавторизованному пользователю не представляется возможным, при первом запуске приложения пользователь увидит окно авторизации (рисунок 4а). После успешной авторизации пользователю должен быть доступен интерфейс для определения интересующей области на карте, а также возможность выбрать среди доступных снимков те, которые в дальнейшем требуется загрузить. Первой страницей после открытия приложения является панель управления загрузками

(рисунок б), с которой, нажатием клавиши «добавить» в правом нижнем углу экрана, осуществляется переход на страницу поиска наборов снимков, где пользователь имеет возможность выбрать интересующую область на карте (рисунок 4б).

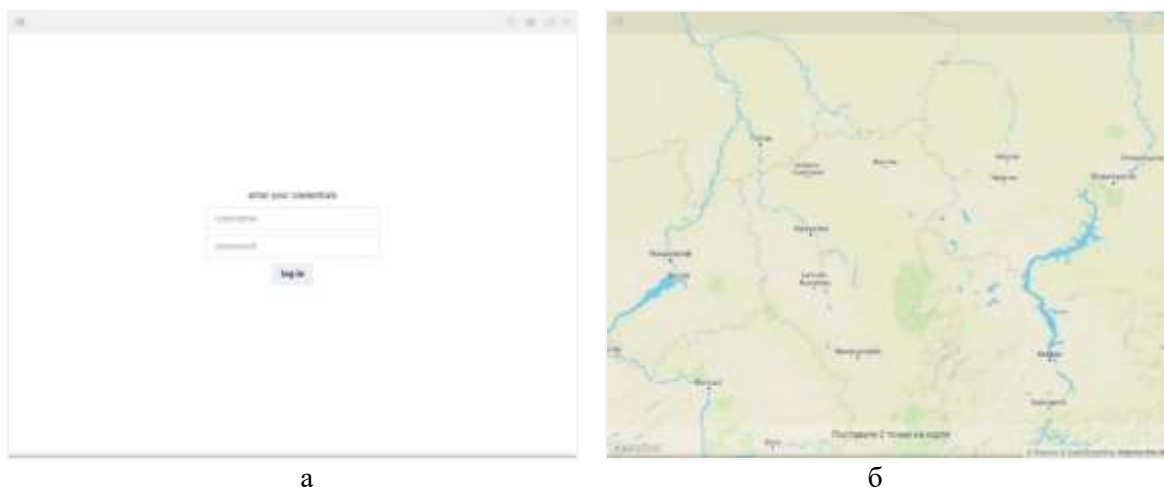


Рис. 4. а – окно авторизации, б – интерфейс выбора области интереса на карте.

Выбрав область на карте, пользователь может подтвердить выбор, тем самым открыв следующую страницу, на которой отображается список доступных сцен для выбранной области (рисунок 5). Сцены, которые уже были загружены отмечены соответствующим символом. Кликом по названию интересующего набора пользователь добавляет эту сцену в очередь, после чего он должен вернуться на первую страницу и запустить загрузку вручную.

После завершения загрузки всех файлов становится доступен значок для старта выполнения расчета температуры поверхности (рисунок 6б). Пользователю необходимо вручную запустить этап формирования LST, по завершении которого можно перейти в каталог и просмотреть и использовать результаты работы приложения.

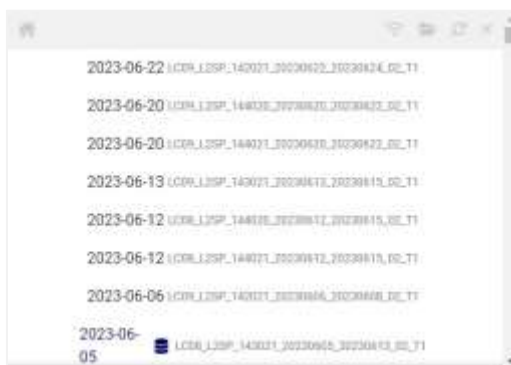


Рис. 5. Список доступных сцен на выбранную область.

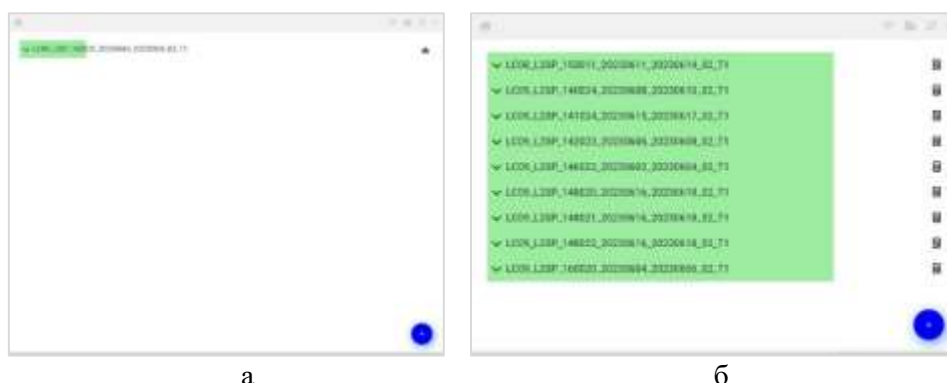


Рис. 6. а – панель управления загрузками. б – окончание загрузки снимков, активация значка калькулятора.

Помимо вышеописанного интерфейса, панель управления загрузками (рисунок 6а) предоставляет возможность просмотра прогресса выполнения задач, а именно загрузки исходных данных и расчета карты температуры поверхности, а также возможность повторного запуска этих процессов при необходимости.

Стек технологий. Разработка приложения включила в себя 2 этапа: реализация алгоритма, описанного выше; и создание пользовательского интерфейса.

Для реализации алгоритма расчета карты температуры поверхности Земли выбран язык программирования Python [6], поскольку набор доступных библиотек для него наибольшим образом подходит для выполнения операций над большими данными, в том числе и над данными дистанционного зондирования Земли. В частности, в рамках данной работы применяются библиотеки GDAL [7] и NumPy [8].

GDAL – набор инструментов для выполнения преобразований над растровыми и векторными геоданными, распространяемый под лицензией MIT. В данной работе GDAL отвечает за преобразование спутниковых снимков в двумерные матрицы и их загрузку в оперативную память для дальнейшей обработки, а также за обратное преобразование результирующих матриц в растровые изображения.

Дальнейшая обработка включает выполнение математических операций над матрицами. Для этого используется библиотека NumPy, предоставляющая набор соответствующих инструментов.

Используя эти технологии, алгоритм расчета карт температуры поверхности был реализован и собран в исполняемый файл, который может быть выполнен аргументами командной строки, указывающими на пользовательский каталог приложения, с указанием подкаталога, относящегося к конкретному набору снимков.

Для создания интерфейса был выбран наиболее гибкий из современных инструментов созданий интерфейсов – библиотека React [9] на языке TypeScript [10], а для запуска приложения на десктопных платформах, оно было собрано с помощью Electron-forge [11].

Описанный выше интерфейс взаимодействия требует внедрения интерактивной карты. Наиболее удобным и стабильным решением в связке с React-JS является библиотека Mapbox, основанная на технологии WebGL. Таким образом, можно подытожить стек технологий для создания интерфейса приложения:

- Язык программирования – JavaScript
- TypeScript – надстройка над JavaScript, добавляющая строгости в типизации
- MapboxGL – отображение интерактивной карты
- ReactJS – библиотека с открытым исходным кодом для разработки пользовательских интерфейсов
- Electron Forge – это универсальный инструмент, который занимается упаковкой и распространением приложений Electron.
- Electron – фреймворк, разработанный GitHub. Позволяет разрабатывать нативные графические приложения для операционных систем с помощью веб-технологий

Результаты. На примере карты Кызыла (рисунок 7а) и Абакана (рисунок 7б) представлена целостное покрытие территории значениями температуры поверхности.

На примере пяти городов было произведено сравнение полученных результатов. Чтобы провести их оценку из одних исходных значений температуры поверхности было принято решение вычесть полученные по результатам программы. Результаты вычислений были сосредоточены по границам городов и по зональной статистике были определены медианные значения. Полученные значения по каждому городу представлены в Таблице 2.

Полученные значения показывают, что результат работы приложения, а именно рассчитанные температуры поверхности могут быть использованы для решения различных научных задач.

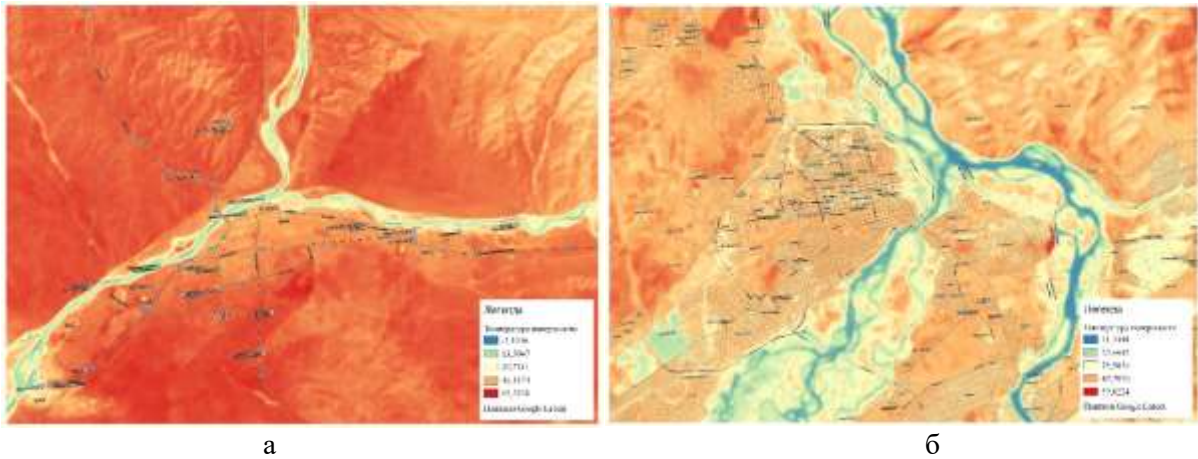


Рис. 7. а – температура поверхности г. Кызыл. б – температура поверхности г. Абакан.

Табл. 2. Медианные значения разницы между полученными результатами и в исходных данных Landsat 8-9 L2C2.

Город	mediana «середина»
Новосибирск	-0,56
Томск	0,20
Кызыл	-0,46
Абакан	-0,63
Кемерово	0,18

Заключение. Разработано приложение для упрощенной загрузки спутниковых снимков Landsat 8-9 и формирования карт температуры поверхности Земли без пропуска значений. Данное приложение было протестировано в рамках выпускной квалификационной работы бакалавра Сибирского федерального университета. Показало широкие возможности для анализа всего набора данных Landsat 8-9 за более чем десятилетний период.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сайт Геологической службы США. USGS. Landsat Missions. Landsat8. <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php> (дата обращения: 08.06.2023).
- [2] Сайт ASTER-GED – Emissivity. <https://emissivity.jpl.nasa.gov/aster-ged> (дата обращения: 08.06.2023).
- [3] Malakar N. K., Hulley G. C., Hook S. J., Laraby K., Cook M., Schott J. R. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1-19. DOI:10.1109/tgrs.2018.282482.
- [4] Гостева А.А. Зайцев Н.Е., Матушко А.К. Автоматизация вычисления температуры поверхности по данным теплового диапазона Landsat 8-9 на территории Центральной Сибири // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3. С. 56-60.
- [5] USGS. M2M API. <https://m2m.cr.usgs.gov> (дата обращения 19.06.2023).
- [6] Python Software Foundation. Python. <https://www.python.org> (дата обращения 19.06.2023).
- [7] Rouault E., Warmerdam F., Schwehr K., Kiselev, A., Butler H., and other. GDAL (v3.7.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7920947> (дата обращения 19.06.2023).
- [8] NumPy. <https://numpy.org> (дата обращения 19.06.2023).
- [9] React. The library for web and native user interfaces. <https://react.dev> (дата обращения 19.06.2023).
- [10] Microsoft. TypeScript. <https://www.typescriptlang.org> (дата обращения 19.06.2023).
- [11] Electron Forge. <https://www.electronforge.io> (дата обращения 19.06.2023).

ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ЗОН

Замараев Р.Ю., Попов С.Е.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

Для решения практических задач мониторинга природных и техногенных процессов широко используются спутниковые снимки, получаемые активными и пассивными сенсорами для величин различной природы и размерности. Как правило, полученные данные комбинируются в простые и сложные индексы, отражающие различные аспекты состояния земной поверхности. На фоне мультиспектральных растровых изображений особое место занимают радарные снимки, которые после обработки и вычисления смещений (скоростей смещений) представляют собой разреженные векторные (точечные) объекты. Для обеспечения пространственной совместимости мультиспектральных изображений и карт смещений для последних предложен алгоритм оценки стабильности территорий и растеризации. В качестве приложения решалась задача обнаружения потенциальных оползневых зон на бортах карьеров путем построения комбинированного индекса стабильности и отражательной способности участков земной поверхности по данным миссий Sentinel-1 и Sentinel-2.

Ключевые слова: смещения, изменение влажности и структуры земной поверхности, радарная интерферометрия, мультиспектральные снимки, Sentinel-1, Sentinel-2, совместная обработка, комбинированные индексы, оползневая опасность.

TECHNIQUE OF RADAR AND MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES PROCESSING TO DETECT POTENTIAL LANDSLIDE ZONES

Zamaraev R.Y., Popov S.E.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

Satellite images are widely used to solve practical problems of monitoring natural and man-made processes. Obtained data mostly are combined into simple and complex indices that estimate reflecting various aspects of the state of the Earth's surface. Against the background of multispectral raster images, radar images occupy a special place, which, after processing and calculating displacements (displacement velocities), represent sparse vector (point) objects. To ensure spatial compatibility for displacement maps an algorithm for assessing the stability of territories and rasterization is proposed. As an application, the task of detecting potential landslide zones on the sides of quarries was solved by constructing a combined index of stability and reflectivity of land surface areas from data of the Sentinel-1 and Sentinel-2 missions.

Keywords: displacements, changes in humidity and structure of the Earth's surface, radar interferometry, multispectral images, Sentinel-1, Sentinel-2, joint processing, combined index, landslide risk.

Введение. В настоящее время промышленная и гражданская инфраструктура изобилует протяженными геологическими образованиями с большими перепадами высот типа насыпей, дамб, бортов карьеров и отвалов. Они подвержены интенсивными эрозийными процессами, что может при инженерных ошибках и/или стечении неблагоприятных факторов привести к обвалам и оползням. Последние являются причиной аварийных и катастрофических ситуаций, несут угрозу жизни и здоровью людей, экологии, гражданской и промышленной инфраструктуре.

Поэтому актуальной становится задача мониторинга таких протяженных объектов с целью раннего обнаружения потенциальных оползневых зон с целью планирования предупредительных и восстановительных мероприятий.

Причины, приводящие к оползням разнообразны. Это может быть подмывание основания борта донными водами, размывание борта сверху стокам поверхностных вод, ветро-дождевая эрозия, изменение формы (оседание) борта, антропогенные и природные сейсмические воздействия. Итогом становится потеря устойчивости борта и сползание составляющих его материалов под собственным весом от постепенного до катастрофического.

Из этого сублимированного описания физической природы оползней становятся понятными те свойства земной поверхности, которые следует наблюдать и оценивать для определения оползневых зон. Прежде всего это текущая влажность территории и ее изменчивость, а также интенсивность и изменчивость вертикальных смещений.

Необходимые данные для построения релевантных оценок этих свойств предоставляют спутниковые мультиспектральные и радарные снимки, что подтверждено в большом количестве работ других авторов.

Так в статье [1] приведено комплексное исследование доказывающее, что радарные данные Sentinel-1 типа IW GRDH [2] и мультиспектральные данные Sentinel-2 типа S2A и S2B [3] обладают достаточным потенциалом для сравнительной и количественной оценки водонасыщения почвы. Важным для решаемой задачи результатом стало выделение спектральных полос с наибольшей селективностью, это ближний инфракрасный диапазон (полоса 8) 833–835 нм и коротковолновой инфракрасный диапазон (полоса 12) 2185–2204 нм мультиспектрального снимка. Также показано, что данные типа IW GRDH с поляризацией VV, VH или их комбинация VV+VH достаточно хорошо отслеживают изменение водонасыщенности.

В статье [4] проведено похожее исследование с использованием мультиспектральных данных Sentinel-2 по выделению спектральных полос с наибольшей селективностью относительно сухих, водонасыщенных грунтов и чистой водной поверхности. Предложен новый индекс на основе ближнего и коротковолнового инфракрасных диапазонов с использованием полос №№ 5 и 11 соответственно.

В статье [5] проведено исследование по использованию радарных данных Sentinel-1 типа IW GRDH для количественной оценки водонасыщенности поверхности. Авторам удалось получить и откалибровать модель на основе VV-изображения территории. Общность, переносимость этого решения остается под вопросом, но пригодность для отслеживания изменений структуры поверхности не вызывает сомнений. Дополнительным доказательством служит наличие отработанных алгоритмов обнаружения изменений в виде готовых решений на платформе Google Earth Engine [6].

Для оценки интенсивности и изменчивости вертикальных смещений авторами ранее было разработано оригинальное решение, представленное в [7], суть которого состоит в следующем:

1. производится обработка длинной, регулярной серии радарных данных Sentinel-1 (SLC) [8] методом малых базовых линий (SBAS) [9] для получения значений высот и пространственно-временной когерентности участков (пикселей).
2. из обработанных данных извлекаются и нормализуются высоты участков как упорядоченные по датам вектора значений. Итогом является таблица данных, где участки рассматриваются как объекты, а даты – как признаки.
3. производится классификация участков методом k-средних. Это позволяет разделить множество на кластеры по подобию профилей изменения высот во времени.
4. для всех участков каждого кластера устанавливается единое значение когерентности равное среднему по кластеру; когерентность принимается как оценка подвижности участка – чем меньше когерентность, тем участок подвижнее.

Результатом является массив координат центров участков и соответствующие кластеру участка значения когерентности, которые можно отобразить на карте в удобной цветовой схеме.

Подход и решение. Имеющийся набор частных решений предлагается объединить в комплексный индекс, отражающий оползневый потенциал территории. Поскольку предполагается оценивать показатель типа риска, то рациональными видятся нормировки индексов в диапазон от 0 до 1.

Попиксельное совмещение индексов, определяемых по мультиспектральным и GRDH данным это не представляет сложности, достаточно произвести подгонку разрешения изображений (ресэмплинг). Но карта когерентности представляет собой нерегулярное разреженное множество точек в пространстве географических координат.

Чтобы совместить карту когерентности с растровыми изображениями остальных индексов применяется построение по множеству точек тепловой карты (Heat Map) методом триангуляции Делоне (Delaunay) с одновременным заданием требуемого разрешения конечной матрицы.

В итоге синтезирована схема генерации комплексного индекса, представленная на рисунке 1. Данные GRDH преобразуются в индекс изменений поверхности I_g согласно [5, 6]. Мультиспектральные данные преобразуются в индекс водонасыщенности грунта I_s на основе результатов [1]. Индекс подвижности поверхности I_d реализован согласно алгоритму [7]. Для выравнивания масштаба и ввиду отсутствия представлений о степени значимости отдельных индексов все они и комплексный индекс нормируются в диапазон от 0 до 1 (оператор Norm на схеме).

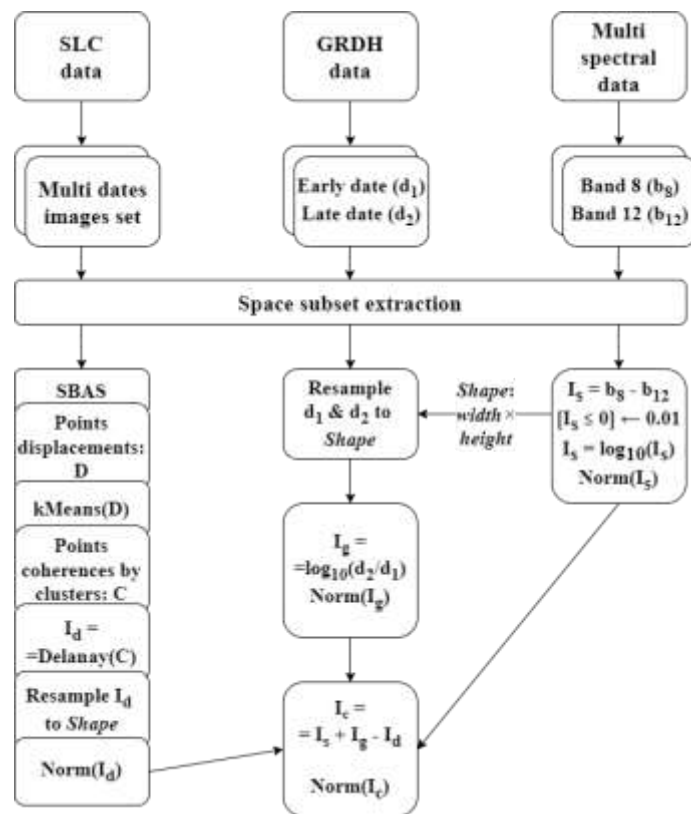


Рис. 1. Схема построения комплексного индекса оползневой опасности территории.

Набор данных и тестовый объект. Для демонстрации работы алгоритма выбран участок «Колыванский» компании «Сибантрацит» около с. Елбаши Искитимского района Новосибирской области. Для анализа были выбраны данные, представленные в таблице 1.

Здесь 18 июля 2020 года в северо-западной части участка произошёл сход пустой породы (оползень) в водоём для технических нужд с существенным изменением геометрии борта. Данное событие ввиду масштабности события было освещено в прессе и хорошо визуализируется на снимках Sentinel-2 (рис. 2).

Чтобы оценить оползневую опасность территории объекта был выбран ближайший и предшествующий событию S2A снимок за 16.07.2020. Также были выбраны ближайших и

предшествующих событию два GRDH снимка за 15.06.2020 и 16.07.2020. Также был составлен набор SLC снимков, предшествующих событию за период без снежного покрова – всего 8.

Для лучшего восприятия сцена была расширена относительно объекта до [83,57; 83,66] по долготе, и до [54,63; 54,72] по широте.

Спецификация данных для теста.

Тип данных	Идентификатор сцены	Дата
S2A	S2A_MSIL2A_20200716T053651_N0214_R005_T44UPF_20200716T080828	16.07.2020
GRDH	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200615T004426_20200615T004451_022037_029D2D_F8EE	15.06.2020
...	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200716T003604_20200716T003629_022489_02AAF7_F7D1	16.07.2020
SLC	S1B_IW_SLC__1SDV_20200404T004421_20200404T004449_020987_027CFA_C016	04.04.2020
...
...	S1B_IW_SLC__1SDV_20200709T004426_20200709T004454_022387_02A7D7_9D1C	09.07.2020

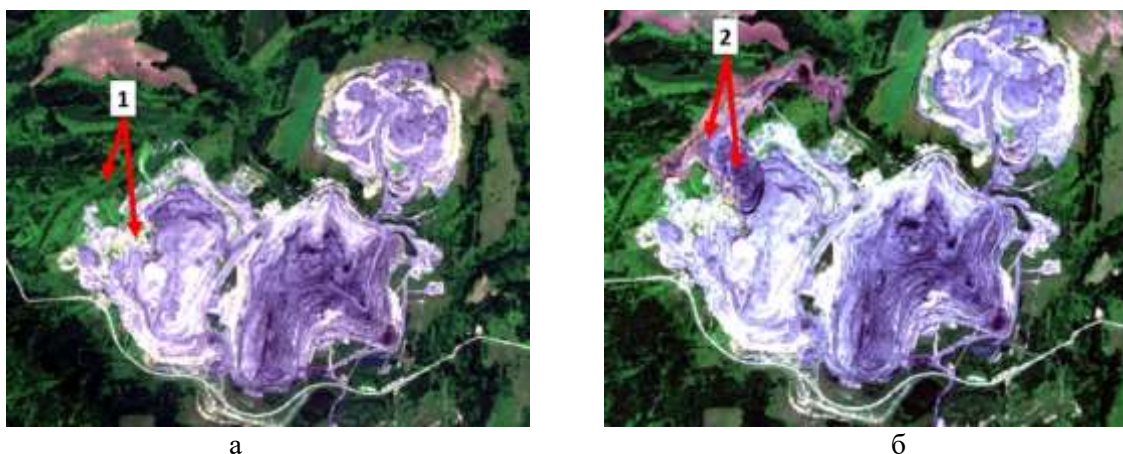


Рис. 2. Изображение объекта (фильтр RGB): а) до события (16.07.2020); б) после события (19.07.2020).

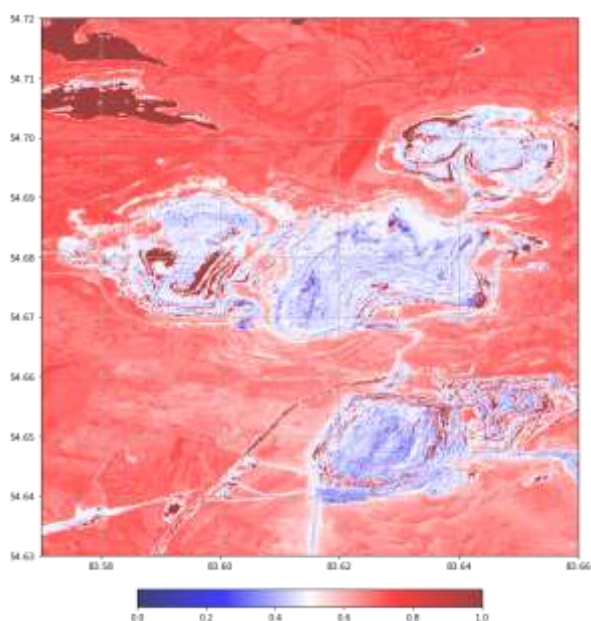


Рис. 3. Изображение индекса водонасыщенности I_s .

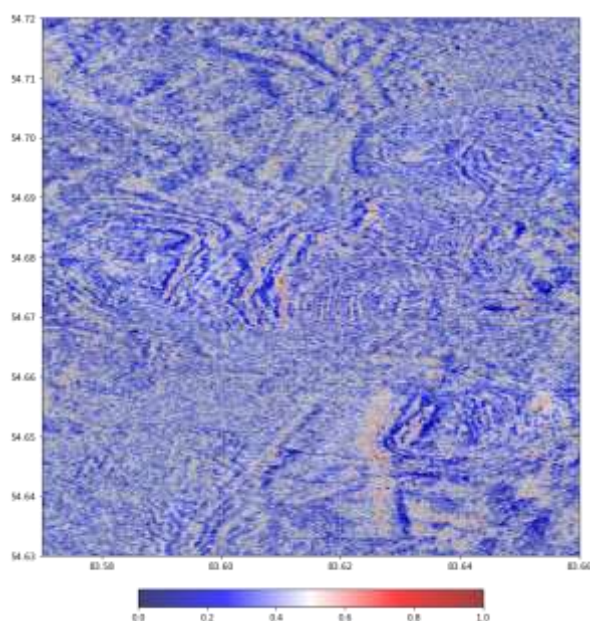


Рис. 4. Изображение индекса изменений поверхности I_g .

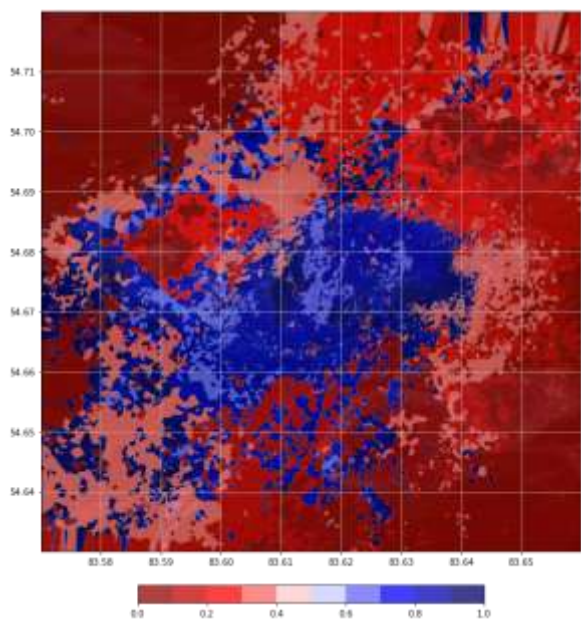


Рис. 5. Изображение индекса подвижности Id.

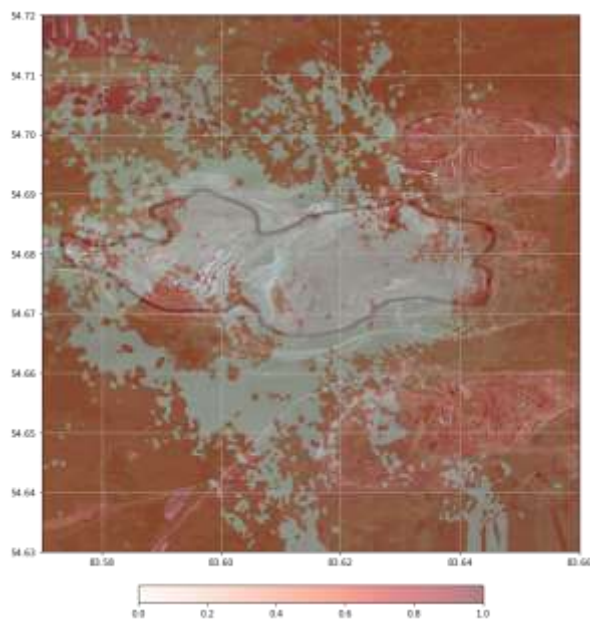


Рис. 6. Изображение индекса оползневой опасности Is.

Результаты. На рисунках 3-6 последовательно представлены изображения отдельных индексов и комбинированный индекс оползневой опасности. На рисунке 6 для наглядности очерчен контур (черная сплошная линия) верхнего обреза карьера. Неоднородная, хотя и узнаваемая местами структура отдельных индексов после комбинирования приобрела выраженную градацию.

Можно выделить хорошо подготовленные стабильные и сухие зоны со значением индекса (рис. 6) менее 0,2. Они составляют большую часть контура карьера. Однако, есть и очевидно опасные большие зоны в южной и, особенно, в восточной части.

Интересно, что отмеченный ранее оползень произошел в окрестности координат (83,59; 54,69) на северо-западе. Однако и эта зона входит в число потенциально опасных.

В данном примере, однако, остается неопределённость с подвижностью территории. Здесь ведется разработка полезных ископаемых, и огромные объемы пород регулярно перемещаются с места на место. Отделить природную и антропогенную подвижность (рис. 5) пока не представляется возможным.

Заключение. Представленная технология получения индекса оползневой опасности, связывающего несколько представлений о стабильности и водонасыщенности земной поверхности, показала свою работоспособность, изображение комбинированного индекса хорошо интерпретируется.

Однако в конкретных случаях могут потребоваться поправки к индексу подвижности там, где рельеф существенно изменяется текущей человеческой деятельностью.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Gangat R., Van Deventer H., Naidoo L., Adam E.* Estimating soil moisture using Sentinel-1 and Sentinel-2 sensors for dryland and palustrine wetland areas. *S Afr J Sci.* 2020; 116 (7/8), Art. #6535, 9 p. DOI:10.17159/sajs.2020/6535.
- [2] Описание данных типа GRDH. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> (дата обращения 22.06.2023).
- [3] Описание данных типа S2A. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2> (дата обращения 22.06.2023).
- [4] *Jiang W., Ni Y., Pang Z., He G., Fu J., Lu J., Yang K., Long T., Lei T.* A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-3-2020, 33-38. DOI:10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020, 2020.

- [5] *Garkusha I.N., Hnatushenko V.V., Vasyliov V.V.* Using Sentinel-1 data for monitoring of soil moisture. 2017. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA. 2017. P. 1656-1659. DOI:10.1109/IGARSS.2017.8127291.
- [6] *Canty M.J., Nielsen A.A., Conradsen K., Skriver H.* Statistical Analysis of Changes in Sentinel-1 Time Series on the Google Earth Engine. *Remote Sens.* 2020. 12, 46. DOI:10.3390/rs120100467.
- [7] *Попов С.Е., Замираев Р.Ю. Мигов Л.С.* Обнаружение оползней и оползневых зон на бортах карьеров по данным радарной интерферометрии // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы IX Международной науч. конф. Красноярск, 13-16 сентября 2022 г. Красноярск: Сиб. федер. ун-тет., 2022. С. 130-135 (316).
- [8] Описание данных типа SLC. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/single-look-complex> (дата обращения 22.06.2023).
- [9] *Lanari R. et al.* Sentinel-1 results: SBAS-DInSAR processing chain developments and land subsidence analysis. 2015. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy. 2015. P. 2836-2839, DOI:10.1109/IGARSS.2015.7326405.

ТРЕНДЫ И СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДАРНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА $dpRVI$ ALOS PALSAR-1/2 НА ТЕСТОВЫХ УЧАСТКАХ СОСНОВОГО ЛЕСА И МОЛОДНЯКА

Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Балтухаев А.К.
Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

В докладе представлены результаты анализа нерегулярных временных рядов радарного вегетационного индекса $dpRVI$ для соснового леса и соснового подроста в окрестностях г. Улан-Удэ. Индексы $dpRVI$ рассчитаны с помощью облачных технологий GEE по данным с двойной поляризацией ALOS PALSAR-1/2 за 2007-2019 гг. Для тестовых участков произведена оценка сезонных вариаций $dpRVI$. Установлен значимый долговременный тренд роста $dpRVI$ для соснового молодняка $y=0,0027t-0,0289$ ($r=0,50$), где t – возраст лесного подроста, отсчитываемый от момента лесного пожара 2003 г., уровень значимости 0,05 и 0,01.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесной подрост, ALOS PALSAR, облачные технологии GEE, $dpRVI$, сезонные изменения, тренд.

TRENDS AND SEASONAL CHANGES OF THE RADAR VEGETATION INDEX $DPRI$ ALOS PALSAR-1/2 ON TEST PLOTS OF PINE FOREST AND YOUNG

Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Baltukhaev A.K.
Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude

The report presents the results of the analysis of irregular time series of the radar vegetation index $dpRVI$ for pine forests and pine undergrowth in the vicinity of Ulan-Ude. The $dpRVI$ indices were calculated using GEE cloud technologies based on data with double polarization ALOS PALSAR-1/2 for 2007-2019. Seasonal variations of the $DPVI$ were estimated for the test plots. A significant long-term growth trend of $DPVI$ for pine young $y=0.0027t-0.0289$ ($r=0.50$) has been established, where t is the age of forest undergrowth, counted from the time of the 2003 forest fire, the significance levels are 0.05 and 0.01.

Keywords: remote sensing, forest undergrowth, ALOS PALSAR, GEE cloud technologies, $DPRI$, seasonal changes, trend.

Введение. На современном этапе развития технологий сформированы и продолжают накапливаться огромные базы данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), получаемых многочисленными космическими и бортовыми датчиками с различным спектральным, пространственным, временным и радиометрическим разрешением. Созданы облачные платформы Amazon Web Services (AWS), Azure by Microsoft с элементами искусственного интеллекта и Google Earth Engine (GEE) для хранения, виртуальной обработки и анализа большого массива данных снимков на продолжительных временных интервалах времени и различного масштаба пространственного охвата территории, вплоть до глобального [1-6]. Последняя платформа GEE является наиболее распространенной и обеспечивает бесплатный доступ к данным. Это дает возможность учёным исследовать объекты земной поверхности и атмосферные явления в динамике.

К сожалению, доступ к спутниковым радиолокационным данным значительно ограничен в силу их двойного предназначения и других причин, особенно для российской территории, в том числе для Байкальского региона. В отличие от оптического и теплового диапазонов, где съёмка проводится регулярно в течении нескольких десятилетий, а в последнее время фактически ежедневно, в радиодиапазоне сетка данных до сих пор значительно разрежена в пространстве и времени. В частности по Байкальскому региону в дециметровом диапазоне, с глубиной проникновения радиолокационного импульса в лесную среду достаточной для оценки и мониторинга высоты, биомассы растительности и т.п. характеристик [7], количество сеансов поляриметрической съёмки ALOS PALSAR с двойной поляризацией не превышает двух-трёх

десятков, а с полной поляризацией или отсутствуют или единичны, не превышает двух-трёх за весь период функционирования спутникового радара с синтезированной апертурой (РСА).

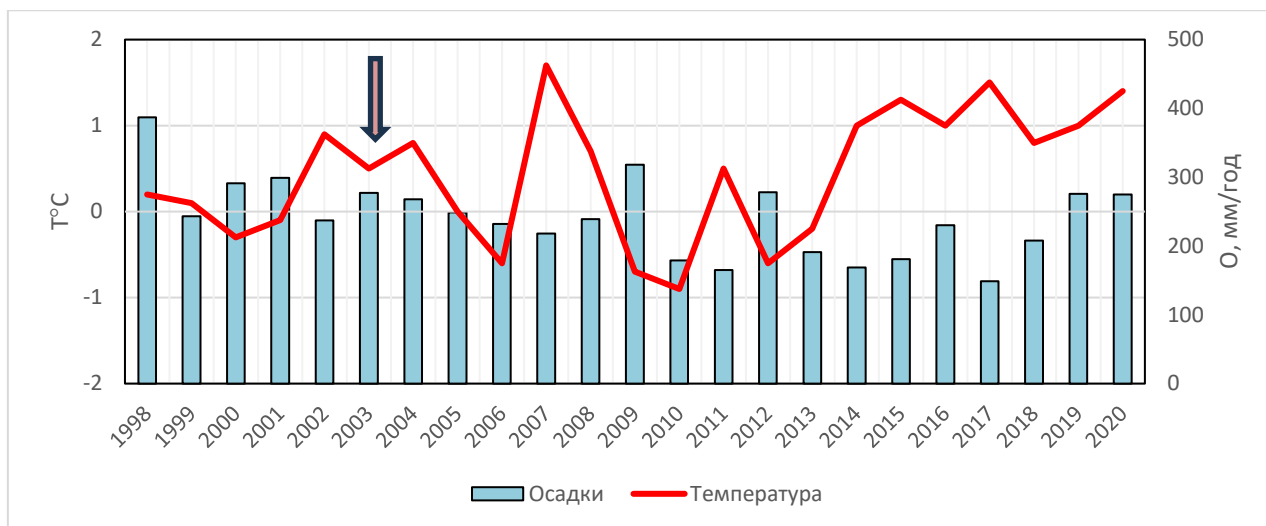
Цель данной работы исследование возможности оценки долговременных и сезонных изменений вегетативного состояния зрелого соснового леса и соснового молодняка на основе нерегулярных временных рядов радиолокационных поляриметрических данных ALOS PALSAR дециметрового диапазона. В качестве индикатора использован радарный вегетационный индекс для данных с двойной поляризацией dpRVI (radar vegetation index from dual-pol SAR data), чувствительный к росту растительности [8].

Территория исследования и спутниковые данные. Территория исследования расположена в окрестностях Улан-Удэ, в предгорьях хребта Улан-Бургас, географические координаты: 107,64 с.ш., 51,90 в.д. (см.рис.1-а). Участки зрелого соснового леса и соснового молодняка расположены в гористой местности, площадью 21 га и 69 га соответственно (см.рис.1-б). Превышение высот над уровнем долин р. Селенга и р.Уда менее 300 м, максимальная высота порядка 800 м над уровнем моря. Первый участок относительно пологий, с уклонами до 5°. Второй участок более гористый, с крутизной склонов до 30°. До лесного пожара весной 2003 года здесь также произрастал сосновый лес с аналогичными спектральными характеристиками [9, 10]. В 2004-2006 гг. в низинах и на пологих склонах были проведены лесовосстановительные мероприятия и высажены саженцы сосны обыкновенной. На остальной территории происходит естественное восстановление леса. Климат данной местности резко континентальный засушливый. В течении периода исследования среднемесячные температуры варьировались от $-22,8 \pm 2,3^{\circ}\text{C}$ в январе до $+21,0 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$ в июле. Средние значения и стандартные отклонения вычислены по архивным климатическим данным метеостанции г. Улан-Удэ [11]. Суммарное количество осадков варьировалось от 149 до 318 мм/год, среднегодовое количество составило 220 ± 52 мм/год. На рис.2-а представлены графики временных рядов среднегодовой температуры $T^{\circ}\text{C}$ и количества осадков O мм/год. Стрелкой отмечен год лесного пожара 2003 г. с повышенным значением среднегодовой температуры и пониженным количеством осадков, ставший точкой отсчёта возраста лесного молодняка на участке 2.

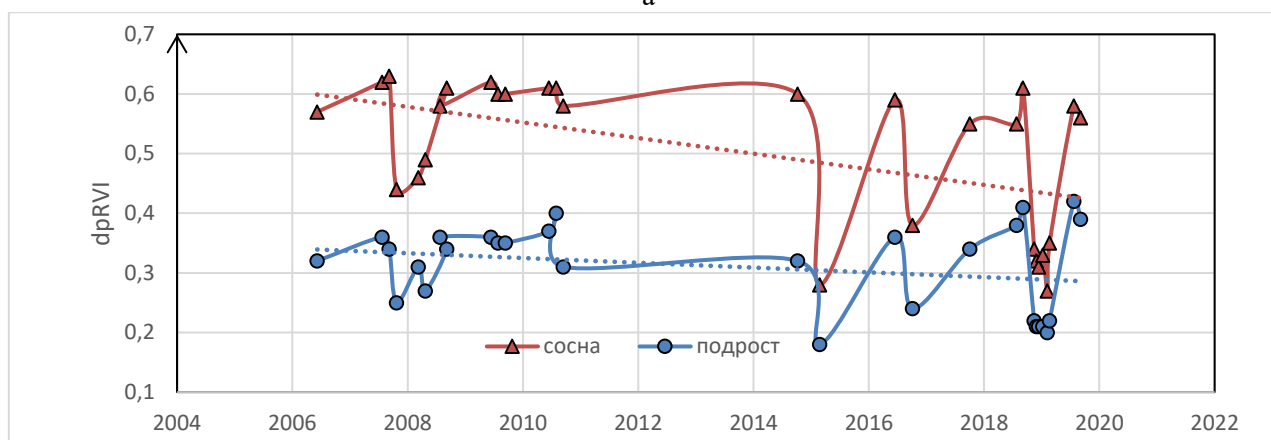
Для каждого полигона с использованием облачной технологии GEE по данным дециметрового диапазона ALOS-1 PALSAR-1 с двойной поляризацией (vv, vh) за период 2007–2010 гг. и ALOS-2 PALSAR-2 за период 2015–2019 гг. были рассчитаны усреднённые по территории значения радарных вегетационных индексов dpRVI. На рис.2-б представлены временные ряды индекса для участков 1 и 2. На приведённых графиках заметна малочисленность ($n=29$), неравномерность и нерегулярность данных по территории исследования. Из-за преобладания летних более высоких значений в период до 2010 г. и зимних низких значений в период после 2015 г. наблюдаются ложные отрицательные тренды (прямые пунктирные линии).



Рис. 1. а) Местоположение территории исследования в окрестностях г. Улан-Удэ; б) схема расположения участков соснового леса и соснового молодняка.



а



б

Рис. 2. Временные ряды: а) среднегодовой температуры $T^{\circ}\text{C}$ и количества осадков O по метеостанции г. Улан-Удэ; б) радарного вегетационного индекса $dpRVI$ для соснового леса и соснового молодняка по данным ALOS PALSAR-1/2.

Методика обработки и результаты. В работах [7, 9, 10, 12] показаны возможности применения радарного вегетационного индекса RVI для оценки и мониторинга лесного подростка на ранних стадиях послепожарного лесовосстановления. Индекс $dpRVI$, предложенный в работе [13] показал высокую чувствительность и более сильную корреляцию с биофизическими параметрами сельскохозяйственной растительности в S -диапазоне по сравнению с четырьмя часто используемыми индикаторами: 1) радарным вегетационным индексом $RVI=4\sigma_{vh}^0/(\sigma_{vv}^0 + \sigma_{vv}^0)$; 2) поляриметрическим радарным вегетационным индексом $PRVI$; 3) двухполяризационным вегетационным индексом $DPSVI$ и 4) отношением коэффициентов обратного рассеяния на поперечной и согласованной поляризациях $\sigma_{vh}^0/\sigma_{vv}^0$. Данное исследование предполагает аналогичные возможности оценки и мониторинга роста лесной растительности на основе $dpRVI$ дециметрового диапазона на продолжительных интервалах времени. Индекс $dpRVI$ использует для характеристики объёмного рассеяния радиолокационного импульса лесной растительностью и подстилающей поверхностью степень поляризации m ($0 \leq m \leq 1$) и меру доминирования в механизме рассеяния β ($0 \leq \beta \leq 1$):

$$dpRVI = 1 - m\beta; \quad m = \sqrt{1 - \frac{4|C_2|}{(Tr(C_2))^2}}; \quad \beta = \lambda_1/Span,$$

где C_2 – ковариационная матрица размером 2×2 , Tr – след матрицы или сумма диагональных элементов, λ_1 – наибольшее собственное значение матрицы C_2 , $Span$ – общая мощность. Индекс $dpRVI$ принимает значения в диапазоне от 0 до 1 и увеличивается по мере роста растительности, увеличения высоты, биомассы и усложнения структуры.

Обработка временных рядов подразумевает выделение долговременного тренда (Tr), сезонной или циклической компоненты (S) и случайной составляющей (E) [14]. Рассмотрим аддитивную модель следующего вида:

$$dpRVI(t) = Tr(t) + S + E$$

Для определения сезонной составляющей произведём группировку данных по месяцам (см. рис. 3) и рассчитаем усреднённые значения там, где это возможно, т.е. при наличии нескольких наблюдений в группах 2, 6, 7, 9, 10, 11. Номера групп соответствуют номеру месяца. Усреднённое значение $dpRVI$ в группах 1, 3, 4 и 12 с одиночными данными будет представлено соответственно одним значением. В группах 5 и 8 отсутствующие данные будут замещены средними значениями двух соседних групп:

$$dpRVI_i = \frac{dpRVI_{i-1} + dpRVI_{i+1}}{2}$$

Сформированные таким образом «усреднённые» $dpRVI$ из неравноточных кусочков и точек, представлены на рис.3 пунктирными кривыми. Несмотря на очевидные недостатки этот подход представляется единственно возможным для оценки сезонного хода в условиях недостаточных данных. Среднегодовые значения и стандартные отклонения сгруппированных данных $dpRVI$ для сосны и соснового подроста равны $0,469 \pm 0,121$ и $0,289 \pm 0,068$. Вычитая среднегодовые значения из «усреднённых» данных, получим искомые сезонные составляющие S , которые представлены в таблице 1. Как видно по графику и табличным данным минимальные значения S для соснового леса и подроста соответственно равны $-0,169$ и $-0,089$ в зимний период, максимальные $+0,131$ и $+0,089$ в летний. Амплитуда сезонных изменений $dpRVI$ достигает для соснового леса $0,300$ и для лесного подроста $0,178$.

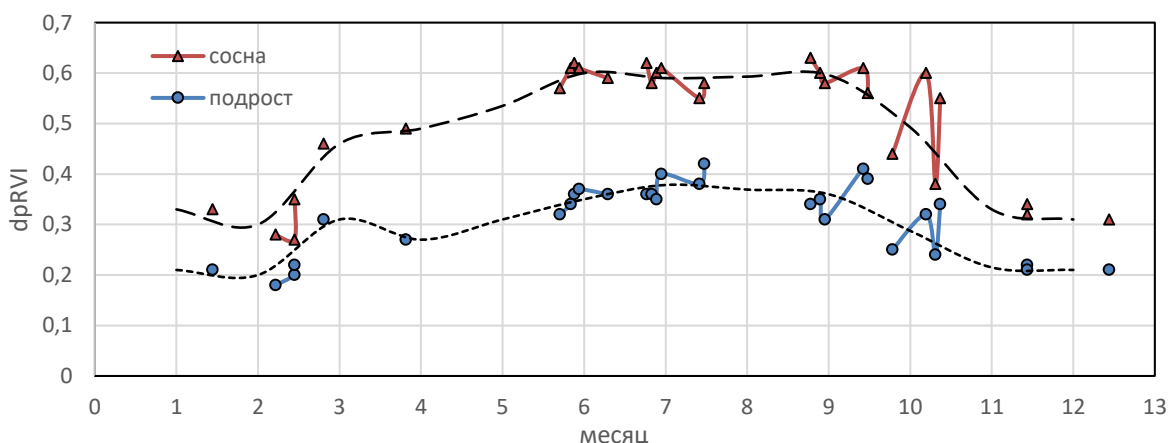


Рис. 3. Сгруппированные по месяцам и «усреднённые» индексы $dpRVI$.

Табл. 1. Сезонные компоненты $dpRVI$ для участков соснового леса и подроста ($S \times 10^{-3}$).

месяц	сосна	подрост	месяц	сосна	подрост
Январь	-139	-79	Июль	121	89
Февраль	-169	-89	Август	124	80
Март	-9	21	Сентябрь	127	71
Апрель	21	-19	Октябрь	24	-2
Май	66	21	Ноябрь	-139	-74
июнь	131	61	декабрь	-159	-79

Далее следуем известному алгоритму определения тренда: 1) сформируем временной ряд разницы исходных данных и сезонной компоненты $dpRVI(t) - S = Tr(t) + E$; 2) построим уравнение регрессии линейного вида $Tr(t) = a + bt$. На рис.4 представлены соответствующие графики разностей и трендов. Коэффициенты линейной корреляции для трендов участков 1 и 2 равны

0,073 и 0,500; расчётные значения критерия Фишера 0,70 и 8,98; уровни значимости 0,705 и 0,006. Это указывает на стабильность вегетационного индекса $dpRVI$ исследуемого участка соснового леса в течении периода наблюдений 2007-2019 гг. и значимый рост $dpRVI$ на участке лесного подроста. Полагая уровень соснового леса эталонным или 100%, скорость роста молодняка составляет 0,57 %/год, а время достижения эталонного уровня зрелого соснового леса составит 80 лет, что вполне соответствует реальному возрасту зрелости сосны для данного региона ~100 лет.

Статистический анализ остатков $E=dpRVI-S-Tr$ показал отсутствие корреляции со временем, равенство нулю средних значений и снижение стандартных отклонений до значений 0,039 и 0,023 для соснового леса и подроста соответственно (на ~70% от исходного уровня).

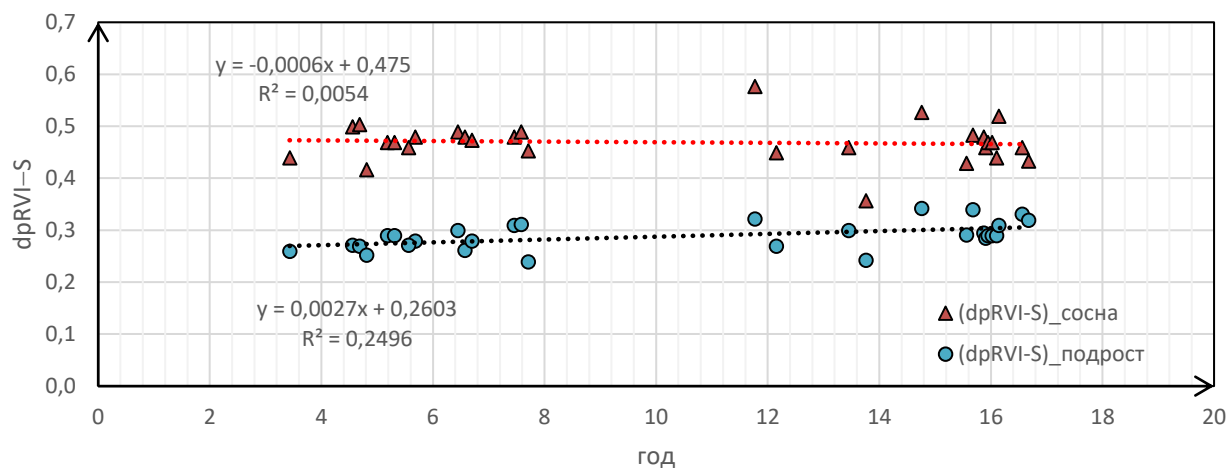


Рис. 4. Временные ряды $dpRVI-S=Tr+E$ и тренды.

Работа выполнена в рамках проекта госзадания № 0270-2021-0008 «Спутниковая радиолокационная диагностика состояния и динамики неоднородных земных покровов».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Amani M., Mahdavi S., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Moghimi A., Moghaddam S.H.A., Kakooei M., Mirmazloumi S.M., Ghahremanloo M., Parsian S., Wu Q., Brisco B. Google Earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. P. 5326-5350.
- [2] Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L., Adeli S., Brisco B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2020. Vol. 164, Pp. 152-170.
- [3] Kumar L., Mutanga O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential // Remote Sens. 2018. Vol. 10, No. 10. P. 1509.
- [4] Mutanga O., Kumar L. Google Earth engine applications // Remote Sens. 2019. Vol. 11, N. 5. P. 11-14.
- [5] Goreli N., Kumar L., Mutanga O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential // Remote Sens. 2017. Vol. 10, No. 10. P. 1509.
- [6] Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sens. Environ. 2017. Vol. 202. Pp. 18-27.
- [7] Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбизжекова И.И., Шерхоева А.А., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н. Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9-26.
- [8] Карпов А.А., Богданов А.П., Пирцхалава-Карпова Н.Р., Демина Н.А. Использование ДЗЗ для мониторинга лесовосстановления в бореальных лесах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. № 229. С. 23-43.
- [9] Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A. Estimation of postfire reforestation with SAR polarimetry and NDVI time series // Forests. 2022. Vol. 13. N 5.

- [10] *Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.N., Baltukhaev A.K., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Reforestation analysis using temporal NDVI and ALOS-2 PALSAR-2 polarimetric data // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 116-126.
- [11] Архив климатических данных. <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/30823.htm> (дата обращения 20.06.2023).
- [12] *Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н.* Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 2. С. 105-121.
- [13] *Mandal D., Kumar V., Ratha D., Dey S., Bhattacharya A., Lopez-Sanchez J.M., McNairn H., Rao Y.S.* Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data // Remote sensing and environment 247 (2020). 111954.
- [14] *Саженкова Т.В., Пономарёв И.В., Пронь С.П.* Методы анализа временных рядов: учебно-методическое пособие. Барнаул: Изд. Алт. ун-та, 2020. 60 с.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОГНОЗНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Кирста Ю.Б., Трошкова И.А.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Разработана стандартная методология интеллектуального анализа больших объемов данных, обеспечивающая извлечение скрытой в них информации и адекватное описание анализируемых природных процессов. Методология, названная системно-аналитическим моделированием, успешно проверена при построении прогнозных моделей различных сложноорганизованных природных систем. С ее помощью построена высокоточная модель для среднесрочного прогноза пикового расхода весенних половодий (1951–2020 гг.) на 34 горных реках Алтае-Саянской горной страны.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ, системно-аналитическое моделирование, горные реки, весеннее половодье, метеорологические факторы, Алтай-Саяны.

DEEP MINING OF LARGE DATASETS IN BUILDING PREDICTIVE HYDROLOGICAL MODELS

Kirsta Y.B., Troshkova I.A

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul

A standard methodology was developed for an intellectual analysis of large datasets, which ensures the extraction of fuzzy information and an adequate quantitative description of the analyzed natural processes. We called this methodology System-analytical modeling and successfully tested it in building predictive models of various complex natural systems. With its help, a high-performance model was built for medium-term forecasting the peak of spring flood discharge (1951–2020) for 34 mountain rivers of the Altai-Sayan mountain country.

Keywords: deep mining, system-analytical modeling, mountain rivers, spring flood, meteorological factors, Altai-Sayan.

Введение. Интеллектуальный анализ данных (ИА), известный как Data Mining и Knowledge Discovery, подразумевает выделение неотчетливой, но потенциально полезной информации, содержащейся в больших выборках экспериментальных данных. Для извлечения подобной информации разработаны различные математические методы, основанные на совмещении классической статистики и специальных компьютерных технологий (технологий обработки баз данных, алгоритмов машинного обучения, искусственных нейронных сетей, искусственного интеллекта и других). Из таких средств углубленной аналитики можно назвать аналитические платформы IBM SPSS Modeler, Rapid Miner и KNIME, СУБД Teradata, программное обеспечение Oracle Data Mining, Weka, Kaggle и другие [1]. Они различаются уровнем сложности математических алгоритмов и активно используются для поддержки принятия решений в бизнесе, науке, здравоохранении, обеспечивая вероятностную оценку развития тех или иных процессов. Актуальнейшей проблемой ИА является максимально полное извлечение полезной информации, содержащейся в выборках «зашумленных» данных, то есть имеющих большие или меньшие ошибки [2]. Решение этой проблемы особенно важно при прогнозировании различных катастрофических процессов, включая природные. В данной работе мы представляем впервые созданную стандартную методологию ИА для создания высокоточных математических моделей, описывающих реальную структурно-функциональную организацию сложноорганизованных природных систем.

Эта методология реализована нами на примере разработки математической модели по высокоточному прогнозу весенних половодий с ледоходом в 1951–2020 гг. на 34 средних и малых реках Алтае-Саянской горной стран. Горные хребты страны достигают 2000–4500 м над уровнем моря. Ее климат преимущественно резко континентальный с холодной зимой и теплым летом. Страну отличает большое разнообразие ее ландшафтно-климатических зон:

ледников, гольцов, горных тундр и альпийских лугов на высокогорьях, хвойных лесов, степей и полупустынь на склонах и межгорных котловинах. Питание многочисленных рек страны является смешанным снегово-дождевым и ледниковым, причем снеговое питание составляет более 50% их годового стока. На территории страны наблюдается две волны половодья: первая (весенняя) волна формируется в апреле при вскрытии рек от льда и таянии снежного покрова на равнинной части речных бассейнов, а вторая – в мае-июне за счет таяния снега и ледников на склонах и вершинах гор.

В результате проведенного ИА многолетних наблюдений за речными стоками на территории указанной страны построена балансовая модель для среднесрочного прогноза максимумов и минимумов расходов рек (МАКР и МИНР) в весеннее (апрельское) половодье. При прогнозе учитывается ландшафтная структура водосборных бассейнов рек и метеорологические условия (среднемесячные температуры воздуха, месячные осадки) за предшествующую апрелю осень и зиму. Апрельские половодья с сопутствующим ледоходом нередко становятся опасными для местного населения, в связи с чем своевременный прогноз МАКР имеет большое практическое значение.

Стандартная методология ИА. Предлагаемая методология по построению аналитических моделей имеет также название системно-аналитическое моделирование (САМ) [3]. Поскольку все сложноорганизованные природные системы имеют иерархическую организацию своих процессов, методология основана на системно-иерархическом подходе и ИА больших объемов экспериментальных данных. Под термином «аналитическая» мы подразумеваем два базовых свойства разрабатываемых моделей:

- количественно характеризовать динамику реальных процессов в сложноорганизованных природных системах при недостатке/отсутствии прямых наблюдений за этими процессами,
- служить основой для дальнейшего углубленного исследования структурно-функциональной организации указанных систем.
- Эффективность методологии САМ многократно проверена при моделировании различных сложноорганизованных природных систем:
 - развития пустынных экосистем и их продуктивности [4],
 - фенологического развития растений пшеницы [5],
 - процессов влагообмена в почвах [6],
 - урожая зерновых в агроэкосистемах России и США [7],
 - прогнозе на 2030 год содержания токсикантов в зерне пшеницы, производимой в Алтайском крае [8],
 - долгосрочном прогнозе изменений климата в России и США [7, 9],
 - формирования зон дестабилизации климата на континентах [10],
 - формирования стоков десятков горных рек [11],
 - формирования гидрохимических стоков (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , общего растворенного железа, ионов, взвешенного вещества) этих же рек [12].

САМ включает пять последовательно выполняемых этапов, которые мы охарактеризуем на примере разработки аналитической модели МАКР и МИНР, формируемых сложной совокупностью недостаточно изученных гидрологических процессов на водосборах горных рек со значительными вариациями условий среды.

На первом этапе САМ определяются три иерархических уровня организации процессов в анализируемой природной системе. Первый наиболее высокий иерархический уровень должен отвечать территории и периоду времени, для которых будут справедливы результаты исследований. Для гидрологической системы горных водосборов в качестве первого уровня следует выбрать речные бассейны большой горной территории (у нас это Алтай-Саянская горная страна) с общими для нее мезомасштабными метеорологическими процессами.

Второй более низкий иерархический уровень должен отвечать гидрологическим системам, слагающим первый уровень. Это водосборные бассейны отдельных рек. Количество таких гидрологических объектов должно быть достаточно велико, чтобы исключить влияние

множества индивидуальных особенностей объектов и обеспечить достоверность результатов моделирования основного интегрального процесса выбранных объектов – МАКР и МИНР в весеннее половодье на выходных створах соответствующих водосборов.

Третий, иерархический уровень отвечает еще меньшим гидрологическим объектам, которые должны отражать в модели разные условия среды, влияющие на функционирование систем второго уровня. Это отдельные ландшафты, представляющие собой более мелкие, но тоже автономные гидрологические объекты.

Динамика гидрологических процессов всех иерархических уровней зависит от меняющихся во времени и пространстве условий среды и описывается математическими уравнениями (интегро-дифференциальными, алгебраическими, балансовыми, имитационными или иными). Уравнения составляют искомую аналитическую модель гидрологического объекта первого иерархического уровня. При этом меняющиеся факторы среды и гидрологические процессы характеризуются, соответственно, как входные и выходные переменные модели.

На втором этапе САМ осуществляется подготовка данных для моделирования. Это наиболее ответственный этап ИА, включающий выбор шагов временной и пространственной шкал описания процессов и изменения факторов среды. Согласно этим шкалам должен выполняться анализ всех экспериментальных данных о процессах и факторах среды. Например, это выбор масштаба карт, требующегося для адекватного описания ландшафтной структуры речных бассейнов, а также шага описания изменений метеорологических факторов и речных стоков во времени.

Особые сложности возникают при отсутствии достаточного количества наблюдений за факторами, влияющими на анализируемые процессы. Для метеорологических факторов нами разработан метод их нормирования, при котором наблюдаемые на 11 реперных метеостанциях среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки нормируются на свои среднемноголетние значения и затем обобщаются (усредняются) по пространству [13]. Данный метод обеспечивает единообразное описание динамики указанных факторов во времени и пространстве, вне зависимости от меняющихся координат и высоты местности. Возможность такого описания объясняется едиными для территории мезомасштабными метеорологическими процессами и неоднократно подтверждена прикладными расчетами.

В связи с нормировкой метеорологических факторов необходимо нормировать МАКР и МИНР. Это легко выполняется путем нормирования их ежегодно наблюдаемых значений на среднемноголетние величины по каждому речному бассейну. В итоге создается однородная выборка гидрологических данных, отвечающая изменениям МАКР и МИНР во времени и пространстве.

В свою очередь, площади выделенных на третьем иерархическом уровне ландшафтов нормируются на площади их речных бассейнов. В итоге мы переходим к безразмерным значениям входных факторов и выходной переменной разрабатываемой аналитической модели.

На третьем этапе САМ выбирается тип модели и составляются ее уравнения. Уравнения модели должны соответствовать накопленным знаниям о процессах анализируемых природных объектов и не противоречить известным физическим, гидрологическим и другим законам и закономерностям. Затем начинается собственно ИА, в ходе которого проверяются различные варианты описания гидрологических процессов. Для каждого проверяемого варианта составляется система уравнений большой размерности, в которой каждое уравнение обеспечивает расчет отдельного значения МАКР или МИНР из имеющейся выборки наблюдений за этими характеристиками. Для составленной системы решается обратная математическая задача [14]. С этой целью рассчитываемые значения выходной переменной в уравнениях заменяются на соответствующие им наблюдаемые значения из выборки гидрологических данных. Решение обратной задачи выполняется, например, оптимизационными методами MATLAB и обеспечивает расчет значений всех параметров модели и ее невязки (то есть расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями выходной переменной). В результате проверки различных вариантов описания анализируемых процессов (формирования МАКР или МИНР) определяется вариант с наименьшей невязкой, который принимается за готовую

математическую модель. При этом считается, что наименьшую невязку модели обеспечивает только адекватное описание всех описываемых в модели процессов и влияния на них факторов среды.

Количество наблюдений за выходной переменной (то есть размер выборки гидрологических данных) должно превышать число параметров создаваемой аналитической модели в 5–10 и более раз. При решении обратной математической задачи это обеспечивает наилучшую точность искомых значений параметров уравнений.

При моделировании сложноорганизованных природных систем зависимость их процессов от факторов среды обычно неясна. Предлагаемая методология ИА решает эту проблему путем применения непрерывной кусочно-линейной функции H [14]:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2-Y1}{X2-X1}(X - X1) + Y1, & \text{если } \begin{cases} X1 \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры, определяемые в ходе решения обратной задачи и позволяющие описать любые формы зависимостей; X – какая-либо переменная модели.

Функция H в (1) с меняющимися значениями параметров позволяет аппроксимировать широкий спектр зависимостей между процессами и факторами среды. Ее использование при решении обратной математической задачи обеспечивает эффективный поиск и максимально точное количественное описание реального влияния факторов среды на анализируемые процессы.

Определение значений параметров модели известно как ее «идентификация». После идентификации принято выполнять проверку модели на независимых (еще не использованных) данных, которая называется «верификацией». В предлагаемой методологии ИА эту процедуру более корректно называть проверкой универсальности модели. В САМ она носит формальный характер, так как одновременный анализ большого числа объектов второго иерархического уровня и значительное превышение данных наблюдений над числом рассчитываемых параметров в достаточной степени гарантирует универсальность получаемой модели.

На четвертом этапе САМ оцениваются адекватность (точность) разработанной модели и ее чувствительность к вариациям факторов среды. Для оценки адекватности математических моделей нами предложен следующий критерий [14]:

$$A = S_{\text{dif}} / \sqrt{2} S_{\text{obs}}, \quad (2)$$

где A – критерий адекватности модели; S_{dif} – стандартное (среднеквадратическое) отклонение для невязки модели (разности между наблюдаемыми и рассчитанными данными); S_{obs} – стандартное отклонение для наблюдаемых данных; $1/\sqrt{2}$ – множитель.

Критерий A в (2) представляет собой невязку модели, нормированную на стандартное отклонение данных наблюдений. Интервал значений $A=0-0,71$ отвечает различной адекватности модели, то есть степени совпадения расчетных и наблюдаемых значений выходной переменной с их полным совпадением при $A \sim 0$. Критерий A подобен показателю качества моделей RSR и критерию Нэша-Сатклиффа NSE [15], с которыми связан зависимостями $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$.

Нами также предложен простой метод расчета чувствительности математических моделей к вариациям входных факторов [14]:

$$FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{\text{dif}})^2 - (S_{\text{dif}})^2}{2(S_{\text{obs}})^2} = \frac{2(S_{\text{fac}})^2}{2(S_{\text{obs}})^2} = \frac{(S_{\text{fac}})^2}{(S_{\text{obs}})^2}, \quad (3)$$

где FS – чувствительность модели к входному фактору; A рассчитывается по уравнению (2); A' – величина A , полученная из (2) после случайного перепутывания значений входного фактора, заменяющего их первоначальный порядок; очевидно, что перепутанные значения имеют прежние статистическое распределение и дисперсию; $(S_{\text{dif}})^2$ – дисперсия невязки мо-

дели; $(S'_{\text{dif}})^2$ – та же дисперсия, но полученная после перепутывания значений входного фактора; $(S_{\text{fac}})^2$ – вклад природных вариаций фактора в дисперсию выходной переменной модели; $(S_{\text{obs}})^2$ – дисперсия выходной переменной модели.

В уравнении (3) вклад ошибок наблюдений за входным фактором в дисперсию невязки модели будет присутствовать одновременно в $(S'_{\text{dif}})^2$ и $(S_{\text{dif}})^2$. Поэтому он не будет влиять на значение FS из-за своего взаимного вычитания в числителе выражения (3). Отметим, что это невозможно сделать при других методах анализа чувствительности моделей. Кроме того, расчет FS значительно проще чем глобальный [16] или локальный [17] анализы чувствительности математических моделей.

Из (3) видно, что FS характеризует также относительную значимость факторов для модели, выражая ее в долях (или процентах после умножения FS на 100) от дисперсии $(S_{\text{obs}})^2$ и подобна известному коэффициенту детерминации R^2 . Аналогично адекватности A , чувствительность FS может быть выражена через показатели RSR и NSE . Учитывая равенство $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$, получаем $FS = [(RSR')^2 - (RSR)^2]/2$ и $FS = (NSE - NSE')/2$. В этих выражениях показатели RSR' и NSE' рассчитываются также как A' в (3).

На пятом этапе САМ оценивается прикладное качество разработанной модели. Очевидно, что полученные универсальные значения параметров необходимо уточнить при описания конкретного объекта в выбранный период времени. Уточнение значений требуется для тех параметров, которые отвечают за наибольшее влияние факторов среды. Для этого опять можно использовать решение обратной математической задачи, соблюдая соотношение более 5:1 между наблюдениями за выходной переменной модели и числом обновляемых параметров. После этого можно оценить прикладное качество модели (значения A , RSR , NSE) при ее использовании для конкретных гидрологических объектов [14].

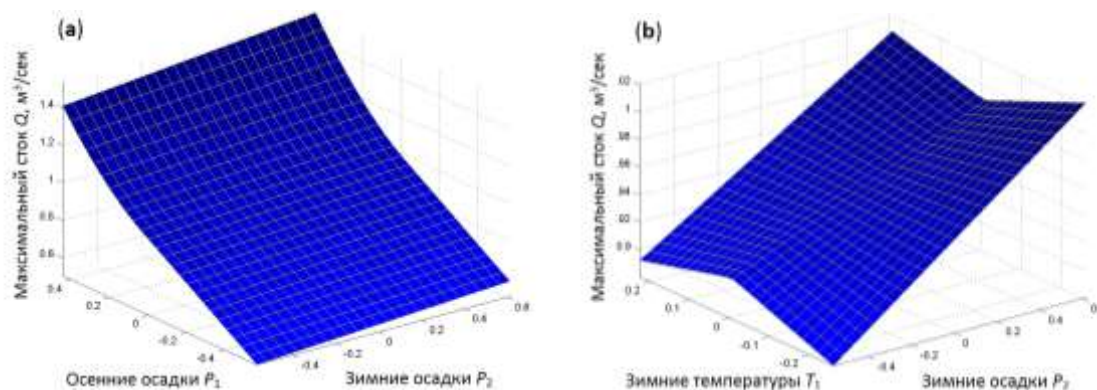
Модель МАКР/МИНР. Разработанная нами модель для прогнозов МАКР или МИНР с минимальной квадратичной невязкой имеет вид:

$$Q^i = H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \left\{ \sum_k a_k S_k^i P_1 H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) + \sum_k b_k S_k^i P_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2) H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) \right\} + d, \quad (4)$$

где Q^i – ежегодно прогнозируемое значение МАКР или МИНР для выходного створа речного бассейна i , $i=1-34$; первое и второе слагаемые в правой части (4) соответствуют вкладам последнего осеннего периода (IX–XI месяцы) и текущего зимнего (XII–III месяцы) соответственно; a_k, b_k – параметры, характеризующие вклад k -го ландшафта за соответствующий период, $k=1-13$; S_k^i – нормированная площадь k -го ландшафта бассейна i ; h_k^i – высота ландшафта, метры н.у.м.; P_1, P_2 – отклонения нормированных месячных осадков от их среднеголетних значений в среднем за осенний и зимний периоды соответственно; T_2 – отклонение нормированных среднемесячных температур воздуха от среднеголетнего значения за зимний период; H – кусочно-линейная функция (1); $c_{1-4}, c_{5-8}, c_{9-12}$ – параметры, характеризующие влияние осенних осадков P_1 и зимней температуры воздуха T_2 на МАКР или МИНР, а также высоты ландшафтов h_k^i на количество осадков; d – постоянная доля стоков ($d \leq 1$), одинаковая для всех речных бассейнов и характеризующая потери талых вод на промачивание почв и просачивание в зону трещиноватых горных пород.

В правой части (4) суммируются $13+13=26$ различных гидрологических процессов, которые формируют МАКР или МИНР в каждом из 34 речных бассейнов. Одновременный анализ этих процессов при решении обратной математической задачи собственно и представляет собой ИА имеющихся гидрологических данных. Эти данные (350–400 величин МАКР или МИНР) подставляются в систему уравнений (4) вместо Q^i для конкретных речных бассейнов и лет за 1951–2020 гг. Затем система решается оптимизационными средствами MATLAB, в результате чего определяются значения 39 параметров модели (4) и ее невязка. Верификация модели (4) показала, что невязки для произвольно исключаемых бассейнов в среднем не отличались от получаемой для остальных 33 бассейнов, используемых в идентификации, что формально подтвердило адекватность и универсальность разработанной модели.

Оценка прикладной адекватности модели (4) для МАКР дала $A=0,33$ и $NSE=1-2A^2=0,78$, что отвечает высокому качеству аналитических гидрологических моделей ($0,75 < NSE \leq 1,0$) для горных территорий [15]. У МАКТ она оказалась удовлетворительной с $NSE=0,56$. Чувствительность МАКР к вариациям факторов среды составила $FS=29\%$ для осенне-зимних осадков, 14% – для ландшафтной структуры, $0,8\%$ – для зимних температур воздуха и $0,1\%$ – для высоты ландшафтов. Практическое отсутствие чувствительности МАКР к высоте подтверждает адекватность описания динамики метеорологических факторов через их нормированные месячные значения, не зависящие от координат и высоты местности. На рисунке приведены полученные зависимости прогнозируемых МАКР от метеоусловий зимы и предшествующей осени, осадки которой в разной степени увлажняют уходящие в зиму почвы и опосредованно влияют на интенсивность весеннего половодья.



Зависимость максимумов весенних половодий (МАКР) от осадков и температур воздуха (а – влияние осенних (P_1) и зимних (P_2) осадков, б – влияние зимних температур (T_2) согласно (4)).

Заключение. Нами предложена стандартная методология интеллектуального анализа (ИА) экспериментальных данных, обеспечивающая построение адекватных аналитических моделей сложноорганизованных природных систем. Методология, называемая системно-аналитическим моделированием, основана на системно-иерархическом подходе и глубинном анализе выборок данных большого объема. Она позволяет извлекать скрытую в этих данных информацию и определять количественные характеристики реальных процессов, протекающих в системах. При этом системный подход позволяет разрабатывать иерархически вложенные друг в друга математические модели, характеризующие последовательные уровни структурно-функциональной организации природных систем.

С помощью ИА максимальных и минимальных расходов (МАКР и МИНР) весенних половодий, наблюдаемых в апреле 1951–2020 гг. на 34 горных реках Алтае-Саянской горной страны, разработана универсальная гидрологическая модель их высокоточного среднесрочного прогноза, характеризующегося критерием Нэша-Сатклиффа $NSE=0,78$. МАКР зависят от осенне-зимних осадков, ландшафтной структуры речных бассейнов и, в незначительной степени, от зимних температур воздуха. Прикладное значение разработанной прогнозной модели особенно значимо для горных территорий, где весенние половодья с ледоходом нередко угрожают нормальной жизнедеятельности местного населения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-27-00058).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] GTech Booster. <https://gtechbooster.com/19-best-free-data-miners> (дата обращения 15.06.2023).
- [2] Ma Z., Yan L. Data modeling and querying with fuzzy sets: A systematic survey // Fuzzy Sets and Systems. 2022. Vol. 445. P. 147-183. DOI:10.1016/j.fss.2022.01.006.
- [3] Курста Ю.Б., Курста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2014. 283 с.
- [4] Курста Ю.Б. Моделирование пустынных экосистем. Ашхабад: Ылым, 1986. 144 с.

- [5] *Kirsta Y.B., Tarabrin V.A.* Real biological time and its calculation in wheat // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 71. P. 259-267. DOI:10.1016/0304-3800(94)90137-6.
- [6] *Kirsta Y.B.* System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191. P. 315-330. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028.
- [7] *Kirsta Y.B.* System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191. P. 331-345. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2005.05.027.
- [8] *Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Рождественская Т.А.* Простая методология для долгосрочного прогнозирования качества зерна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 9. С. 198-208. DOI:10.18799/24131830/2022/9/3699.
- [9] *Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V.* The Forecast of Climate Changes in Altai-Sayan Mountain Country till 2030 // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2534. P. 114-117. http://ceur-ws.org/Vol-2534/19_short_paper.pdf.
- [10] *Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В.* Декомпозиция метеорологических полей Северного полушария Земли: 2. Выделение зон наибольшей дестабилизации климата // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 5-1. С. 63-68. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5278>.
- [11] *Kirsta Y.B., Puzanov A.V.* System-analytical modelling: 1. Development of regional models for mountain river runoff // *EJMCA*. 2020. Vol. 8, N 2. P. 69-85. DOI:10.32523/2306-6172-2020-8-2-69-85.
- [12] *Kirsta Y.B., Puzanov A.V.* System-Analytical Modeling of Water Quality for Mountain River Runoff // *Pandey B.W., Anand S. (Eds). Water Science and Sustainability / Sustainable Development Goals Series*. Springer, Nature. 2021. Chapter 7. DOI:10.1007/978-3-030-57488-8_7.
- [13] *Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V.* Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. 1044. DOI:10.1007/s42452-020-2861-6.
- [14] *Kirsta Y.B., Troshkova I.A.* High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // *Water*. 2023. Vol. 15, N 6. 1080. DOI:10.3390/w15061080.
- [15] *Koch-M., Cherie N.* SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia // *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research*. Germany, Koblenz. 2013. P. 428-523. DOI:10.5675/ICWRER_2013.
- [16] *Song S., Ba Z., Wei H., Xiao Y.* Copula-based methods for global sensitivity analysis with correlated random variables and stochastic processes under incomplete probability information // *Aerospace Science and Technology*. 2022. Vol. 129. 107811. DOI:10.1016/j.ast.2022.107811.
- [17] *Herrera P.A., Marazuela M.A., Hofmann T.* Parameter estimation and uncertainty analysis in hydrological modeling // *WIREs Water*. 2021. Vol. 9. e1569. DOI:10.1002/wat2.1569.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕКТНОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЙОНОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ КРУПНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Константинова А.М.¹, Лупян Е.А.¹, Кашицкий А.В.¹, Саворский В.П.²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино

В работе демонстрируются основные возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов. Описываются инструменты, входящие в состав технологии, архитектура построения технологии. Приводятся примеры использования технологии для анализа влияния источников загрязнения на растительный покров и водные объекты.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые данные, объектный мониторинг, промышленные объекты, спектральный индекс, ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

POSSIBILITIES OF USING OBJECT MONITORING TECHNOLOGY TO STUDY THE AREAS OF LOCATION OF LARGE ANTHROPOGENIC OBJECTS

Konstantinova A.M.¹, Loupian E.A.¹, Kashnitskii A.V.¹, Savorskiy V.P.²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow

² Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino

The paper demonstrates the main possibilities of using object monitoring technology to analyze the state of the environment in areas where large industrial facilities are located. The tools that are part of the technology, the architecture of the technology construction are described. Examples of the use of technology to analyze the impact of pollution sources on vegetation cover and water bodies are given.

Keywords: remote sensing, satellite data, object monitoring, industrial facilities, spectral index, «IKI-Monitoring» Center for Collective Use.

Введение. В работе описывается объектный подход к хранению и обработке спутниковых данных для мониторинга состояния окружающей среды на примере зон расположения крупных источников антропогенных загрязнений (КИАЗ). В отличие от традиционного попиксельного анализа спутниковых данных объектный подход позволяет уменьшить объёмы обрабатываемой и хранимой для анализа информации и эффективно выявлять изменения, происходящие с исследуемыми объектами. Для реализации данного подхода в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) была разработана технология объектного мониторинга [2], инструменты которой доступны в веб-интерфейсах уникальной научной установки (УНУ) Vega-Science [5, 7] (<http://sci-vega.ru/>). Данная технология позволяет автоматически рассчитывать интегральные характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения и т. п.) в границах произвольных полигонов исследуемых объектов на основе различных тематических продуктов/канальных данных, имеющихся в архивах центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») [6]. Технология позволяет проводить не только единоразовые расчёты, но и осуществлять постоянный мониторинг таких объектов, автоматически проводя расчёты по новым данным, появляющимся в архивах. Данная технология была задействована для организации долговременного постоянного мониторинга окружающей среды в районах расположения КИАЗ на примере промышленных предприятий, добывающих руду. Влияние КИАЗ имеет долгосрочный характер и распространяется на сотни километров, поэтому без применения дистанционных методов оценивать такое влияние практически невозможно. Накопленные за десятилетия архивы спутниковых данных могут быть эффективно задействованы для мониторинга таких районов. Применение автоматизированной технологии объектного монито-

ринга для анализа спутниковых данных позволило выявить деградацию растительности в зонах влияния КИАЗ, а также аномальные состояния некоторых водоёмов вблизи хвостохранилищ и других источников загрязнений.

Построение технологии. Для реализации технологии объектного мониторинга был определён набор инструментов, которые необходимо разработать. Среди них инструменты создания объектов совместно с их геометрическими описаниями и правилами мониторинга (наблюдений), инструменты автоматического расчёта показателей в границах объектов по спутниковым данным, инструменты ведения и пополнения баз данных (БД) объектов совместно с рассчитанными значениями показателей, различные инструменты визуализации в веб-интерфейсах (на карте и графиках), инструменты администрирования.

Все инструменты были объединены в функциональные блоки, представляющие собой отдельные программные модули, и была предложена архитектура технологии, основными элементами которой являются: БД объектов и их наблюдений, автоматический модуль расчёта показателей, блок управления инструментами технологии (модуль конфигурирования), картографический и графический веб-интерфейсы.

Основным программным блоком в составе технологии является автоматический модуль расчёта показателей, работающий в двух режимах. Он позволяет рассчитывать показатели по историческим сценам спутниковых данных для новых объектов и осуществлять расчёт по оперативным данным, появляющимся ежедневно в архивах для уже созданных объектов, и таким образом, фактически позволяет организовывать непрерывное наблюдение за интересующими объектами. В составе модуля был разработан алгоритм фильтрации облачных над объектами спутниковых данных [1], основанный на анализе процента облачности на спутниковых изображениях в районах расположения конкретных объектов. Данный алгоритм позволил получать очищенных рядов характеристик объектов, вычисляемых на даже в условиях низкого качества фильтрации облачности.

Блок управления инструментами технологии был реализован на базе специализированного каталога показателей и решает две задачи: определяет набор показателей, который необходимо рассчитывать в зависимости от типа объектов (для участка растительности – спектральные вегетационные индексы, для водного объекта – спектральные водные индексы и т. п.), а также определяет правила работы с конкретным показателем (как его рассчитывать, на основе данных каких спутниковых систем, а также как визуализировать рассчитанные значения на карте и графиках).

Были разработаны инструменты, позволяющие работать с технологией объектного мониторинга в интерфейсах анализа: картографическом веб-интерфейсе и интерфейсе графиков, функционирующих на базе УНУ Vega-Science (см. рисунок 1). Данные интерфейсы используются для управления объектами (создание, редактирование объектов), а также непосредственной оценки их состояния: визуализации на карте и построения временных рядов рассчитанных значений показателей для объектов.

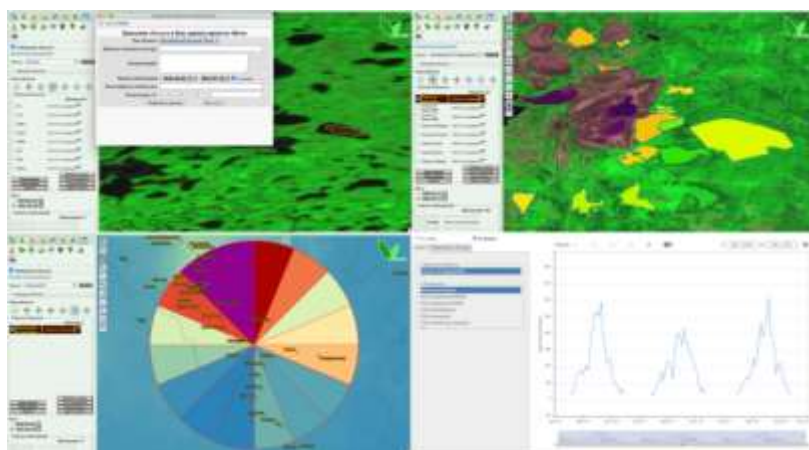


Рис. 1. Инструменты для работы с технологией объектного мониторинга в специализированных веб-интерфейсах.

Примеры применения технологии. На данный момент с помощью технологии объектного мониторинга в УНУ Vega-Science ведется постоянный дистанционный мониторинг 60 районов, в которых расположены КИАЗ (промышленные предприятия различного типа). В основу мониторинга таких районов лёг подход сравнительного анализа потенциально загрязнённых участков, расположенных в зоне влияния КИАЗ, совместно с потенциально чистыми (контрольными) участками, расположенными вне зоны влияния КИАЗ. В данном исследовании изучается влияние КИАЗ, как на растительность, так и на водные объекты. Для каждого района исследования (промышленного предприятия) выбираются потенциально загрязнённые и контрольные участки однородного леса и воды. Поэтому в рамках технологии была поддержана работа с несколькими типами объектов, и для каждого типа был обеспечен непрерывный расчёт своего набора различных показателей на основе архивных и оперативных спутниковых данных. В работе использовались следующие типы объектов:

- район наблюдений, представляющий собой зону влияния КИАЗ;
- источник загрязнений, представляющий собой отвал или хвостохранилище;
- «чистые» участки растительности;
- «загрязнённые» участки растительности;
- «чистые» участки водных объектов;
- «загрязнённые» участки водных объектов.

В настоящей работе представлены два примера использования технологии объектного мониторинга для анализа влияния КИАЗ на различные типы покрова: на растительный покров на примере отвалов Качканарского горно-обогатительного комбината [4]; на водные объекты на примере хвостохранилища Новое (открыто в 2017 г.), используемого для хранения отходов Талнахской обогатительной фабрики сульфидных медно-никелевых руд ПАО «ГМК «Норильский никель» [3].

Для оценки направления разноса различных загрязнений, в частности пыли, являющейся основным загрязняющим фактором, образующимся в результате работы КГОК, с помощью инструментов технологии объектного мониторинга были построены диаграммы, полученные путём расчёта средних значений концентраций газовых составляющих по данным прибора TROPOMI (Sentinel-5P). Средние значения концентраций рассчитывались для секторов, на которые был разбит район наблюдения. Также отметим, что оценка направлений преимущественного распространения выбросов пыли от КГОК может быть проведена на основе анализа зоны раннего схода снежного покрова. Оба подхода показали, что загрязнения распространяются в восточном и юго-восточном направлениях.

Для анализа влияния КГОК на растительность были выбраны однородные участки с преобладанием берёзы и сосны, расположенные вблизи объектов КГОК (в 20–30 км), которые можно считать потенциально загрязнёнными и потенциально чистыми. Для участков на основе данных прибора MODIS были рассчитаны временные ряды вегетационного индекса NDVI, которые представлены на рисунках 2 и 3. На рисунках наблюдаются долговременные тренды уменьшения NDVI на загрязнённых участках [4].

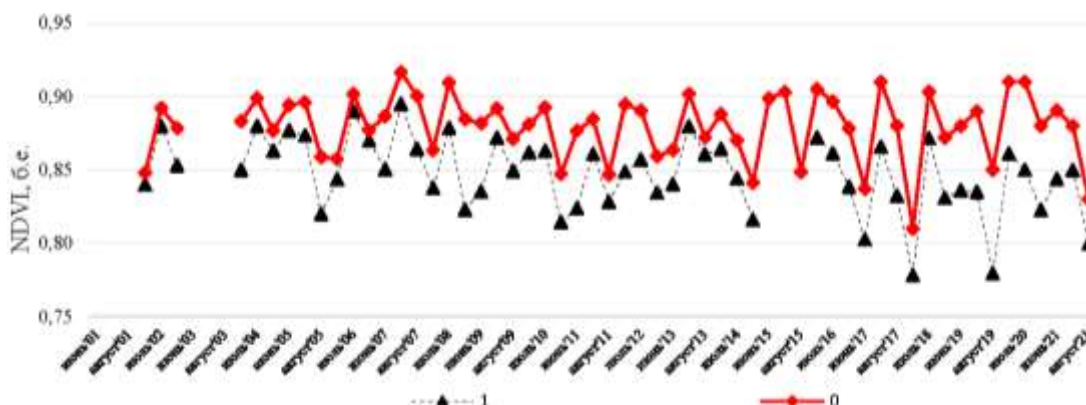


Рис. 2. Многолетние ряды среднемесячных NDVI однородных участков берёзы в окрестности КГОК: 0 – чистые участки, 1 – загрязнённые.

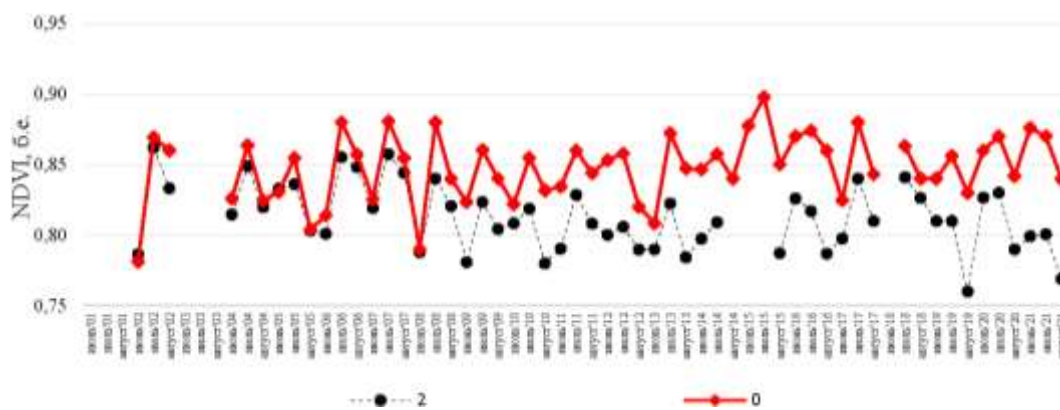


Рис. 3. Многолетние ряды среднесесячных NDVI однородных участков сосны в окрестности КГОК: 0 – чистые участки, 2 – загрязнённые.

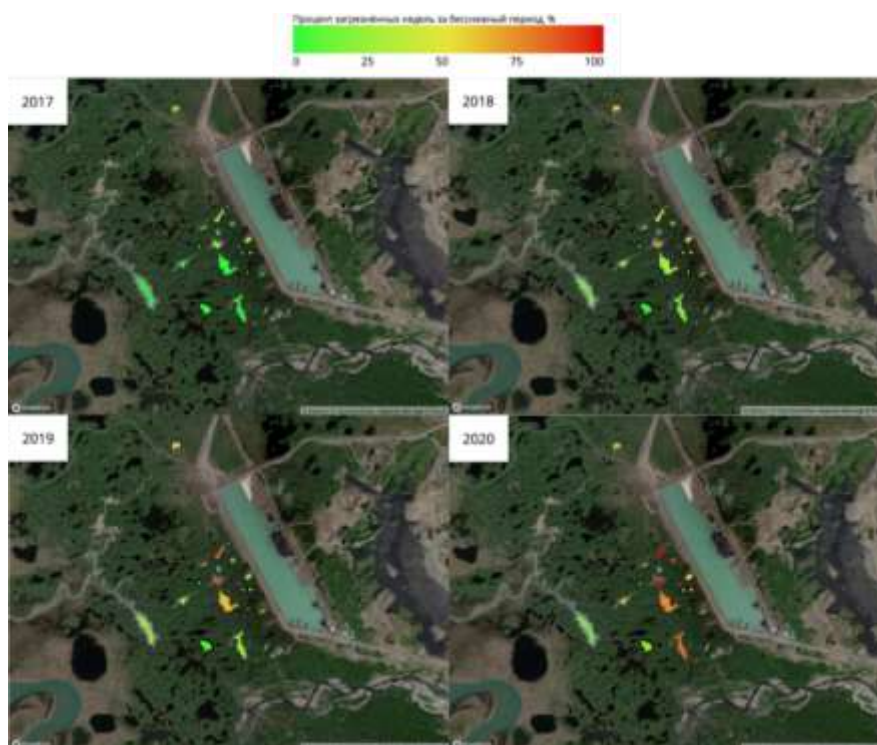


Рис. 4. Карта загрязнения водных объектов вокруг хвостохранилища Новое (2017-2020 гг.).

Для оценки состояния естественных водоёмов вблизи хвостохранилищ использовались спектральные водные индексы, которые позволяют определить присутствие в водоёмах загрязняющих веществ в случае сбросов или утечек. В качестве одного из индексов был взят индекс AWEI1 (Automated Water Extraction Index). На основе экспериментов было выявлено, что пики в значениях индекса AWEI1 соответствуют загрязнению (неестественному цвету) водоёмов. На рисунке 4 представлены данные по относительному числу недель, когда водные объекты вокруг хвостохранилища были загрязнены, нормированное на длительность периода бесснежных наблюдений в период с 2017 по 2020 годы. Полученные данные о загрязнённости окружающих водохранилище озёр указывают на нарастающий уровень их загрязнения в период с 2017 по 2020 годы [3].

Заключение. В УНУ Vega-Science доступны инструменты для постоянного наблюдения за объектами, с помощью которых в автоматическом режиме стало возможно осуществлять долговременный мониторинг состояния окружающей среды в зонах расположения КИАЗ. Следует отметить, что за счёт унифицированных подходов, используемых при построении технологии объектного мониторинга, набор контролируемых параметров и исследуемых районов КИАЗ может быть достаточно легко расширен, а сама технология может быть эффективно задействована при решении широкого спектра научных и прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Константинова А.М. Алгоритм автоматической фильтрации облачных данных для решения задач объектного дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 88-99. DOI:10.21046/2070-7401-2022-19-4-88-99.
- [2] Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41-52. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
- [3] Лупян Е.А., Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Саворский В.П., Панова О.Ю. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 243-261. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261.
- [4] Лупян Е.А., Константинова А.М., Кашицкий А.В., Ермаков Д.М., Саворский В.П., Панова О.Ю., Бриль А.А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для оценки их влияния на окружающую среду // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193-213. DOI:10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213.
- [5] Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Бриль А.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховератович Т.С. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9-31. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- [6] Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- [7] Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Radchenko M.V., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. N 1. P. 77. DOI:10.3390/rs14010077.

ТРЕХКАНАЛЬНАЯ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

Косых В.П., Громили Г.И., Яковенко Н.С.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Для повышения качества обнаружения и распознавания малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых матричным фотоприемником, предлагается строить согласованный фильтр с учетом изменения формы изображения объекта при его движении относительно решетки фоточувствительных элементов приемника. Фильтр представляется в виде линейной комбинации трех ортогональных составляющих, веса которых определяются текущим положением объекта. Показано, что такой способ фильтрации выравнивает неравномерность сигнала приемника лучше, чем однокомпонентный фильтр и позволяет оценивать координаты объекта с субпиксельной точностью. *Ключевые слова:* малоразмерный подвижный объект, пространственная неоднородность, согласованный фильтр, субпиксельная точность.

THREE-CHANNEL MATCHED FILTRATION OF SMALL MOVING OBJECTS IN A SEQUENCE OF IMAGES FORMED BY A MATRIX PHOTODETECTOR

Kosykh V.P., Gromilin G.I., Yakovenko N.S.

Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk

To improve the quality of detection and recognition of small-sized moving objects in a sequence of images formed by a matrix photodetector, it is proposed to build a matched filter, taking into account the change in the shape of the object image as it moves relative to the array of photosensitive elements of the detector. The filter consists of a linear combination of three orthogonal components, which weights are determined by the current object position. Numerical simulation shows that this method of filtering aligns the receiver signal non-uniformity better than single-channel filter and allows estimating object coordinates with subpixel accuracy.

Keywords: small moving object, spatial non-uniformity, matched filter, subpixel accuracy.

Введение. Одной из частных особенностей задачи обнаружения и трассирования малоразмерных подвижных объектов в последовательности изображений, формируемых матричными фотоприемниками (МФП), является изменение формы и яркости сигналов от объектов [1, 2], обусловленное их движением относительно решетки фоточувствительных элементов (ФЧЭ) приемника. Под малоразмерными в данной работе подразумеваются удаленные объекты, изображения которых в плоскости фотоприемника покрывают площадь всего в несколько соседних ФЧЭ, а распределение освещенности в них задает в основном функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы, формирующей эти изображения. Поскольку в матричном фотоприемнике шаг дискретизации не может быть меньше размера ФЧЭ, форма и амплитуда регистрируемых сигналов от таких объектов зависят от положения их изображений относительно элементов матрицы, порождая пространственную неоднородность аппаратной функции приемника. Это осложняет выполнение согласованной фильтрации, обычно предшествующей процедурам обнаружения объектов, а также их трассирования и распознавания по яркостному поведению. Частичному выравниванию амплитуды и формы сигнала служат микросканирование [3] и применение специальной многорядной топологии размещения ФЧЭ [4], хотя и в этих случаях полного выравнивания достичь не удастся [4]. Различные методы фильтрации таких «недодискретизованных» изображений, позволяющие повысить надежность обнаружения объектов и определять их координаты с субпиксельной точностью, предложены в работах [2, 5, 6]. В работе [2] теоретически рассмотрены соответствующие различным критериям оптимальности методы согласованной линейной фильтрации при условии равномерной

ного расположения изображений объектов относительно центров ФЧЭ. В ней же экспериментально показано, что линейный фильтр, построенный как собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу сингулярного разложения [7] множества таких изображений, по обнаружительной способности практически не уступает оптимальному, минимизирующему байесовскую ошибку решения. Целью данной работы является исследование трехканального фильтра, компонентами которого являются собственные векторы, соответствующие трем наибольшим собственным числам того же сингулярного разложения: возможности на основе результатов трехканальной фильтрации выравнивать амплитуду сигнала и оценивать координаты положения объекта с ошибкой, меньшей чем шаг дискретизации.

Сингулярное разложение множества изображений объектов. На рисунке 1 показаны изображения малоразмерного объекта, проецируемого в различные позиции относительно центра ФЧЭ, формируемые сканирующим устройством с многорядной топологией фотоприемника [4] («тянучки» справа обусловлены подавлением низкочастотной составляющей сигнала в электронном тракте фотоприемника).

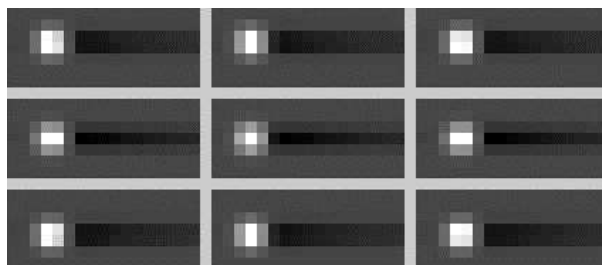


Рис. 1. Зависимость изображений малоразмерного объекта от его положения.

Благодаря многорядной топологии и сканированию при формировании дискретного изображения площадки отдельных ФЧЭ перекрываются практически наполовину по каждой координате. Тем не менее для ФРТ, характерный размер которой сопоставим с размером ФЧЭ, разница в амплитудах сигнала от объектов, проецируемых в центр одного и между четырьмя соседними ФЧЭ, превышает 30%. Форма сигнала также значительно изменяется, что требует специальных приемов построения согласованного фильтра для подавления шума.

Предложенный в [2] прием состоит в следующем. Пусть имеется $k = \overline{1, K}$ дискретных изображений объектов, по-разному смещенных относительно центров ФЧЭ, и пусть условный центр (например, максимум) k -го непрерывного изображения объекта проецируется в некоторый пиксель дискретного изображения со смещением $\mathbf{d}_k = (x_k, y_k)$, $|x_k|, |y_k| \leq 0.5$ относительно его центра. Тогда лексикографически упорядоченную (например, по строкам) окрестность этого пикселя \mathbf{o}_{dk} можно представить в виде векторной модели

$$\mathbf{o}_{dk} = \sum_i a_{idk} \boldsymbol{\varphi}_i, \quad i = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где набор коэффициентов a_{idk} зависит от вектора смещения \mathbf{d}_k , базисными векторами $\boldsymbol{\varphi}_i$ служат собственные векторы (СВ) матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$, а матрица \mathbf{O}^T строится из векторов \mathbf{o}_{dk} : $\mathbf{O}^T = [\dots \mathbf{o}_{dk} \dots]$. Сам же набор \mathbf{o}_{dk} либо рассчитывается посредством моделирования ФРТ и распределения чувствительности по площадке ФЧЭ, либо получается экспериментально при стендовых измерениях характеристик конкретного прибора. Авторы работы [2] предложили в качестве согласованного фильтра использовать свернутый в двумерный массив собственный вектор $\boldsymbol{\varphi}_1$, соответствующий максимальному собственному числу матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$, и экспериментально показали, что в присутствии некоррелированного нормально распределенного шума он обеспечивает качество обнаружения объекта, близкое к оптимальному в смысле минимума байесовского риска.

Однако представляет интерес, как могут быть использованы остальные компоненты разложения (1). В таблице 1 приведены в порядке убывания 7 наибольших собственных чисел матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$, построенной из 225 изображений объектов, равномерно смещавшихся по обеим координатам в пределах пикселя (изображения получены посредством моделирования про-

цесса формирования сигнала в оптико-электронном тракте сканирующего устройства с многорядным фотоприемником [8]). Из этой таблицы следует, что, начиная с λ_4 все собственные числа быстро убывают и составляют сотые доли от трех первых, что свидетельствует о малом вкладе соответствующих им компонент в формирование изображений объектов. Еще одна особенность собственных чисел заключается в малой разнице между значениями λ_2 и λ_3 .

Табл. 1. Собственные числа матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$.

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
3.718	0.266	0.265	0.019	0.010	0.007	0.001

На рисунке 2 показаны свернутые в двумерные массивы \mathbf{f}_i собственные векторы $\boldsymbol{\varphi}_i$, соответствующие трем наибольшим собственным числам. Специфическая форма второй и третьей компонент наводит на мысль, что их веса в разложении (1) могут быть использованы для определения смещения изображения объекта в пределах пикселя.

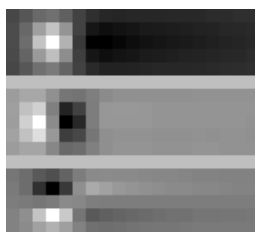


Рис. 2. Главные компоненты разложения матрицы $\mathbf{O}^T \mathbf{O}$.

Линейная фильтрация изображения, содержащего объекты, фильтрами, соответствующими этим трем компонентам, дает трехкомпонентное изображение, каждый пиксель которого можно рассматривать как трехмерный вектор

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3) = (\mathbf{f}_1^T \mathbf{e}, \mathbf{f}_2^T \mathbf{e}, \mathbf{f}_3^T \mathbf{e}),$$

где \mathbf{e} – вектор, содержащий лексикографически упорядоченная окрестность пикселя. Если пиксель и его окрестность содержат изображение объекта, длина соответствующего вектора, по-видимому, будет зависеть от яркости объекта, а ориентация – от его положения относительно центра этого пикселя. Поэтому в качестве меры смещения объекта от центра пикселя по каждой координате предлагается использовать величины, пропорциональные отношению второй и третьей компоненты к первой:

$$\Delta x = k_x \frac{v_2}{v_1} + a_x, \quad \Delta y = k_y \frac{v_3}{v_1} + a_y.$$

Коэффициенты k_x , k_y , a_x и a_y зависят от формы ФРТ и отношения размеров ФРТ и ФЧЭ и поэтому для конкретной реализации оптической системы, топологии ФЧЭ и характеристик электронного тракта приемника должны определяться посредством калибровки. На рисунке 3а показаны значения Δx и Δy для 225 объектов, эквидистантно смещенных относительно центров пикселей (заштрихованные кружки соответствуют изображениям объектов, приведенным на рисунке 1), а на рисунке 3б – среднеквадратичные ошибки оценок Δx , Δy и $\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ – расстояния от истинного положения в зависимости от уровня некоррелированного шума, сопровождающего процесс формирования изображения (шкала смещений задана в долях размера пикселя).

Выравнивание амплитуды сигнала. В силу ортогональности фильтров в качестве амплитуды сигнала в данной точке естественно принять длину трехмерного вектора \mathbf{v} :

$$b = |\mathbf{v}|. \quad (2)$$

Если шум в исходном изображении не слишком велик, и разброс амплитуд сигнала определяется в основном положением изображения объекта относительно центра ФЧЭ, применение 3D фильтрации позволяет существенно снизить зависимость амплитуды от положения.

Это можно использовать для повышения надежности классификации объектов по их яркостному ходу, т.е. зависимости яркости объекта от времени. На рисунке 4 приведены гистограммы распределения амплитуд сигнала от эквидистантно расположенных объектов одинаковой яркости: (а) – в исходном изображении, (б) – в изображении после фильтрации фильтром f_1 и (в) – в изображении, полученном после объединения результатов 3D фильтрации посредством соотношения (2). По горизонтальной оси отложена амплитуда сигнала в условных единицах.

Средние значения и СКО амплитуды объектов в исходных изображениях, а также в изображениях после применения одноканальной и трехканальной фильтрации приведены в таблице 2. СКО шума в исходных изображениях в этом эксперименте составляет $\sim 1\%$ от среднего значения амплитуд (28).

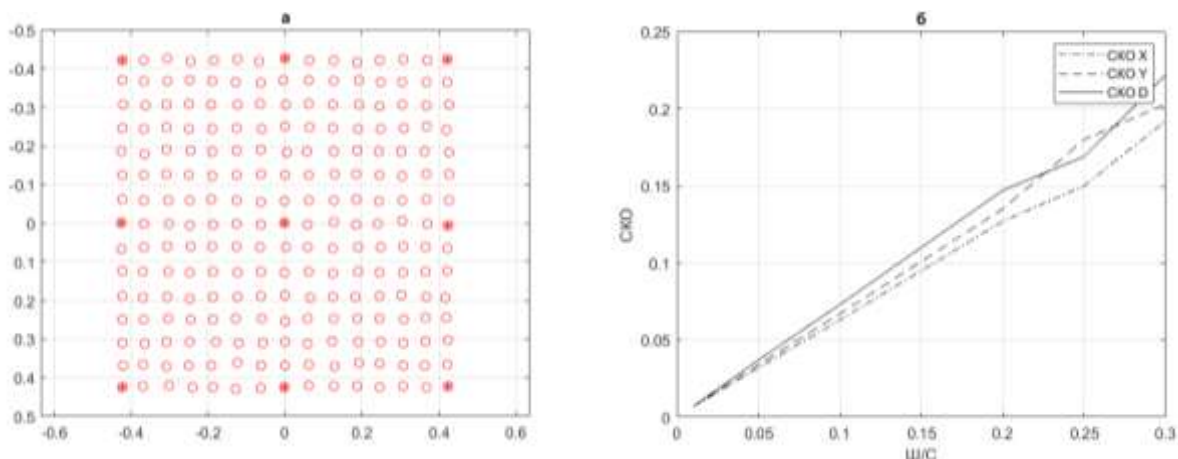


Рис. 3. Оценки смещения объектов относительно центров пикселей как результат трехканальной фильтрации.

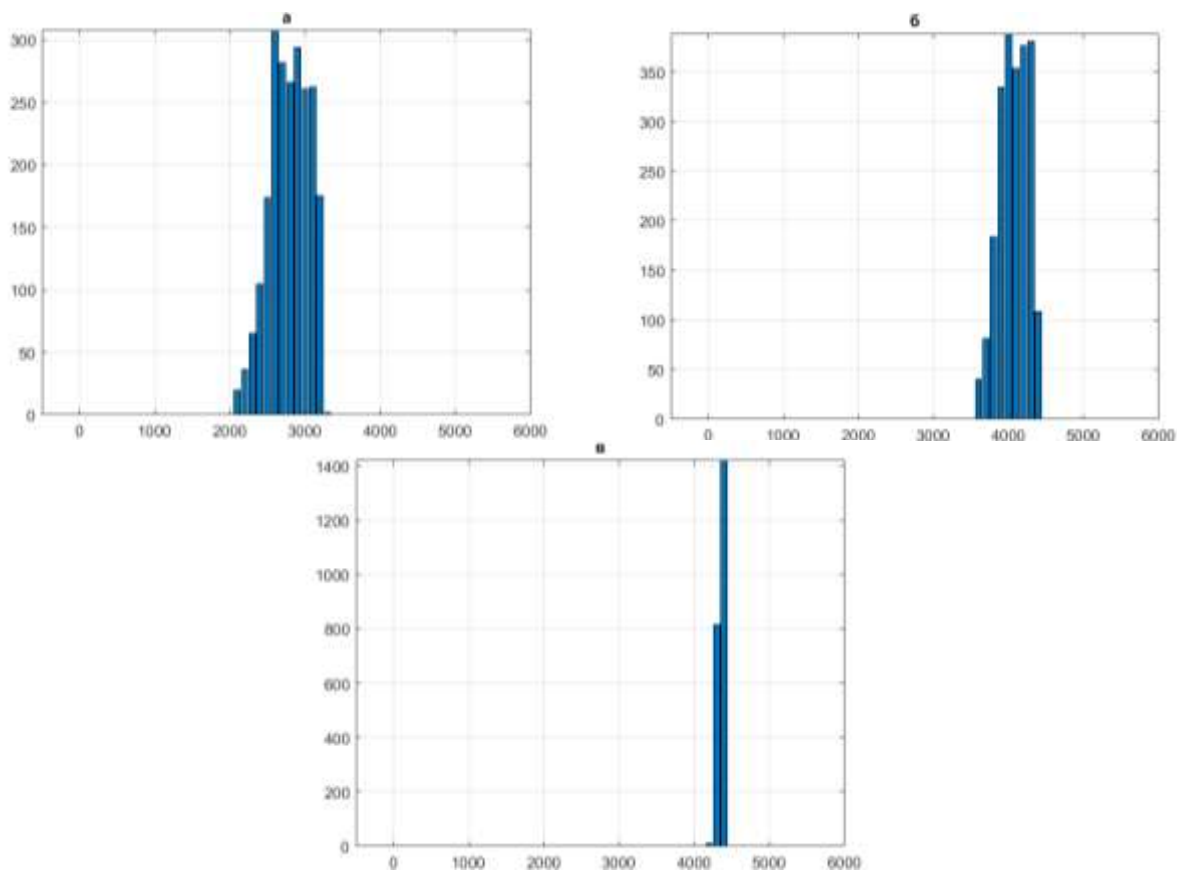


Рис. 4. Выравнивание амплитуды объектов посредством 3D фильтрации.

Табл. 2. Выравнивание амплитуды объектов

	Исходное изображение	После 1D фильтрации	После 3D фильтрации
Среднее значение	2787	4070	4356
СКО	257.8	193.5	34.5

Надежность обнаружения объектов в присутствии шума. На рисунке 5 представлены рабочие характеристики (зависимость вероятности обнаружения от вероятности ложной тревоги) порогового обнаружителя при достаточно высоком уровне шума (отношение Ш/С = 30%) с применением 3 типов фильтров: одноканального (1 СВ), соответствующего СВ с максимальным собственным числом, трехканального (3 СВ), формирующего выходное изображение в соответствии с выражением (2), и одноканального (рисунок 5, внизу справа), построенного усреднением по множеству усеченных окрестностей объекта (последний фильтр представляет интерес из-за простоты построения и малых размеров). Характеристики построены более чем по 1700 изображений объектов, равномерно смещавшихся в пределах одного ФЧЭ. Как следует из графиков, наиболее надежное обнаружение обеспечивает первый фильтр. На изображениях с высоким уровнем шума он обеспечивает вероятность пропуска $P_{\text{проп}} = 1 - P_{\text{обн}}$ объекта втрое более низкую (2.7%), чем третий (8.7%), с вероятностью ложной тревоги $P_{\text{лт}} = 10^{-4}$. Вероятность пропуска у обнаружителя с трехканальным фильтром также выше (4.7%) при том же уровне $P_{\text{лт}}$, поэтому его применение целесообразно при низких уровнях шума (<10%) для выравнивания амплитуды по-разному смещенных объектов и уточнения их координат.

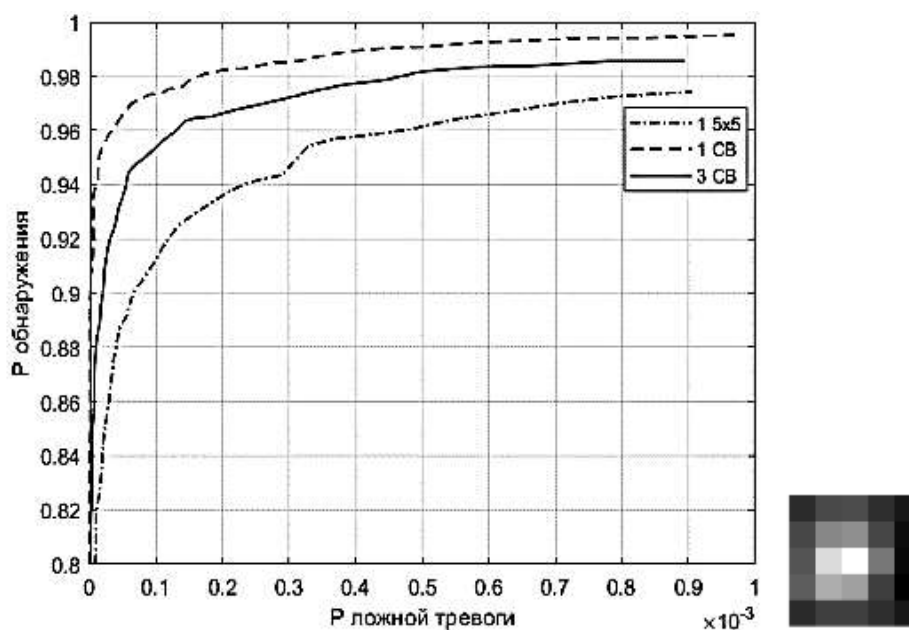


Рис. 5. Рабочие характеристики обнаружителя при различных способах фильтрации.

Заключение. Разработан способ расчета трехканального линейного фильтра, учитывающий изменение формы и амплитуды изображений малоразмерных объектов, формируемых матричным фотоприемником при движении объектов относительно решетки фоточувствительных элементов. Результаты применения фильтра к обнаружению подвижных слабоконтрастных объектов на зашумленных изображениях, построенных посредством численного моделирования сигналов фотоприемника, подтверждают возможность оценивания координат объектов с субпиксельной точностью и способность выравнивания их амплитуд при сравнительно низком (<10%) уровне шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 121022000116–0).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Гридин А.С., Дмитриев И.Ю., Васильев В.Н.* Влияние пеленгационных характеристик и разброса чувствительности элементов фотоприемника на распределение пороговой чувствительности оптико-электронного прибора // Труды VII международной конференции «Прикладная оптика-2006», СПб, ГИТМО(ТУ), 2007, т.1. с.139-144.
- [2] *Samson V., Champagnat F., Giovannelli J.-F.* Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery // *App. Opt.*, Vol. 43, № 2, 2004, pp. 257-263.
- [3] *Жегалов С.И., Соляков В.Н.* Нейронная схема формирования изображения для ФПУ с микросканированием // *Успехи прикладной физики*. 2014. Т. 2, № 4. С. 398-402.
- [4] *Соляков В.Н., Козлов К.В., Кузнецов П.А.* Компьютерная модель регистрации точечных источников излучения многорядными ФПУ с режимом ВЗН. // *Прикладная физика*, 2014, № 2, с. 54-57
- [5] *Киричук В.С., Косых В.П., Курманбек уулу Т.* Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // *Автометрия*. 2006. Т.42, № 1. С.3-12.
- [6] *Меденников П.А.* Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86, № 8. С. 65-69.
- [7] *Хорн А., Джонсон Ч.* Матричный анализ Москва: «Мир», 1089. 655 с.
- [8] *Громилин Г.И., Иванов В.А., Косых В.П., Попов С.А.* Особенности процесса сканирования с использованием матричного фотоприемника в режиме ВЗН // *Вычислительные технологии*, 2016, т.21, №1, с. 60-69.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕННЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОТ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ L1

Макаров Д.С.^{1,2}, Харламов Д.В.¹, Малимонов М.И.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск

В работе представлена серия экспериментов регистрации интерференционных рефлектограмм от ледовой поверхности пресноводного водоема вблизи г. Красноярск в разных жизненных циклах: стационарно зимние состояние – таяние с использованием сигналов навигационных спутников. Высота антенны регистрируемого устройства варьировалась от 1,58 до 3,13 м. Представлены результаты первичной обработки данных, из которых можно сделать вывод, что на характер интерференционной картины влияют не только электрофизические характеристики объекта, но и высота расположения антенны.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, сигналы навигационных спутников, слоистые среды, ГЛОНАСС, многолучевость.

OPTIMIZATION OF ANTENNA HEIGHT PLACEMENT DURING REGISTRATION OF INTERFERENCE REFLECTOGRAMS FROM ICE COVER USING NAVIGATION SATELLITE SIGNALS IN L1 RANGE

Makarov D.S.^{1,2}, Kharlamov D.V.¹, Malimonov M.I.¹

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

The paper proposes a series of experiments for recording interference reflectograms from the ice surface of a freshwater reservoir near the city of Krasnoyarsk in different life cycles: stationary winter conditions – melting using signals from navigation satellites. The height of the adjustable device antenna was repeated from 1.58 to 3.13 m. The presented results provide data processing, from which it can be concluded that the nature of the interference pattern of properties affects not only the electrical characteristics of the object, but also the height of the antenna.

Keywords: GNSS reflectometry, navigation satellite signals, layered media, GLONASS, multipath.

Введение. Используя сигналы навигационных спутников, можно восстанавливать различные параметры сред, с которыми они взаимодействуют: толщину льда, влажность подстилающей поверхности и др. [3-7] Метод ГНСС-рефлектометрии основан на регистрации интерференционного поля в точке приема [1]. Характер полученной интерферограммы зависит не только от электрофизических свойств объекта, но и от высоты приемной антенны. Также, высота установки антенны влияет на пространственное разрешение метода.

Это означает, что для достижения оптимального результата необходимо учитывать высоту антенны при проведении измерений.

Особенности метода ГНСС-рефлектометрии. Принцип метода состоит в регистрации интерференционной картины, которая возникает в результате суперпозиции прямого и отраженного от зондируемого объекта сигналов, где источник и приемник находятся на значительном расстоянии. Схема регистрации представлена на рисунке 1.

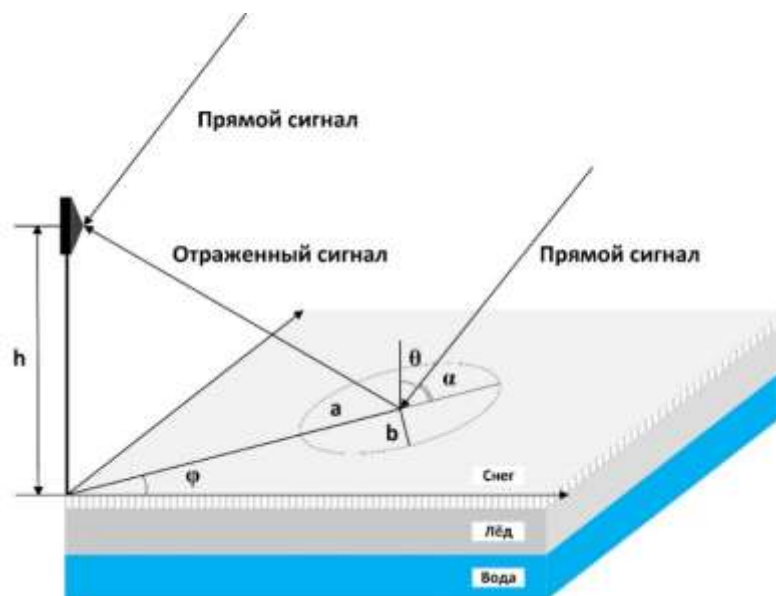


Рис. 1. Схема формирования интерференционного сигнала на приемной антенне.

Регистрируемые приемником сигналы от различных спутников (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и QZSS) с угловыми координатами: азимутального угла φ и угла места α формируют интерференционное поле в точке приема, которое определяется выражением [5, 8]

$$E^2 = E_0^2 \left[1 + r^2 + 2r \cos \left(\frac{4\pi h \sin \alpha}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

где h – высота антенны, λ – длина электромагнитной волны, диапазона L1, r – коэффициент отражения (для линейных и круговых поляризаций).

На характер интерференционной диаграммы, как видно из формулы (1) влияет следующие факторы: электрофизические параметры зондируемого объекта, угол места и высоты приемной антенны.

Высота антенны ограничена временем когерентности прямого и отраженного сигналов. Время когерентности определяется как разность хода обоих сигналов (Δr), делённая на скорость света (c), и должна быть меньше времени микросхемы спутника $\tau_c = 1 \text{ мс} / 1023 = 0,97 \text{ мкс}$. [1, 5] Максимальная высота инструмента зависит от максимального угла места [1, 5]:

$$h_{max} \leq \frac{0,97 * 10^{-6} * c * \sin \alpha}{2} \quad (2)$$

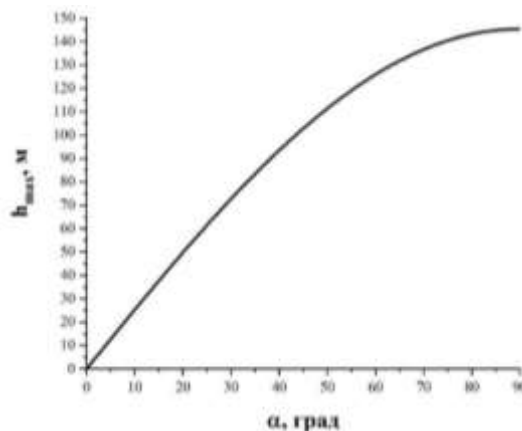


Рис. 2. Максимальные значения высоты антенны, которые обеспечивают согласованность сигнала в диапазоне углов места.

Согласно принципу Кирхгофа, поле волны, отраженной от земной поверхности, формируется на антенне токами, возбуждаемыми падающей волной на поверхности в области, ограниченной первой зоной Френеля, которая является зондируемым участком [5]. Расстояние от

антенны до центра первой зоны Френеля на поверхности зондируемого объекта может быть оценено по формуле:

$$\rho_c = h \tan \theta, \quad (3)$$

где h – высота фазового центра антенны. θ - зенитный угол спутника ГНСС ($\theta = 90^\circ - \alpha$). Первая зона Френеля ограничена эллипсом с большой, a , и малой, b , полуосями [5]:

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \sin \alpha}}{\sin^2 \alpha}, b = \frac{\sqrt{\lambda h \sin \alpha}}{\sin \alpha} \quad (4)$$

Экспериментальная часть. В период с декабря 2022 года по апрель 2023 года была произведена серия экспериментов по регистрации рефлектограмм от поверхности ледового покрова пресноводного водоема (оз. Бугач) вблизи города Красноярск (координаты установки антенны - $56^\circ 03' 48.2'' \text{N}$ $92^\circ 43' 37.7'' \text{E}$). Место установки антенны и показана на рисунке 3а. Всего было произведено порядка 8 измерений на разных высотах регистрируемой антенны – от 1,58 м до 3,18 м. Состояние льда варьировалась от стационарного зимнего до периода таяния (деградации). Регистрация сигналов производилось с помощью приемника НСРП-04, антенной с правокруговой поляризации и частотой обновления данных измерений 1 Гц по классической схеме. [2, 8] Место и схема установки продемонстрирована на рисунке 3б.



Рис. 3. а) Местоположение тестовая площадки оз. Бугач вблизи города Красноярск б) сцена регистрации интерференционных рефлектограмм.

Азимут диаграммы направленности правокруговой антенны $\sim 100^\circ$, что позволило проводить сканирование участка ледового покрова в диапазоне азимута от 10° до 190° . Средняя время эксперимента чуть больше 1,5 часов. Сводка о проведенных экспериментах представлена в таблице 1.

Первичная обработка была произведено с помощью облачного сервиса первичной обработки данных [9]. Были отфильтрованы и подобраны наиболее подходящие сеансы регистрации для дальнейшего анализа по следующим критерием: диапазон азимута лежит в диапазоне сканирования зондируемого объекта и одинаковый угол места во всех сеансах (в нашем случае от 10° до 40°). Наиболее информативные рефлектограммы представлены на рисунке 4. Для сравнения на рисунке 5 представлены результаты обработки АВЗ сигналов от НС с помощью быстрого Фурье-преобразования (БФП) [10].

Как видно из графиков, при съемке одного и того же участка, но с разной высотой регистрируемого устройства визуально отличается рефлектограммы. Так изменилось среднее значение амплитуды: для спутника GPS 8 ($h=1,58$ м) - 76,08757, а для GPS 21 ($h=3,13$ м) – 70,32571. Также изменилась период функции - при увеличении высоты антенны количество

периодов увеличивается, так за один и тот же промежуток изменения угла места на высоте 3,13 м будет 2 периода, а на высоте 1,58 м – 1.

Табл. 1. Серия экспериментов по регистрации интерференционных рефлектограмм.

Дата проведения	Высота фазового центра антенны, м	Толщина льда, м	Время сеанса
07.12.2022	3,18	~0,4	2:7:10
22.12.2022	3,18	~0,51	2:37:15
15.03.2023	1,58	~ 0,95	1:28:30
	2,36		1:24:45
05.04.2023	1,58	~ 0,9	1:52:32
	3,13		1:27:42
21.04.2023	1,58	0,68 – 0,78	1:35:29
	3,13		1:17:45

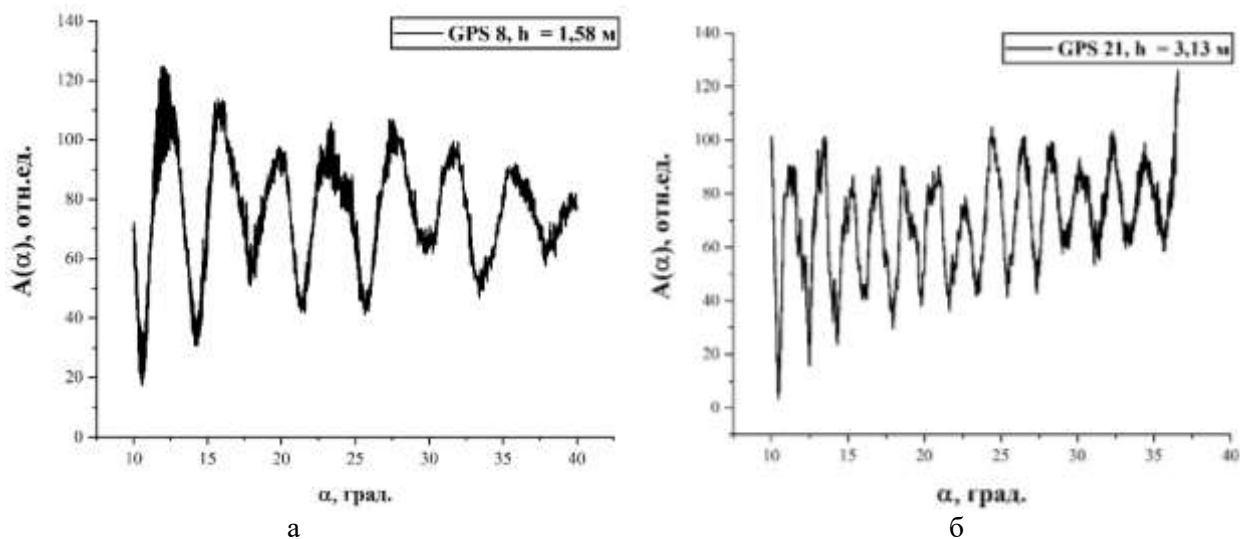


Рис. 4. Интерференционная рефлектограмма от тестового участка, сеанс за 21.04.2023, а) от спутника GPS 8 с высотой расположения антенны 1,58 м; б) от спутника GPS 21, высота расположения антенны 3,13 м.

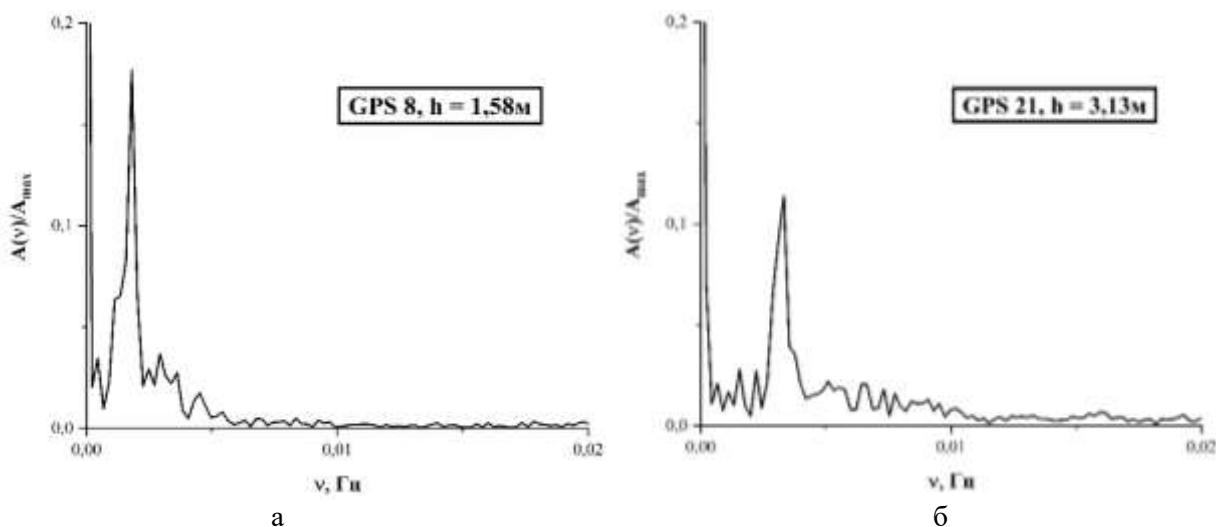


Рис. 5. Пример результата обработки рефлектограмм льда с помощью БФП: а) спутник GPS 8, высота антенны – 1,58 м; б) спутник GPS 21, высота антенны – 3,13 м.

Как можно видеть из результатов БФП кроме основной частоты в спектре, присутствуют другие частоты, обусловленные прохождением сигналов навигационных спутников через сложную структуру льда, отражением от границ разделов сред и последующей интерференцией отраженных лучей в плоскости приемной антенны. Но для измерений с высотой приемной антенны 1,58 м эти частоты наиболее выражены чем с высотой 3,13 м.

Рассмотрим пространственное разрешение метода на разных высотах расположения антенн, т.е. какую область в целом может охватить для сканирования и площадь зондируемого участка (ЗУ). Эти параметры, как видно из формул (3) и (4) зависят от высоты антенны и угла места. Результаты зависимости площади зондируемого участка от угла места $S(\alpha)$ и расстояния до центра зондируемого участка от угла места $\rho_c(\alpha)$ представлены на рисунке 6.

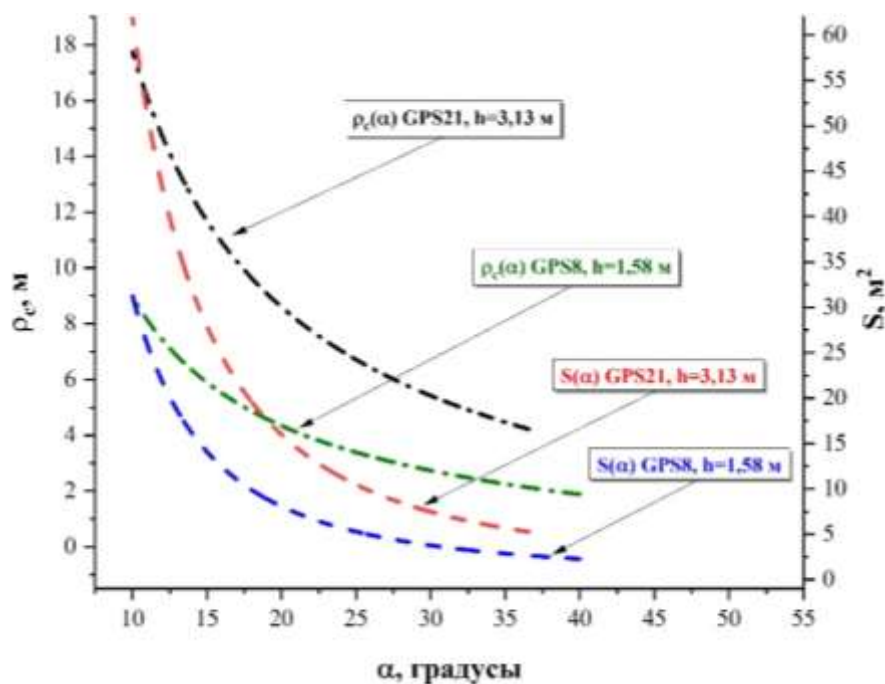


Рис. 6. Графики зависимостей: расстояние до центра зондируемого участка от угла места $\rho_c(\alpha)$ и площади зондируемого участка от угла места $S(\alpha)$.

При увеличении высоты антенны, повышается пространственный охват системы: максимальное расстояние до центра ЗУ при $h=1,58$ м составляет $\sim 8,96$ метров, а с $h=3,13$ м - $17,45$ м. Вместе с этим увеличивается площадь ЗУ, максимальные значения составляют $31,27 \text{ м}^2$ и $61,91 \text{ м}^2$ для высот антенн 1,58 м и 3,13 м соответственно. Максимальные значения достигаются при низколежащих углах места. Чем выше угол места, тем площадь и расстояние до ЗУ становится меньше.

Заключение. В ходе экспериментальных исследований рефлектометрии сигналов НС диапазона L1 от ледовых покровов на разных высотах приемной антенны, получены следующие результаты. С увеличением высоты расположения антенны площадь зондируемой области увеличивается, но уменьшается диапазон углов места, при которых наблюдается интерференция. Изменения периода рефлектограммы из-за высоты антенны позволяет сократить временные затраты по проведению сеансов записи. После обработки рефлектограмм с помощью быстрого Фурье преобразования, сеансы с более низкой высотой антенны показывают лучшую информативность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. New York, London, Springer Dordrecht Heidelberg, 2014, 286 p.
- [2] Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Симонов К.В. и др. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий. Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. Красноярск: СФУ, 2023. 256 с.

- [3] *Jacobson M.D.* Estimating Snow Water Equivalent Estimation for a Slightly Tilted Snow-Covered Prairie Grass Field by GPS Interferometric Reflectometry// EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2014. DOI:10.1186/1687-6180-2014-61.
- [4] *Rodriguez-Alvarez N.* Soil moisture and vegetation height retrieval using GNSS-R techniques // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2009. P. III-869–III-872.
- [5] *Rodriguez-Alvarez N.* Contributions to Earth Observation Using GNSS-R Opportunity Signals. Ph.D. Dissertation, Barcelona, UPC, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, 2011. 267 p.
- [6] *Михайлов М.И., Сорокин А.В., Миронов В.Л.* Использование сигналов ГЛОНАСС и GPS для измерения толщины ледового покрова пресноводных водоемов // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 10/3. С. 70-72.
- [7] *Васильев Е.Н., Макаров Д.С., Сорокин А.В.* Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 2. С. 261-271.
- [8] *Makarov D.S., Kharlamov D.V., Sorokin A.V.* Using signals of navigation satellites in the monitoring of the earth covers // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Т. 20. № 1. С. 8-19.
- [9] *Малимонов М.И., Макаров Д.С., Харламов Д.В.* Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырёхканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667433 от 20 сентября 2022 г.
- [10] *Кузьмин Е.В., Сорокин А.В.* Фурье-спектры амплитудных вариаций суперпозиции сигналов навигационных спутников вблизи поверхностей с различными свойствами // Письма в журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 18. С. 26-28.

ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Малимонов М.И.¹, Макаров Д.С.^{1,2}, Харламов Д.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск

В статье рассматривается система для хранения данных экспериментов рефлектотметрии и радиопросвечивания сигналов навигационных спутников, описаны основные модули, структура программы и инструменты, которые были использованы для создания данной системы.

Ключевые слова: ГНСС рефлектотметрия, база данных, навигационные спутники, vue, nest, javascript, postgresql.

CLOUD-BASED SERVICE FOR PROCESSING REFLECTOMETRY AND RADIO PROPAGATION DATA FROM NAVIGATION SATELLITE SIGNALS

Malimonov M.I.¹, Makarov D.S.^{1,2}, Kharlamov D.V.¹

¹ Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

The article discusses a system for storing data from reflectometry and radio probing experiments of navigation satellite signals. The main modules, program structure, and tools used to create the system are described.

Keywords: GNSS, reflectometry, database, navigations satellites, vue, nest, javascript, postgresql.

Введение. Любые практические эксперименты необходимо хранить, обрабатывать и обмениваться результатами этих экспериментов. Вручную передавать данные и обрабатывать их с помощью различных программ занимает много времени. На текущий момент есть множество решений, которые позволяют делать первичную обработку данных: OriginPro, Microsoft Excel, MATLAB, LabVIEW и т.д. Данные программные обеспечения позволяют имеют богатый функционал (инструменты анализа статистики, модули графического представления данных, обработки сигналов, подбора функций и т.д.), но они не позволяют организовать одновременную работу несколькими пользователями и создать большую базу экспериментальных данных с возможностью быстрого обращения ко всем данным.

Необходимо создать такую систему, которая бы позволяла хранить данные экспериментов рефлектотметрии и радиопросвечивания сигналов навигационных спутников в облаке, проводить обработку и анализировать данные в одном месте.

Разработанная программа предназначена для автоматизации обработки экспериментальных данных рефлектотметрии и радиопросвечивания полученных с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Сервис может фильтровать данные по заданным параметрам и визуализировать зависимости амплитуды сигнала от угла возвышения/номера кадра. Также реализована возможность наложения амплитудно-временных зависимостей на один график и построения полярных диаграмм для оценки траектории движения спутников. Для пост-обработки данных можно скачать отфильтрованные файлы. Для работы с данными используется API сервера, который проверяет авторизацию пользователя по токenu доступа, сохраненному в локальном хранилище браузера.

Используемые материалы. Данный проект состоит из трех частей: клиент, сервер и база данных.

Для разработки клиентской части используется фреймворк vue.js [1-4], с расширениями vuex и vue-router. Vuex – это библиотека для управления состоянием приложения, служит в основном для хранения данных о пользователе. Vue-router обеспечивает маршрутизацию внутри приложения.

Пользовательский интерфейс построен с помощью библиотеки primevue, которая предоставляет разработчику множество готовых компонент, таких как: таблицы, кнопки, меню навигации и т.д.

За отображения графических материалов отвечает библиотека apache ECharts [5].

Для разработки серверной части используется программная платформа node.js [6], фреймворк nest.js и ORM (Object-Relational Mapping — объектно-реляционное отображение или преобразование) sequelize для работы с базой данных. Базой данных выступает PostgreSQL [7].

Клиент и сервер. Клиентская часть построена как SPA (single page application) – одностраничное приложение, где рендер страницы осуществляется только кодом, выполненным на языке javascript, и представляет собой одну страницу html. Все данные подгружаются динамически, вместо полной перегрузки при переключении страниц. Вся работа, связанная с маршрутизацией страниц, перекладывается на приложение.

Пользователь при входе взаимодействует с модулем маршрутизации, который в зависимости от введённой ссылки и наличия авторизации сгенерирует необходимую страницу или перенаправит пользователя на страницу входа. Каждая страница состоит из компонентов, которые взаимодействуют между собой и модулем запросов.

За авторизацию отвечает отдельный модуль. Данный модуль отправляет запрос на сервер для проверки правильности введённых данных. В случае успешной авторизации, модуль сохраняет токен доступа в локальное хранилище браузера, чтобы не требовать повторной авторизации при перезагрузке страницы или при переходе на другие страницы в рамках одного сеанса работы. Если же авторизация не прошла успешно, модуль отобразит сообщение об ошибке и предложит повторить попытку. Токен действует 8 часов, затем необходима повторная авторизация. На рисунке 1 показана структура клиентской части.

За загрузку и сохранения данных отвечает модуль запросов. Это вспомогательный модуль, который предоставляет готовые функции для запроса и сохранения данных, модуль выдает данные в необходимом для приложения виде. Функции модуля используются компонентами страниц для запроса и сохранения экспериментов, а также для работы с данными этих экспериментов, чтобы вывести их на странице, построить графики или провести расчеты.

Данные для сохранения предоставляются в формате csv в кодировке utf-8.

Серверная часть состоит из пяти частей. Сервер, контроллер, сервисы, кэш и база данных. На рисунке 2 представлена схема серверной части.

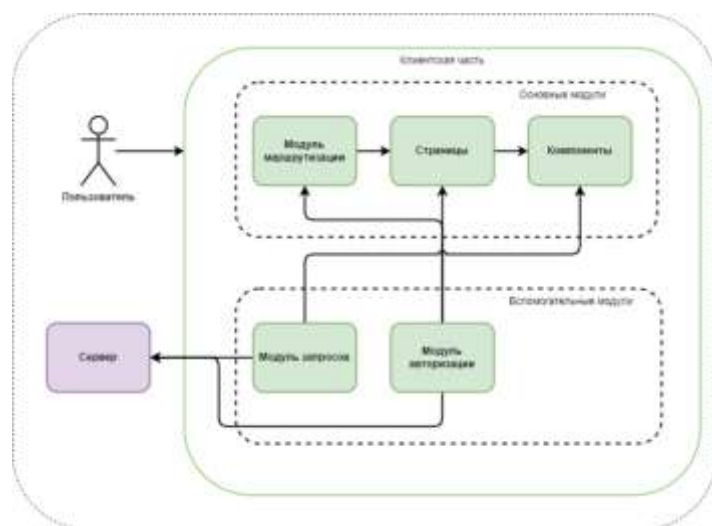


Рис. 1. Структура клиентской части.

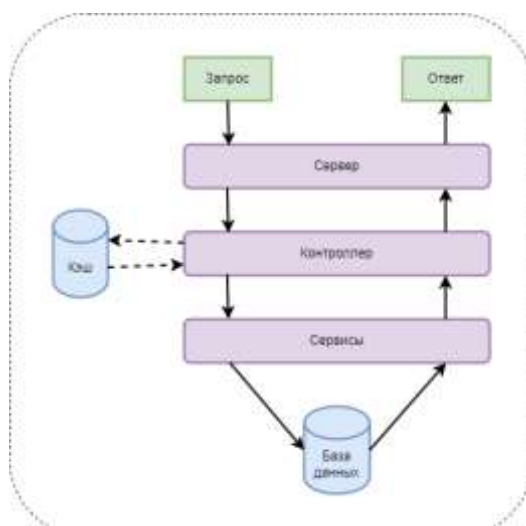


Рис. 2. Схематичное отображение сервера.

Сервер является входной точкой и содержит необходимую информацию для подключения к базе данных, ключи и степени шифрования паролей, занимается выдачей статических материалов (скрипты, страницы, стили), при получении запроса отправляет его в контроллер.

Контроллер обрабатывает запросы. Контроллер анализирует запрос и в зависимости от метода запроса и наличия данных в кэше решает, что делать дальше. Если данные в кэше есть, то контроллер возвращает данные, без вызова сервисов. Если данных нет, то контроллер вызывает необходимый сервис, который выдает необходимые данные из базы данных, сохраняет, изменяет или удаляет их. При получении данных от сервиса контроллер заносит данные в кэш по особому ключу, который содержит в себе уникальный идентификатор эксперимента и значения фильтра. Таким образом, даже отфильтрованные данные заносятся в кэш для быстрой выдачи по запросу.

Сервисы – это модули, которые занимаются бизнес-логикой, выдают, сохраняют или удаляют данные в базе данных. Сервисы вызываются в зависимости от контроллера и метода запроса.

Также существуют сервисы для авторизации. Эти сервисы генерируют ключи доступа и занимаются проверкой правильности введенных данных.

Работа с данными. Один эксперимент весит около 80-100 мегабайт, содержит более триста тысяч строк. Данные с каждого спутника находятся в отдельном файле (всего порядка 40 файлов), который содержит следующую информацию: азимут, угол возвышения, амплитуда (отношение сигнал к шуму) и т.д. [8].

Также существующая система фильтрации увеличивает итоговый размер эксперимента. Передать через интернет такой объем без деления на части не получится. Поэтому эксперимент собирается из частей на клиенте пошагово. Первый шаг заключается в том, чтобы запросить весь список участвующих спутников в эксперименте. Второй шаг заключается в получении данных по этому списку по отдельности, друг за другом. Получается около 48 запросов. Такой подход позволяет передать весь эксперимент кусочками без проблем. Если не делить эксперимент, а запрашивать сразу весь, то получается большой запрос, который в тестах использовал около четырех гигабайт оперативной памяти, что приводило к отключению сервера на виртуальной машине. При делении на части, используется 5-10 мегабайт оперативной памяти. На рисунке 3 продемонстрирована схема работы с запросами для получения данных эксперимента.

Система фильтрации использует тот же подход. На сервер приходит запрос с фильтром, на клиент отправляется список, содержащий спутники, которые попали под фильтрацию. Затем от клиента отправляются запросы на получение данных по списку. Для одного эксперимента с фильтрацией получается примерно от 48 до 96 запросов, зависит от фильтра.

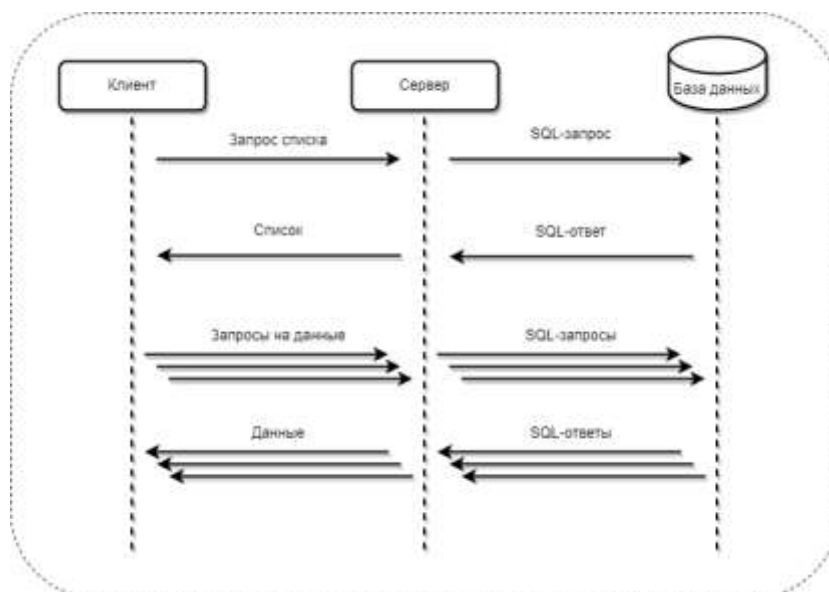


Рис. 3. Схематическое отображение работы с запросами.

Такой подход позволяет работать не только с одним экспериментом, а сразу с несколькими экспериментами без больших затрат ресурсов.

Сохранение данных в базе происходит следующим образом. Пользователь выбирает необходимые файлы. Они отправляются всей пачкой на сервер. На сервере данные из формата csv преобразовываются в формат json, затем вызывается функция для множественного занесения данных в базу данных. На этом сохранение данных заканчивается.

Обработка данных эксперимента. Система предназначена не только для хранения данных, но еще и для обработки. Для примера возьмем модуль усреднения. Этот модуль позволяет получить усредненные данные эксперимента.

На рисунке 4 показан пример эксперимента. В данном эксперименте учувствуют 36 спутников. Необходимо получить усреднённый график данного эксперимента.

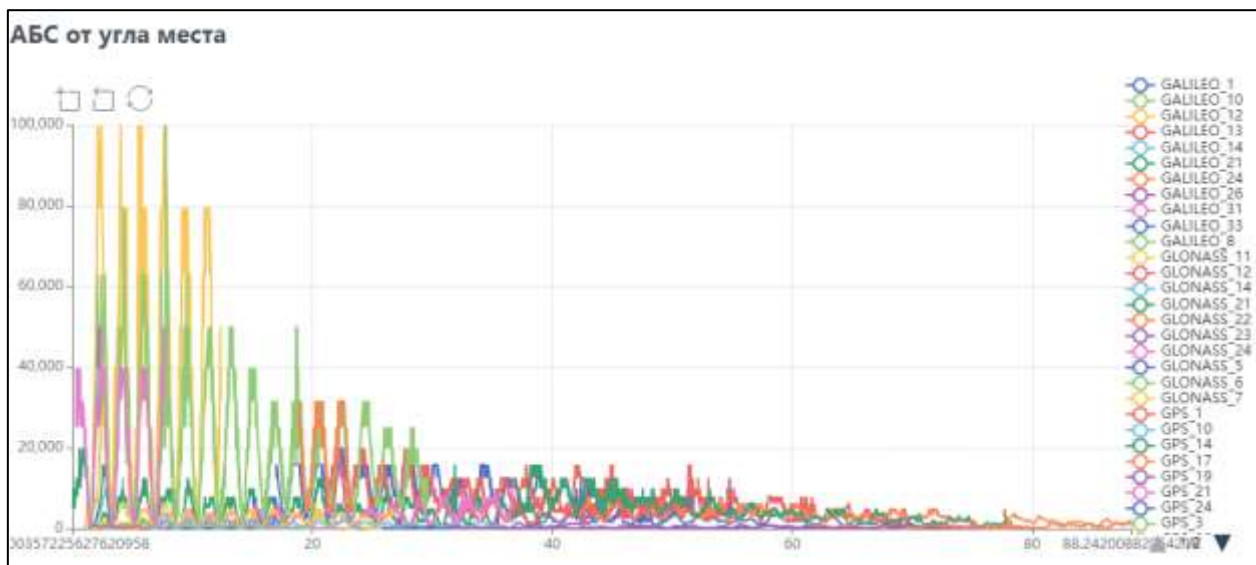


Рис. 4. График амплитуды сигнала от угла места до усреднения.

Вычислить среднее значение сразу не получится. Угол места имеет точность семь знаков после запятой и вычислить среднее значение в точке не представляется возможным. Угол места у каждого спутника имеет уникальное значение и не совпадает с другими. Сначала необходимо интерполировать данные с определенным шагом. Для управления интерполяцией создано специальное меню, где можно указать тип графика и шаг. Меню показано на рисунке 5.

Алгоритм проходится по каждому спутнику и интерполирует данные. Затем вычисляется среднее значение. На рисунке 6 представлен результат усреднения алгоритмом.

Данный алгоритм оптимизировался для увеличения скорости работы. Во время первых тестов алгоритму требовалось около 30 секунд и больше, в зависимости от компьютера при стандартных настройках усреднения. На данный момент алгоритму требуется меньше 3 секунд при стандартных настройках усреднения.

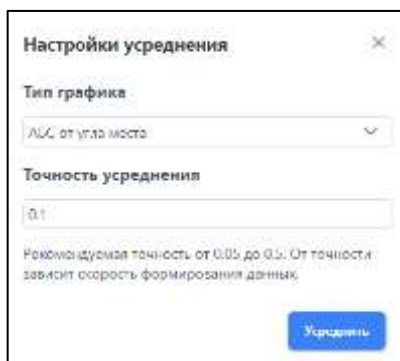


Рис. 5. Меню для настройки алгоритма усреднения.

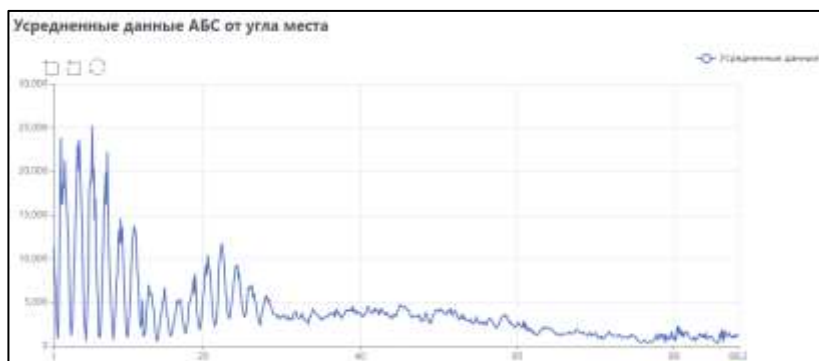


Рис. 6. График амплитуды сигнала от угла места после усреднения.

Заключение. В данной работе было продемонстрировано приложения для обработки и хранения данных рефлектотрии и радиопросвечивания сигналами навигационных спутников. Планируется развитие проекта, доработка существующих функций и добавление новых, таких как расчеты траектории зондирующего участка, моделирование теоретической кривой интерферограммы, возможность применять все эти функции сразу к нескольким экспериментам, а не только к одному [9]. Эта версия продукта является продолжением предыдущей работы [10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Malimonov M.I., Yakubailik O.E.* Cloud-based software tools for the rapid development of web gis // CEUR workshop proceedings. 2021. Vol. 3006. С 172-179.
- [2] *Xiong S., Wang X., Lan Z.* Model Research of Visual Report Components // Procedia Computer Science. 2022. № 208. С. 478-485.
- [3] *Nian L, Bo Z.* The Research on Single Page Application Front-end Development Based on Vue // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1883(1).
- [4] *Liu Q.B., Gao S., Guo B.F., Liu H., Feng Y.Z., Xia H.* Research and Development of Movie Social System // Procedia Computer Science. 2020. № 166. С. 154-159.
- [5] *Li D., Mei H., Shen Y. et al.* ECharts: A declarative framework for rapid construction of web-based visualization // Visual Informatics. 2018. 2(2). С. 136-146.
- [6] *Kaimer F., Brune P.* Return of the JS: Towards a Node.js-Based Software Architecture for Combined CMS/CRM Applications // Procedia Computer Science. 2018. № 141. С. 454-459.
- [7] *Pirani M., Cucchiarelli A., Spalazzi L.* Paradigms for database-centric application interfaces // Procedia Computer Science. 2023. № 217. С. 835-845.
- [8] *Makarov D.S., Kharlamov D.V., Sorokin A.V.* Using signals of navigation satellites in the monitoring of the earth covers // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Т. 20. № 1. С. 8-19.
- [9] *Макаров Д.С., Савин И.В., Сорокин А.В., Фомин С.В., Харламов Д.В.* Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой. Патент на изобретение RU 2682718 С1, 21.03.2019. Заявка № 2018119448 от 25.05.2018.
- [10] *Малимонов М.И., Макаров Д.С., Харламов Д.В.* Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырёхканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1. Патент на изобретение RU 2022667433. 20.09.2022. Заявка № 2022666794 от 16.09.2022.

МЕТОДЫ ГЛУБОКО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИБЕЛИ ЛЕСА ВСЛЕДСТВИЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕРОЙ ЦАПЛИ (*ARDEA CINEREA*), ПО ДАННЫМ БПЛА

Матко Е.В.¹, Сафонова А.Н.^{1,2}

¹ Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет,
Красноярск

² Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Одним из широко используемых методов для решения различного рода задач в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются технологии глубокого обучения. В качестве сравнения, в работе представлено две модели нейронных сетей для прогнозирования гибели леса вследствие жизнедеятельности серой цапли по данным Беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Для эксперимента был подловлен уникальный набор изображений, разработан алгоритм предварительной обработки изображений, а также проведено сравнительное обучение и тестирование нейронных сетей U-Net и Deeplabv3+.

Ключевые слова: глубокое обучение, гибель лес, серая цапля, *Ardea Cinerea*, прогнозирование, БПЛА.

DEEP LEARNING FOR FOREST DEATH PREDICTION BASED ON GRAY HERON (*ARDEA CINEREA*) ACTIVITY USING UAV DATA

Matko E.V.¹, Safonova A.N.^{1,2}

¹ Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

² St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg

One of the most widely used methods for solving various types of remote sensing tasks is deep learning technologies. As a comparison, the paper presents two neural network models for predicting the death of a forest by the life of the gray heron according to UAV data. For the experiment, a unique set of images was captured, an image preprocessing algorithm was developed, and comparative training and testing of the U-Net and Deeplabv3+ neural networks were performed.

Keywords: deep learning, forest death, gray heron, *Ardea Cineria*, prediction, UAV.

Введение. Лес является возобновляемым ресурсом, однако, ученые со всего мира стараются решить проблему его вымирания. К основным причинам гибели леса можно отнести следующие: в следствии налета насекомых [1,2], жизнедеятельности животных [3], птиц [4], пожаров [5], болезней [6], вырубки [7], и прочие. Однако, настоящая работа нацелена на прогнозирование поврежденного леса в результате жизнедеятельности серой цапли (от лат. *Ardea Cineria*) [8]. Данная птица может быть значительной угрозой для лесов, особенно для молодых и слабых деревьев, так как она повреждает кору и ветви деревьев, что приводит к их гибели. Так, например, в серии статей были представлены исследования по влиянию жизнедеятельности серой цапли на экосистему леса [9,10]. Подтверждено, что нахождение серой цапли в высокоплодородных местообитаниях может приводить к накоплению питательных веществ, что в свою очередь является причиной токсичного воздействия на лесную экосистему. В результате такого воздействия лес начинает погибать со временем. Также было обнаружено, что в некоторых случаях ее популяция может достигать высоких уровней и приводить к массовой гибели леса. С другой стороны, серая цапля является фактором, способствующим повышению уровня трофности экосистем в местах своего гнездования. Таким образом, присутствие птиц может как благоприятно влиять на экосистему, так и вызывать негативные последствия.

Для локализации зон гибели леса используют различные методы для мониторинга и наблюдений за окружающей средой с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Несмотря на то, что в литературе существует огромное количество методов обработки данных ДЗЗ, например случайный лес, *k*-ближайших соседей, непараметрические методы и так далее. Технологии искусственного интеллекта (ИИ), такие как машинное обучение

(МО) и глубокое обучение (ГО), преобладают над классическими методами [11]. В основном, это связано с высоким развитием компьютерных мощностей.

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в прогнозировании гибели леса вследствие жизнедеятельности серой цапли по данным БПЛА с использованием технологии ГО. В ходе анализа литературы мы обнаружили несколько схожих работ, которые соответствуют целям данного исследования и основанных на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения задачи распознавания поврежденного леса в результате разного рода причин по различным данным со спутников и с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) [1,6]. Однако, мы не встретили ни одной работы, которая бы затрагивала конкретную проблему – прогнозирование ущерба, причиняемого вследствие жизнедеятельности серой цапли по данным БПЛА с использованием ГО.

Заселение и выбор места гнездования серой цапли. Серая цапля (от лат. *Ardea Cineria*) является одним из видов длинноногих болотных птиц из семейства цаплевых (от лат *Ardeidae*), распространенных в умеренном климате Европы, Азии и Африки. Она предпочитает водноболотные угодья, такие как озера, реки, пруды, болота и морское побережье, где обычно ведет оседлый образ жизни, хотя некоторые популяции из более северных районов мигрируют на юг в осеннее время года. Серая цапля может оказывать определенное влияние на деревья, особенно на ранних стадиях развития лесного сообщества. Этот вид птиц может выбирать высокие деревья для строительства гнезд, и таким образом, создавать колонии на определенных участках леса. Когда колонии становятся крупными, они могут привести к повреждению деревьев, на которых гнездятся цапли. Для поддержания популяции серых цапель и защиты их мест обитания необходимо проводить регулярные мониторинговые исследования, а также сохранять и улучшать условия обитания птиц, включая создание новых мест для гнездования и обеспечение достаточной пищевой базы.

Тестовая область и материалы исследования. Исследуемый район гнездования птиц расположен на территории Республики Татарстан, в 50 километрах к югу от города Казани, недалеко от села Нармонка, Россия. На полуострове, образованном слиянием Волги и ее крупнейшего притока Камы (рис. 1).



Рис. 1. Тестовая область исследования – лесной массив вблизи населенного пункта Нармонка, Республика Татарстан, Россия.

В исследовании использовались изображения, полученные с БПЛА DJI Phantom 4 с RGB (красный, зеленый и синий каналы) камерой с разрешением 4000×3000 пикселей. Полет беспилотника осуществлялся 15 июня 2022 года. Объектом исследования выступает лесной массив, посаженный в 1983 году, и состоит исключительно из сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris*). Набор данных был разделен на 2 категории: здоровые деревья (0–75% повреждений) и поврежденные или мертвые деревья (75–100% повреждений).

В рамках проведения эксперимента был собран первоначальный набор данных, содержащий 505 изображений. При отборе изображений были учтены определенные критерии, среди которых: отсутствие шумов на изображениях, наличие необходимых объектов исследования, ограничение занимаемой рекой площади кадра менее 50%, отсутствие дорог на изображении, и отсутствие населенных пунктов на изображении. Для отбора изображений была проведена ручная сортировка, в результате которой была получена выборка, соответствующая установленным критериям. После выполнения предварительного осмотра и отбора изображений был получен подготовленный набор данных, включающий в себя 383 изображения. Весь набор данных был разделен на обучающую и валидационную выборки – 70% и 30%, соответственно. Кроме того, была выделена одна крупная сцена с кратером для проведения независимой проверки обученных моделей.

Методы. Для улучшения качества исходных изображений и повышения производительности обучающих моделей нами был разработан алгоритм для предварительной обработки набора данных. Алгоритм включает в себя несколько последовательных шагов, каждый из которых выполняет определенные преобразования над изображением [12]:

Шаг 1: нормализация яркости изображения (1) в диапазон от 0 до 1.

$$dst = \alpha * (src - min_val) / (max_val - min_val) + \beta, \quad (1)$$

где src – исходное изображение, dst – нормализованное изображение, α – масштабирующий коэффициент, β – смещающий коэффициент, min_val и max_val – минимальное и максимальное значения.

Шаг 2: преобразование трёхцветного изображения в цветовое пространство Lab, которое описывает математически все воспринимаемые цвета в трех измерениях L для легкости и a и b для цветовых компонентов зелено-красный и сине-желтый [13].

Шаг 3: выравнивание распределения яркостей в изображении с использованием алгоритма адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) для улучшения контрастности изображения [14].

Шаг 4: изменение яркости и контрастности для каждого цветового канала изображения и дополнительная корректировка в усредненных диапазонах.

Для удобства и ускорения разметки набора данных изображений был использован онлайн сервис VGG Image Annotator (VIA) [15].

В качестве ИНС для эксперимента были выбраны U-Net [16] и Deeplabv3+ архитектуры [17], так как они продемонстрировали высокие точности на задачах сегментации в условиях сниженных вычислительных мощностей.

Для оценки производительности моделей был использован коэффициент игральной кости (DSC) (2).

$$DSC = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|}, \quad (2)$$

где $|X|$ и $|Y|$ количество элементов в множестве X и Y , соответственно.

Результаты. Пример применения алгоритма предварительной обработки набора данных и распределение яркостей по каналам на исходном и проработанном изображениях представлены на рисунке 2.

В результате проведенного преобразования над изображениями можно заметить, как осуществилось сбалансирование яркостей для каждого цветового канала в диапазоне от 0 до 255, в сравнении со средними значениями каналов на исходных изображениях, которые составляли от ~ 50 до ~ 200.

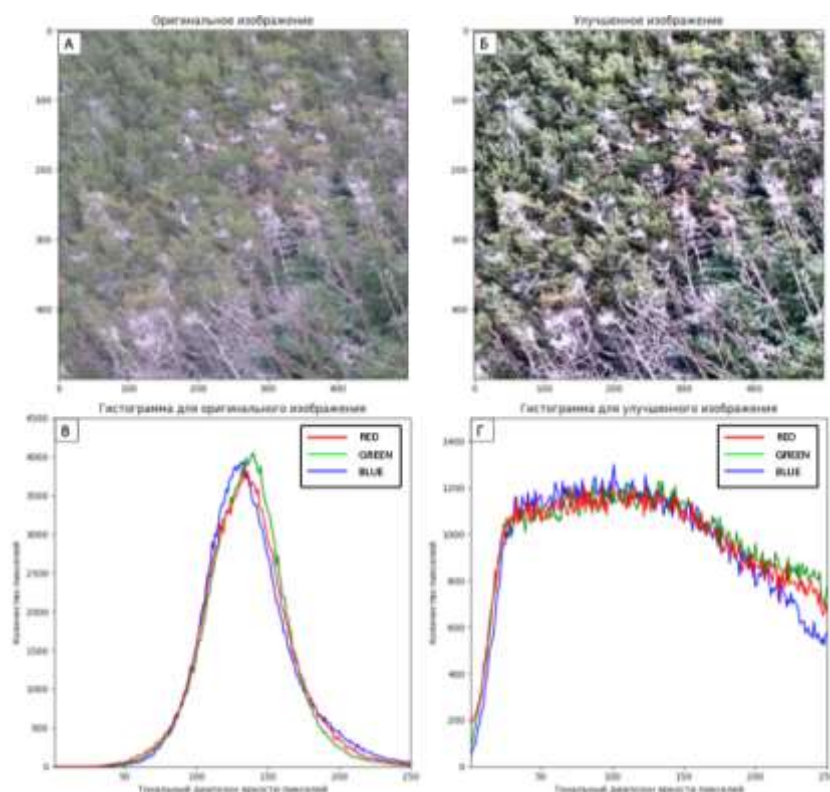


Рис. 2. Пример применения алгоритма предварительной обработки набора данных и представление распределения яркостей каналов: а – исходное изображение; б – преодобработанное изображение; в и г – гистограммы распределения пикселей на исходном и преодобработанном изображениях.

В данном исследовании использовался предварительно обработанный набор изображений. Однако, из-за ограничений экспериментальной установки, которая была доступна для выбранных ИНС, размеры изображений 4000×3000 пикселей оказались слишком большими. В связи с этим, каждое изображение было разделено на патчи размером 500×500 пикселей и состояло из 48 фрагментов. После разделения на пакеты каждое изображение было проверено вручную, на предмет содержания исследуемого объекта. Затем мы отобрали 500 изображений с наиболее выраженными признаками смертности леса для дальнейшего анализа.

Для увеличения разнообразия и обобщающей способности набора данных, была применена технология искусственного увеличения набора данных с применением таких функций как повороты, масштабирование, изменение яркости и контраста, а также случайное горизонтальное отражение. Таким образом, обучающий набор данных для ИНС состоял из 500 изображений размером 500×500 пикселей. Каждое изображение было сопровождено соответствующей маской, представляющей поврежденный или мертвый лес на 75-100%.

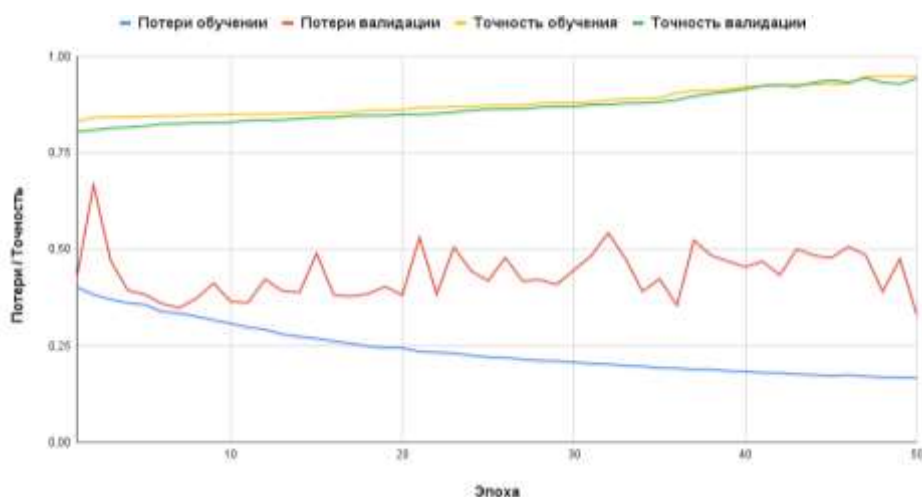


Рис. 3. Потери и точность для каждой эпохи обучения модели U-net.

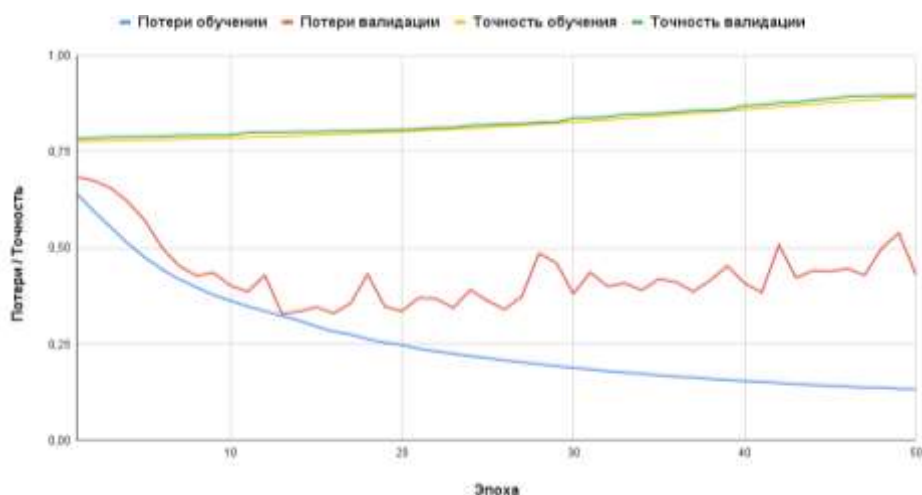


Рис. 4. Потери и точность для каждой эпохи обучения модели Deeplabv3+.



Рис. 5. Сравнительный результат независимой проверки обученных архитектур.

На этапе обучения ИНС была использована стандартная скорость обучения со значением 0,001. Количество пакетов для разбивки обучающей выборки составило 14. Максимальная точность во время обучения U-Net составила 91% (график от обучения представлен на рисунке 3). и максимальная точность Deeplabv3+ составила 85% (график от обучения представлен на рисунке 4). Потери от обучения составили 0,311 для U-Net и 0,19 для Deeplabv3+. Результат независимого тестирования для каждой из моделей составил 96,34% для U-Net и 89% для Deeplabv3+.

Для наглядности, на рисунке 5 представлены результаты обученных архитектур для прогнозирования поврежденных и мертвых деревьев в процентном соотношении.

После проведения тестирования были получены высокие результаты прогнозирования поврежденного и мертвого леса, что составило 91% для U-Net и 86% для Deeplabv3+ в соответствии с представленной наземной истиной. Однако, несмотря на достигнутые результаты, следует отметить, что представленные модели не являются идеальными и существует потенциал для дальнейшего улучшения их производительностей.

Заключение. В проведенном исследовании мы представили результаты прогнозирования гибели леса вследствие жизнедеятельности серой цапли по данным БПЛА с использование U-Net и Deeplabv3+ архитектур. Мы предложили новый алгоритм для предварительной обработки набора данных. Для эксперимента был подготовлен набор данных изображений лесного массива вблизи населенного пункта Нармонка, Республика Татарстан, Россия, полученных с помощью БПЛА DJI Phantom 4. Он включал в себя два класса: здоровые деревья (0–75% повреждений) и поврежденные или мертвые деревья (более 75–100% повреждений). Результаты распознавания поврежденных и мертвых деревьев составили до 96,34% и 89% точности для U-Net и Deeplabv3+, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-76-10042).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F.* Detection of Fir Trees (*Abies Sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sensing*. 2019, 11, 643, DOI:10.3390/rs11060643.
- [2] *Safonova A., Hamad Y., Alekhina A., Kaplun D.* Detection of Norway Spruce Trees (*Picea Abies*) Infested by Bark Beetle in UAV Images Using YOLOs Architectures. *IEEE Access*. 2022, 10, 10384–10392, DOI:10.1109/ACCESS.2022.3144433.
- [3] *Żółkoś K., Kukwa M., Afranowicz-Cieślak R.* Changes in the Epiphytic Lichen Biota in Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) Stands Affected by a Colony of Grey Heron (*Ardea Cinerea*): A Case Study from Northern Poland. *The Lichenologist*. 2013, 45, 815-823, DOI:10.1017/S0024282913000558.
- [4] *Hryń W., Czarnecka J., Kitowski I., Bartmiński P., Zubel R.* Stress or Help, How Does the Grey Heron *Ardea Cinerea* L. Modify the Vegetation Structure of the Forest Floor? *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2019, 88, DOI:10.5586/asbp.3625.
- [5] *Tyukavina A., Potapov P., Hansen M.C., Pickens A.H., Stehman S.V., Turubanov S., Parker D., Zalles V., Lima A., Kommareddy I.* Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022, 3.
- [6] *Zhang P., Wang Z., Rao Y., Zheng J., Zhang N., Wang D., Zhu J., Fang Y., Gao X.* Identification of Pine Wilt Disease Infected Wood Using UAV RGB Imagery and Improved YOLOv5 Models Integrated with Attention Mechanisms. *Forests*. 2023, 14, 588, DOI:10.3390/f14030588.
- [7] *Altarez R.D.D., Apan A., Maraseni T.* Deep Learning U-Net Classification of Sentinel-1 and 2 Fusions Effectively Demarcates Tropical Montane Forest's Deforestation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023, 29, 100887, DOI:10.1016/j.rsase.2022.100887.
- [8] *Ivanchev V., Pavlov D., Kutuzova O.* Dynamics of Colonial Settlements of Grey Heron (*Ardea Cinerea* L.) and Great Egret (*Ardea Alba* L.) and Stages of Great Egret Expansion on the Territory of Ryazan and Yaroslavl Regions. *ET*. 2019, 2, DOI:10.23859/estr-180519.
- [9] *Вишневецкий В.* Птицы Европейской Части России; Тайны нашей планеты; Эксмо, 2011. 272 с. ISBN:978-5-699-47452-3.
- [10] *Дементьев Г.П., Ильичев В.Д., Гладков Н.А.* Жизнь животных. Большая российская энциклопедия. Птицы. 6 т. Москва: Просвещение, 1986. 527 с.
- [11] *Zhu X.X., Tuia D., Mou L., Xia G., Zhang L., Xu F., Fraundorfer F.* Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2017, 5, 8-36, DOI:10.1109/MGRS.2017.2762307.
- [12] *Iliukhin S.A., Chernov T.S., Polevoy D.V., Fedorenko F.A.* A Method for Spatially Weighted Image Brightness Normalization for Face Verification. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*; SPIE, March 15, 2019; Vol. 11041, pp. 312-319.
- [13] *Chen Y., Hao P.* Optimal Transform in Perceptually Uniform Color Space and Its Application in Image Retrieval. In *Proceedings of the Proceedings 7th International Conference on Signal Processing, 2004*. *Proceedings. ICSP '04*. 2004. August, 2004; Vol. 2, pp. 1107-1110 vol.2.
- [14] *Reza A.M.* Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement. *The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology*. 2004, 38, 35-44, DOI:10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82.
- [15] *Dutta A., Zisserman A.* The VIA Annotation Software for Images, Audio and Video. In *Proceedings of the Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*; ACM: Nice France, October 15, 2019; pp. 2276-2279.
- [16] *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *arXiv:1505.04597 [cs]*. 2015.
- [17] *Chen L.-C., Zhu Y., Papandreou G., Schroff F., Adam H.* Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. 2018.

РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗРЕЗЕ «БАЧАТСКИЙ» НА ОСНОВЕ КОНТЕЙНЕРНОЙ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Миков Л.С., Попов С.Е.

Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ, Кемерово

В работе рассмотрены вопросы оценки состояния и изменения земной поверхности на территории разреза «Бачатский» (Кемеровская область). Продемонстрировано применение многопроходной серии спутниковых радарных данных Sentinel-1 с использованием метода интерферометрии малых базовых линий (SBaS) для определения средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности. Описаны процедуры запуска высоконагруженных вычислительных процедур расчета смещений на основе мульти конвейерного подхода в виде микросервисов (контейнеров). Контейнеризация позволит автоматизировать процесс развертывания и интеграции за счет абстрагирования и инкапсуляции взаимодействия между системой мониторинга и программным кодом.

Ключевые слова: радарные данные, контейнеризация, Docker, SBaS, угольный разрез, смещения земной поверхности.

CALCULATION OF VERTICAL DISPLACEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE IN THE «BACHATSKY» OPEN PIT BASED ON CONTAINER PROCESSING OF RADAR DATA

Mikov L.S., Popov S.E.

Kemerovo Branch of the FRC ICT, Kemerovo

The paper considers the issues of assessing the state and changes in the earth's surface in the territory of the Bachatsky mine (Kemerovo region). The application of the multi-pass series of satellite radar data Sentinel-1 using the small baseline interferometry (SBaS) method to determine the average rates of change of vertical displacements of the earth's surface is demonstrated. The procedures for launching highly loaded computing procedures for calculating displacements based on a multi-pipeline approach in the form of micro services (containers) are described. Containerization will automate the deployment and integration process by abstracting and encapsulating the interaction between the monitoring system and the program code.

Keywords: radar data, containerization, Docker, SBaS, coal mine, ground displacements.

Введение. На сегодняшний день Кемеровская область - Кузбасс является одним из крупнейших горнопромышленных регионов в России. Ежегодное увеличение объемов добываемого открытым способом угля ведет к с неблагоприятными последствиями для окружающей среды [1]. На территориях угольных разрезов возникают деформации земной поверхности, которые достигают больших по протяженности территорий и являются источником аварийных ситуаций.

Разрез «Бачатский» является одним из крупнейших в Кузбассе. В течение нескольких десятилетий лет здесь осуществляется активная добыча угля открытым способом. Так, например, в 2008 году было добыто 9,546 миллионов тонн угля. Такая интенсивная добыча оказывает непосредственное влияние на рельеф, поэтому для предупреждения чрезвычайных ситуаций необходимо проводить мониторинг состояния земной поверхности.

Сегодня для определения деформаций земной поверхности активно используются спутниковые радиолокационные данные. Преимущество их заключается в относительно небольшой цене за квадратный километр, а также независимость съемки от погодных условий и времени суток. Кроме того, такие данные позволяют проводить мониторинг на больших площадях (несколько сотен квадратных километров).

В настоящее время в Кемеровском филиале ФИЦ ИВТ активно разрабатывается новый подход к комплексной обработке потоков радарных данных, основанный на Docker-конвейере, позволяющий в значительной степени автоматизировать процессы обработки информации. Подход основан на использовании открытого ПО, что связано с уходом от коммерческого ПО, который в России больше не поддерживается.

Исходные данные. В качестве объекта исследования была выбрана территория разреза «Бачатский». Для расчетов было отобрано 8 радиолокационных изображений с космического аппарата Sentinel-1B за период с 01.05.2022 по 22.09.2022 гг. с периодичностью съемки от 12 до 24 дней. Вся обработка проводилась в разработанном программном комплексе с помощью метода SBaS. Для более точной корегистрации радарных изображений использовалась цифровая модель рельефа SRTM.

Контейнеризация модуля расчета смещений. Запуск расчета смещений методом SBaS осуществляется с использованием технологии контейнеризации на основе Docker [2].

Docker – это платформа для разработки, развертывания и запуска контейнерных приложений. Docker container (контейнер) – это набор процессов, изолированных от основной операционной системы. Приложения работают только внутри контейнеров, и не имеют доступа к основной системе, за исключением явно подключаемых директорий при запуске контейнера. Например, все промежуточные результаты расчетов сохраняются внутри виртуального диска контейнера, пользователю доступен только конечный результат, kml, shp-файлы. Множественный запуск модуля «не засоряет» хост-систему рабочими файлами. После остановки контейнера его состояние обнуляется, все промежуточные файлы внутри контейнера удаляются.

Контейнеры позволяют полностью автоматизировать процесс развертывания приложения, так как включают в себя все нужные зависимости и порядок выполнения действий. В классическом подходе для установки ПО может потребоваться выполнить несколько действий: выполнить скрипт, изменить файлы настроек и так далее. Также контейнеры упрощают развертывание на нескольких серверах. В классическом подходе для того, чтобы развернуть одно и то же приложение на нескольких машинах, нужно будет повторять одни и те же действия. Это упрощает перенос приложения на другую инфраструктуру. Особенно если речь идет о масштабируемой мультисервисной системе мониторинга, работающей на нескольких серверах и с несколькими расчетными модулями с различной функциональностью, требующих контроль версий вспомогательных библиотек.

Для контейнеризации и развертывания модуля расчета смещений использовался специально настроенный и собранный образ Docker Image. Это неизменяемый файл (образ), из которого разворачиваются контейнеры. Программный код и зависимости (библиотеки) упаковываются в образ, из которого в момент запуска создается контейнер. Для сборки образа используется Dockerfile. Dockerfile – это набор инструкций (команд) для сборки образа [2]. В нем указываются все программы, зависимости и другие образы, например, операционной системы, которые нужны для разворачивания образа (рис. 1).

Таким образом модификация разработанных схем пре- и пост-обработки радарных снимков может осуществляться в направлении распараллеливания ресурсоемких этапов процедур преобразований с независимыми входными/выходными данными. В представленном подходе настраиваемые модули представлены в виде микросистем-контейнеров с внутренними механизмами взаимодействия между алгоритмами пре- и пост-обработки данных и возможностью их объединения в единый сценарий запуска и расчета для формирования конечного решения (смещений поверхности). При этом оригинальность данного подхода заключается в том, что внутренним алгоритмам контейнера доступны внешние ресурсы массово-параллельной технологии исполнения заданий.

В работе контейнер показан как управляемый сервис, построенный на основе микроядра задаваемой операционной системы, с поддержкой мультизадачности процессов-идентификаторов и сетевых протоколов. При этом радарные данные фрагментировались и ассоциирова-

лись с соответствующим идентификатором контейнера. Таким образом, независимость данных и контейнеров дала возможность организации сетевых параллельных вычислений над временным рядом радарных снимков.

```
FROM ubuntu:18.04

# Install dependencies
RUN apt-get update -y
RUN apt-get install -y csh default-jre libgfortran3 libgfortran5

# Copy files from snap docker image
RUN mkdir /usr/local/snap
COPY --from=ogidog/snap:latest /usr/local/snap /usr/local/snap
RUN chmod -R 777 /usr/local/snap
RUN mkdir /root/.snap
COPY --from=ogidog/snap:latest /root/.snap /root/.snap

# Create shared dirs
RUN mkdir /mnt/satimg
RUN mkdir -p /mnt/monitor-radar

# Install monitor-radar-core
RUN mkdir -p /opt/monitor-radar-core/libs
COPY ../docker/monitor-radar-core/libs /opt/monitor-radar-core/libs

# Install snaphu
RUN mkdir -p /opt/snaphu
COPY ../docker/monitor-radar-core/snaphu /opt/snaphu

ENV PATH="/usr/local/bin:/usr/bin:/usr/local/sbin:/usr/sbin:/opt/snaphu/bin:${PATH}"
```

Рис. 1. Пример Docker-файла модуля расчета смещений.

Обработка и результаты. Разрабатываемый программный комплекс на основе контейнерной обработки радарных данных позволяет в значительной степени автоматизировать процесс расчета смещений земной поверхности. На входе от пользователя требуется указать только место расположение папки с исходными заархивированными снимками в формате ZIP и задать координаты района интереса в файле конфигурации (рис. 2).

```
{
  "label": "Subset",
  "name": "subset",
  "description": "Create a spatial and/or spectral subset of a data product.",
  "parameters": {
    "geoRegion": {
      "index": 0,
      "name": "geoRegion",
      "label": "Specify a geographic region on the map",
      "type": "inputTypes.text",
      "value": "86.1395 54.2788,86.1829 54.2770,86.1853 54.2992,86.1419 54.3008,86.1395 54.2788",
      "defaultvalue": ""
    }
  }
}
```

Рис. 2 Пример файла конфигурации для вырезки района интереса.

На начальном этапе в отдельном docker-контейнере производится автоматическая загрузка вспомогательных файлов для расчета – файлов орбит для каждого радарного изображения и цифровой модели рельефа. Затем производится вырезка полигона района интереса по заданным координатам. Полученные участки проходят процедуры корегистрации, расчета интерферограммы, развертки фазы и фильтрации. Таким образом мы получаем массив готовых предобработанных данных. Эти результаты далее обрабатываются в отдельном контейнере методом SBaS.

В результате была построена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (рис. 3). Карта содержит 58 251 точку, каждая из которых имеет набор атрибутов, таких

как географические координаты, средние скорости смещений, дата, значение смещений на конкретную дату и другие. Когерентность точек не менее 0,4.

Итоговые средние скорости вертикальных смещений составили от -30 мм/год (синие точки, обозначающие опускание земной поверхности) до 50 мм/год (красные точки, обозначающие поднятия). Отрицательные смещения (просадки) в основном регистрируются непосредственно на бортах карьера, где активно ведется добыча угля, а положительные смещения (поднятия) на территориях отвалов, где складывается горная порода.

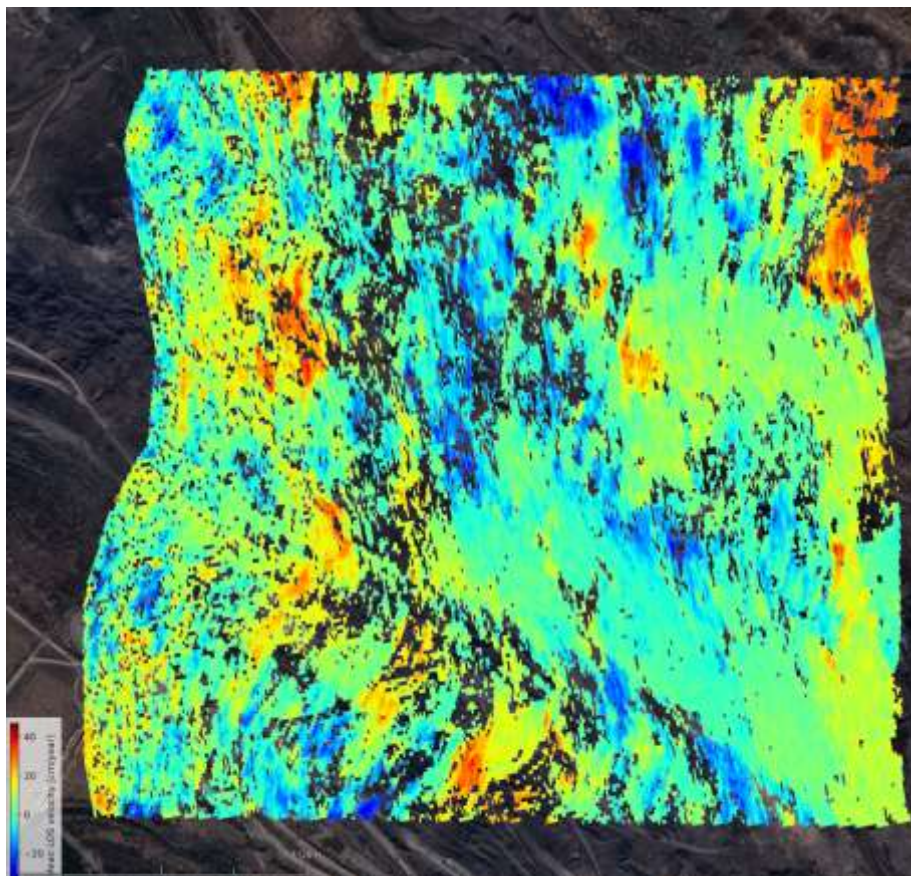


Рис. 3. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений. Разрез «Бачатский», май – сентябрь 2022 года.

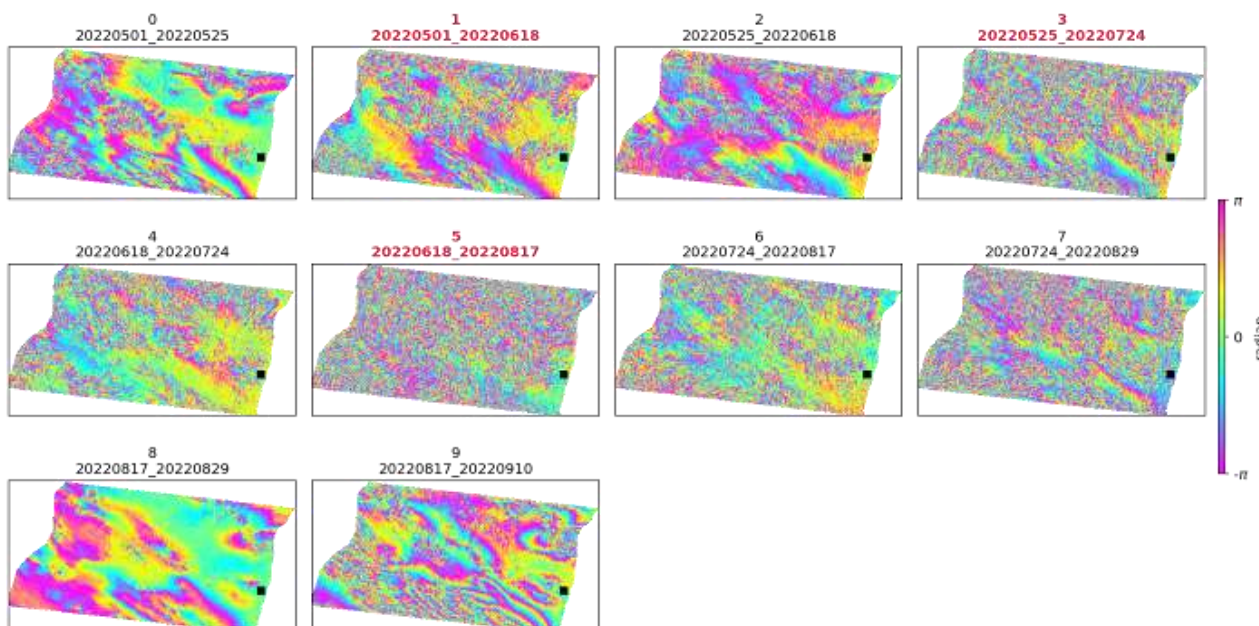


Рис. 4. Временная серия интерферограмм.

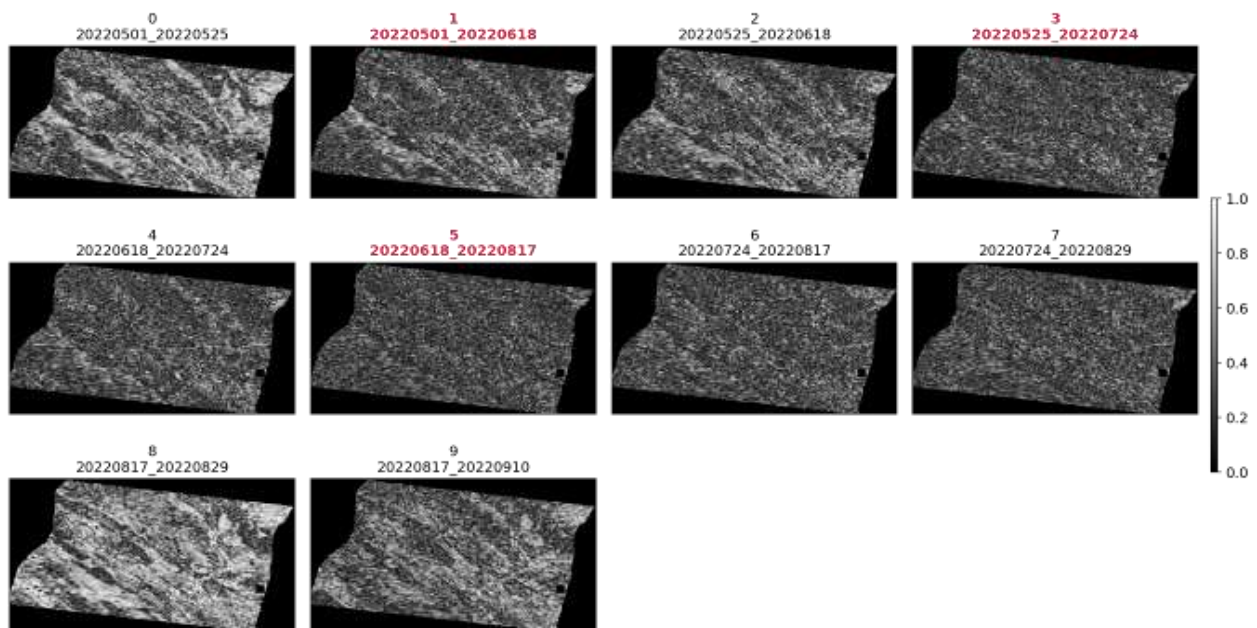


Рис. 5. Временная серия карт когерентности.

Помимо карты вертикальных смещений программный комплекс предоставляет в графическом виде временные серии промежуточных результатов расчетов, например, интерферограмм (рис. 4), карт когерентности (рис. 5) и др.

Кроме того, карту средних скоростей вертикальных смещений опционально можно преобразовать в векторный файл в формате SHP.

Заключение. Таким образом, контейнерная обработка радарных данных позволяет значительно автоматизировать процесс расчета вертикальных смещений. Пользователю не требуется проводить дополнительные манипуляции с исходными данными, например, распаковка ZIP-архивов со снимками, конвертация их в свой собственный формат программных комплексов (как в некотором коммерческом ПО), ручной поиск и загрузка файлов орбит и цифровых моделей рельефа.

В дальнейшем программный комплекс на основе docker-контейнеров может стать основой для разработки системы мониторинга различного рода опасных явлений, например, оползней.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Пермь. 2012. 146 с.
- [2] Overview. Docker Documentation <https://docs.docker.com/get-started> (дата обращения 1.06.2023)

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ГРАФИКОВ ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ОЦЕНКЕ МАГНИТУД И ИЗМЕНЕНИЕМ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ КАТАЛОГА ВО ВРЕМЕНИ

Миронов В.А.¹, Перетокин С.А.¹, Симонов К.В.²

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Исследование посвящено разработке алгоритмов построения статистически обоснованных графиков повторяемости землетрясений, необходимых для параметризации моделей возникновения очагов землетрясений при вероятностном анализе сейсмической опасности. В основе алгоритмов заложено моделирование набора каталогов землетрясений на основании исходного со случайной поправкой к магнитуде. Итоговый график повторяемости землетрясений строится на основе совокупного анализа графиков накопления по всем модельным каталогам с фиксированным шагом по магнитуде.

Ключевые слова: повторяемость землетрясений, график накопления землетрясений во времени, вероятностный анализ сейсмической опасности.

AN APPROACH TO PLOTTING EARTHQUAKE OCCURRENCE RATE GRAPHS TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTIES IN MAGNITUDE ESTIMATION AND CHANGES IN THE REPRESENTATION OF THE CATALOG OVER TIME

Mironov V.A.¹, Peretokin S.A.¹, Simonov K.V.²

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The study is devoted to the development of algorithms for constructing statistically based earthquake occurrence rate graphs, which are necessary for parameterizing models of the earthquake occurrence sources in the probabilistic seismic hazard analysis. The algorithms are based on modeling a set of earthquake catalogs based on the original one with a random correction to magnitude. The final earthquake occurrence rate graph is built on the basis of a total analysis of time-completeness graphs for all model catalogs with a fixed magnitude step.

Keywords: earthquake occurrence rate, time-completeness graph of earthquake, probabilistic seismic hazard analysis.

Введение. Оценка сейсмической опасности – это неотъемлемая часть комплекса инженерно-геологических изысканий при проектировании и строительстве ответственных объектов в сейсмически активных регионах. Как и в большинстве стран мира, в Российской Федерации принят вероятностный подход к оценке сейсмической опасности.

В основу вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) положены две взаимосвязанные сейсмогеодинамические модели – модель зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и модель затухания сейсмического эффекта (МСЭ). МСЭ описывает зависимость уровня колебаний грунта на исследуемой площадке от магнитуды землетрясения, расстояния до источника, локальных условий площадки, механизма очага и др.

Задача модели зон ВОЗ состоит в том, чтобы адекватно описать распределение землетрясений в пространстве и времени. Построение модели и ее параметризация выполняется на основании всех имеющихся данных: каталоги землетрясений, базы данных разломов, палеосейсмические данные и т.д. Элементы модели зон ВОЗ (источники землетрясений) задаются как площади, разломы, точки и др. Площадной источник зачастую используется, когда не представляется возможным идентифицировать определенный разлом. Помимо геометрии каждому элементу модели зон ВОЗ присваиваются значения максимально возможных магнитуд.

Построение статистически обоснованных графиков повторяемости землетрясений для сейсмически активных регионов является важной задачей при построении модели зон ВОЗ. График повторяемости представляет собой среднегодовую частоту возникновения землетрясений для каждой рассматриваемой магнитуды, поэтому он непосредственно влияет на итоговую оценку сейсмической опасности исследуемых территорий.

В международной практике процесс построения региональных графиков повторяемости складывается из следующих этапов.

1. Получение единого каталога сейсмических событий посредством регистрации землетрясений разными сетями сейсмостанций в течении длительного периода времени.
2. Проведение декластеризации единого каталога [1]. Использование различных методов для удаления форшоков и афтершоков основных сейсмических событий [2].
3. Анализ чувствительности. Выполнение анализа состава единого каталога землетрясений после процесса декластеризации, оценка влияния и применимости используемых методов [1].
4. Построение регионального графика повторяемости и определение в нем минимальной представительной магнитуды посредством комплекса методов для дальнего расчета ВАСО [3].

Для тех случаев, когда в едином каталоге землетрясений имеется хорошее представительство, как по количеству землетрясений, так и по всему интервалу времени наблюдения, задача построения региональных графиков повторяемости носит относительно тривиальный характер. В таком случае, графики накопления землетрясений для отдельных рассматриваемых интервалов магнитуд – графики зависимости общего (накопленного) числа землетрясений этих магнитуд от времени регистрации будут иметь относительно линейную зависимость. Однако, когда представительство числа землетрясений в регионе недостаточное или графики накопления носят нелинейный характер для всего интервала времени регистрации, возникает задача статистически обосновать частоту повторяемости для каждого рассматриваемого интервала магнитуд.

В работе представлено решение данной задачи путем моделирования набора каталогов сейсмических событий на основании исходного каталога. При синтезе каждого нового каталога, для каждого землетрясения по нормальному распределению разыгрывается случайная поправка к магнитуде, где в качестве σ принимается погрешность в определении данной магнитуды, согласно исходному каталогу. Изменчивость представительности каталога во времени определяется на основе построения графиков накопления по каждому модельному каталогу. Итоговый график повторяемости землетрясений строится на основе совокупного анализа графиков накопления по всем модельным каталогам, с фиксированным шагом по магнитуде. Разработанные алгоритмы реализованы в среде MATLAB.

Исходные данные и алгоритмы расчета. В качестве объекта исследования выбрана одна из зон региона 3.1.1 согласно сейсмогеодинамической регионализации Северной Евразии для территории РФ, актуализированной в рамках работ по созданию макетов карт ОСР-2016 [4]. Для построения графиков повторяемости использовался специализированный каталог землетрясений Северной Евразии без афтершоков, дополненный информацией из базы данных «Землетрясения России» Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) [5] и региональными каталогами. На рисунке 1 представлены исходные графики накопления землетрясений для исследуемой зоны (субрегиона), объединенные по магнитуде с интервалом 0,5.

Из рисунка 1 видно, что для всех магнитуд наблюдаются разные наклоны графиков в различные интервалы времени. Это связано, например, как с использованием со временем более точного оборудования (возможность регистрации землетрясений малых магнитуд), так и с приостановкой и восстановлением некоторых сейсмогеодинамических полигонов. Данный набор землетрясений наглядно отражает сложности при построении графика повторяемости.

Для решения данной задачи реализован следующий алгоритм. Вначале выполняется моделирование набора новых каталогов землетрясений. Моделирование каждого каталога происходит следующим образом. К каждому землетрясению исходного каталога добавляется своя случайная поправка, имеющая нормальное распределение с нулевым средним и стандартным отклонением, равным погрешности определения магнитуды в исходном каталоге. Поправка ограничивается одним стандартным отклонением. После, магнитуды в модельных каталогах округляются до 0,5.

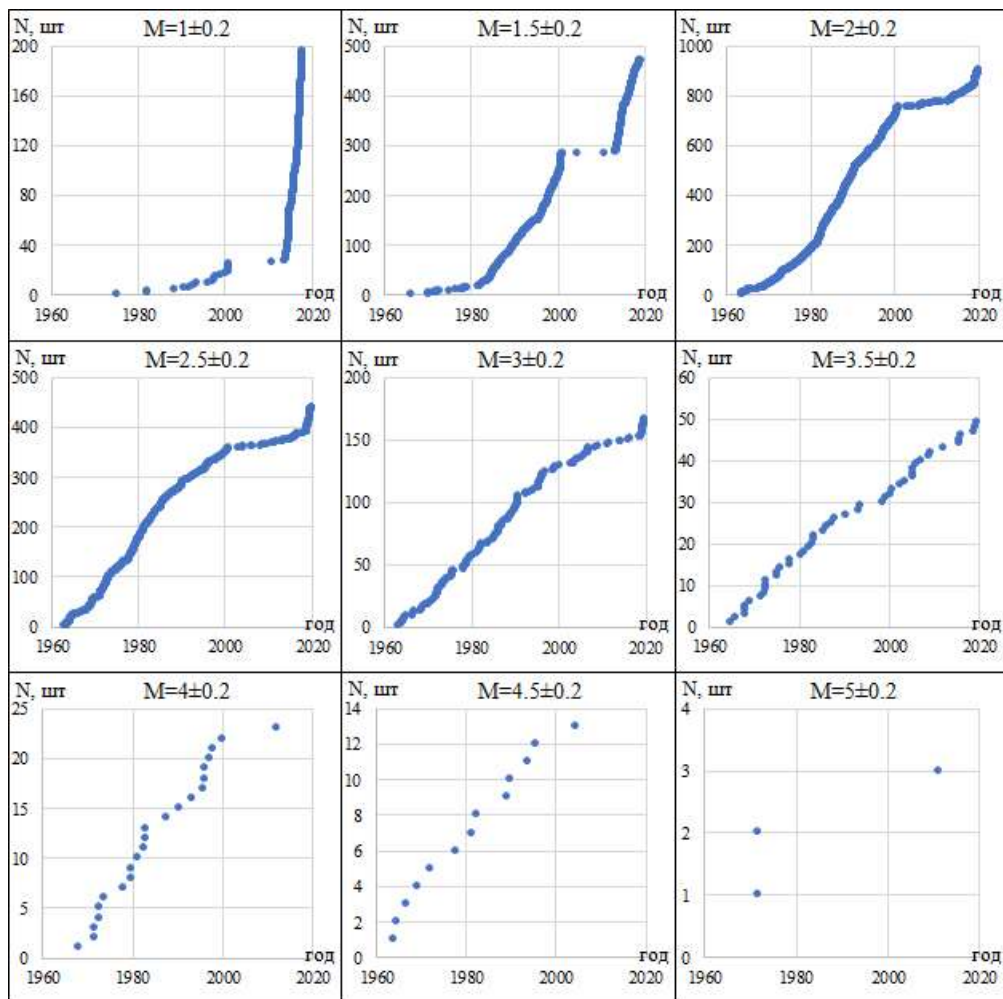


Рис. 1. Графики накопления землетрясений для исследуемой зоны.

Для рассматриваемой магнитуды, для каждого модельного каталога, выполняется процедура нахождения стандартного отклонения остатков (σ) от прямой, построенной по МНК по всем точкам от i -ой до j -ой, нахождение угла наклона (tga) этой прямой и вычисление разницы по времени (ΔT) между i -ой и j -ой точками. При этом в начале процедуры каждого модельного каталога $i = 1$, а $j = i + n$, где n – задаваемый параметр, определяющий минимальное расстояние между i -ой и j -ой точками. Аналогичные вычисления продолжаются для точек i и $j + 1$, $j + 2$ и так до последней точки. После окончания точек процедура повторяется, но уже начальная точка становится $i + 1$, и так до тех пор, пока не будут перебраны все варианты прямых. Таким образом, мы получаем массив данных, включающий в себя значения σ , tga , ΔT для каждой реализации процедуры расчета.

Для исключения нехарактерных значений tga , для рассматриваемой магнитуды в дальнейшем рассмотрение идут только те значения, которые попадают в интервал $[tga/3 \ tga*3]$ по всему времени каждого модельного каталога.

Далее вычисляются отношения между значениями ΔT и σ по каждой реализации, которые соответствуют своему значению tga . Таким образом, рассчитывается параметр, который тем больше, чем длиннее расстояние между крайними точками рассчитанных прямых и

меньше стандартное отклонение остатков от этой прямой. После, с заданным шагом по tga (от минимального до максимального значения) выполняется суммирование этих отношений, если они попадают в окрестность перебираемого значения tga .

В заключении, определяется значение tga , т.е. повторяемость землетрясений в год для рассматриваемой магнитуды, соответствующая максимальному значению после суммирования отношений ΔT и σ . Данный процесс выполняется для каждой рассматриваемой магнитуды, округленной до 0,5, после чего выполняется построение графика повторяемости землетрясений исследуемой территории.

Результаты исследования. На рисунке 2 представлен график сумм отношений ΔT и σ по перебираемым значениям tga для рассматриваемой магнитуды $M_s = 3 \pm 0,2$ и соответствующее максимальной сумме значение повторяемости в год.

В расчете моделировалось 100 новых каталогов землетрясений, значение n – задаваемый параметр, взят как 4. Однако, при большом наборе сейсмических событий, как например для магнитуды 2,5 или 2, n рекомендуется брать как десятую часть от общего числа этих событий, а число модельных каталогов уменьшать. Для случая малого количества событий, рекомендуется n брать равной 2, а также увеличивать число модельных каталогов до нескольких тысяч. Шаг по перебору значений tga задавался как 0,01, окрестность соответственно составляла половину шага.

На рисунке 3 представлен график повторяемости землетрясений исследуемой территории, где по оси абсцисс магнитуда, а по оси ординат десятичный логарифм повторяемости землетрясений в год. Также на графике представлено уравнение повторяемости для интервала магнитуд от 2 до 5. Из рисунка 3 видно, что магнитуды 1 и 1,5 не являются представительными, поскольку не укладываются в общий закон повторяемости землетрясений.

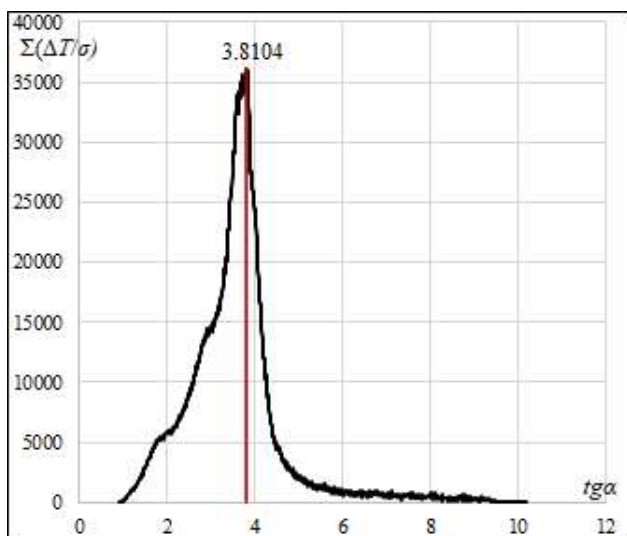


Рис. 2. График сумм отношений ΔT и σ относительно перебираемых значений повторяемости землетрясений в год tga для магнитуды 3.

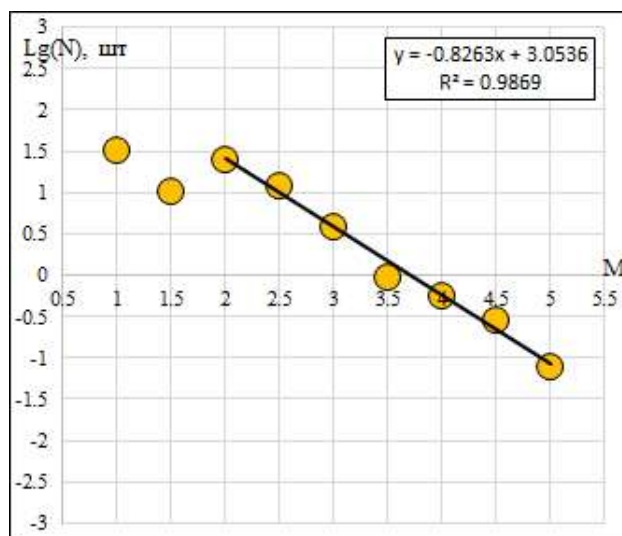


Рис. 3. График повторяемости землетрясений исследуемой территории.

Заключение. В ходе проделанной работы были разработаны и апробированы алгоритмы построения графиков повторяемости землетрясений с учетом неопределенностей в оценке магнитуд и изменением представительности регионального каталога землетрясений во времени.

Полученный закон повторяемости землетрясений для исследуемой территории (рисунок 3), а также его некоторые вариации (с целью учета эпистемической неопределенности сейсмического режима), можно использовать в рамках ВАСО для оценки сейсмической опасности. В целом, эксперименты по изменению задаваемых параметров показали устойчивость полученных результатов. В данном исследовании при разумных вариациях задаваемых параметров по числу модельных каталогов и минимальному расстоянию между i -ой и j -ой точками

изменения составляли в худшем случае порядка 0,02 повторяемости в год. Для увеличения точности необходимо, соответственно, уменьшить шаг по перебираемым значениям tga . Выбором оптимальной комбинации из набора получаемых повторяемостей в год по каждой магнитуде служит величина достоверности аппроксимации графиков повторяемости (R^2 на рисунке 3).

Используемые алгоритмы разрабатывались с целью минимизации экспертного мнения и статистического обоснования относительно вопроса построения региональных графиков повторяемости землетрясений при малопредставительном и неоднозначном исходном каталоге сейсмических событий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Galina N.A., Bykova V.V., Vakarchuk R.N. et al. Effect of earthquake catalog declustering on seismic hazard assessment // *Seismic Instruments*. 2019. V. 55 (1). pp. 59-69.
- [2] Reasenber P. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982 // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1985. V. 90 (B7). pp. 5479-5495.
- [3] Woessner J., Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005. V. 95(2). pp. 684-698.
- [4] Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // *Инженерные Изыскания*. 2016. № 7. С. 49-123.
- [5] База данных землетрясений России. <http://eqru.gsras.ru> (дата обращения 21.06.2023).

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ АЭРОМАГНИТНОЙ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Морозов Ю.В., Мурасев А.А., Спектор А.А.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В настоящей работе рассмотрен итерационный метод калибровки векторного магнитометра на основе решения системы уравнений. Показано, что значительное увеличение расстройке калибровочных параметров приводит к незначительному увеличению количества итераций. Также параметры векторного магнитометра были оценены с помощью статистического подхода. Исследовано, как влияет неточность задания шага квантования аналого-цифрового преобразователя на калибровку векторного магнитометра. Показано, что небольшое изменение чувствительности аналого-цифрового преобразователя приводит к значительному увеличению погрешности измерений. Было проведено экспериментальное исследование калибровки векторного магнитометра с использованием реальных сигналов. *Ключевые слова: векторный магнитометр, калибровка, невязка, система линейных уравнений, чувствительность.*

DEVELOPMENT OF METHODS AND ALGORITHMS OF THE PRELIMINARY ANALYSIS OF DATA OF AEROMAGNETIC PROSPECTING OF MINERALS

Morozov Yu.V., Murasev A.A., Spektor A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The paper considers an iterative method of a vector magnetometer calibration based on solution of a system of equations. It has been shown, that noticeable increase of calibration parameters mismatch leads to small increase of number of iterations. The vector magnetometer parameters were estimated by a statistical approach. It was studied how the quantization step inaccuracy effects on vector magnetometer. Small sensitivity change leads to measurement error increase. The experimental research performed means using of real signals.

Keywords: vector magnetometer, calibration, misalignment, system of linear equations, sensitivity.

Введение. Магнитометрические измерения изначально применялись для решения задач навигации. Первые компасы появились несколько тысячелетий назад в Китае [1]. В настоящее время имеет место тенденция миниатюризации и снижения стоимости магнитометров. Однако показания недорогих магнитометров искажены погрешностями, в связи с этим требуется выполнение процедуры калибровки. Главными ограничениями данного метода являются требование получения информации извне, а также необходимость горизонтального выравнивания платформы, на которой установлен магнитометр.

Высокую точность ориентации магнитометра в пространстве обеспечивают немагнитные платформы, сделанные из алюминия, латуни, пластика и стекла, управляемые с помощью пьезоэлектрических двигателей и оптических энкодеров.

В основе алгоритма калибровки – измерение модуля вектора индукции магнитного поля, приведенного к модулю вектора индукции магнитного поля Земли, в среде без возмущений. Использование известного модуля вектора магнитной индукции требует перехода от линейного матричного уравнения к системе нелинейных алгебраических уравнений, где каждое уравнение соответствует измеренному вектору магнитной индукции. Решение этой системы уравнений позволяет найти калибровочные параметры магнитометра. Существуют различные варианты решения данной нелинейной системы уравнений.

Анализ методов калибровки векторного магнитометра выполнен в [2]. Принципы моделирования векторного магнитометра рассмотрены в [3].

Получение высокоточных измерений магнитного поля при помощи векторных магнитометров представляет собой многоплановую задачу, требующую учета различных факторов.

Задачей измерений является получение оценок магнитных полей с ошибками сенсоров трехкомпонентного датчика порядка 0,1 нТл при значениях измеряемых величин порядка $(4...6) \cdot 10^4$ нТл, так что относительная ошибка составляет $(0,17...0,25) \cdot 10^{-3} \%$. По имеющимся публикациям, применяемые технологии измерения позволяют достичь ошибок, которые на 1 – 2 порядка превышают желаемые значения.

Среди факторов, определяющих ошибки, в первую очередь рассматриваются технологические неточности изготовления векторных магнитометров, преодоление которых предполагает проведение т.н. калибровочных мероприятий, исследование и разработка которых является основной задачей настоящего проекта. Отметим, что в публикациях под калибровкой понимают расширенные функции, включающие в себя оценку параметров неидеальностей изготовления приборов, и использование полученных оценок для компенсации погрешностей, вызванных этими неидеальностями, в полученных при измерении данных [4-6].

Вторым фактором, оказывающим влияние на точность, являются внешние помехи. В большом числе случаев создаваемые внешними источниками магнитные поля образуют аддитивную добавку к измеренным значениям. Борьба с помехами является отдельной задачей, требующей изучения их свойств и разработки методов ослабления воздействия.

Третий фактор, на который часто обращают внимание, это влияние температуры, при которой функционирует измеритель. Отличие рабочей температуры от той, при которой производилась оценка неидеальностей, может приводить к существенному влиянию на качество измерений.

Основной задачей настоящей работы является изучение механизмов влияния технологических погрешностей на ошибки измерения, разработка методов получения оценок этих погрешностей и их компенсации в рабочих сигналах, регистрируемых при решении практических задач.

Статистический метод оценки параметров магнитометра. Изучение сигналов магнитометра FGM 75/3, записи которых были получены при проведении экспериментов в обсерватории, свидетельствует о присутствии некоррелированного шума со средним квадратичным значением порядка $(0,1...1)$ нТл. Наличие шума приводит к флюктуационным ошибкам при оценивании всех девяти параметров магнитометра (по три параметра смещения, чувствительности и неортогональности), образующих в совокупности вектор калибровочных параметров

$$\vec{A} = \|\lambda_1 = w_1, \lambda_2 = w_2, \lambda_3 = w_3, \lambda_4 = s_1, \lambda_5 = s_2, \lambda_6 = s_3, \lambda_7 = u_1, \lambda_8 = u_2, \lambda_9 = u_3\|',$$

состоящий из векторов $\vec{W} = \|w_1, w_2, w_3\|'$ – параметров смещения, $\vec{S} = \|s_1, s_2, s_3\|'$ – параметров чувствительности, $\vec{U} = \|u_1, u_2, u_3\|'$ – углов, характеризующих отклонение системы координат датчика от ортогональной.

Изложенный в [2] метод оценки параметров магнитометра не учитывал действия шума. Его основа состояла в решении системы алгебраических уравнений, количество которых определялось числом неизвестных параметров, и, соответственно, число необходимых первичных измерений также определялось числом параметров. Применение этого подхода к реальным измерениям показало, что влияние шума является значительным. Поэтому в данном разделе предложенный ранее метод дополняется статистическим подходом, имеющим смысл, если количество первичных измерений превышает число параметров. Очевидно, его эффективность будет тем выше, чем больше размер исходной выборки.

Из большого количества статистических методов (байесовские оценки с различными функциями потерь, оценки максимального правдоподобия, непараметрические оценки и др.) воспользуемся методом минимизации средней квадратичной невязки (МСКН), алгоритмическая реализация которого представляется наиболее простой.

Метод, рассмотренный в [2], дает высокую точность оценки калибровочных параметров магнитометра только при отсутствии шумов. Однако, при наличии шумов, при многократном повторении калибровочной процедуры оценки калибровочных параметров будут меняться. Таим образом, наличие шума является причиной ненулевых невязок

$$\varepsilon_i(\bar{\lambda}) = \psi(\bar{\lambda}, \bar{F}_i) - B_0^2, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

совокупность которых при проведении I измерений представляется в виде вектора

$$\bar{\varepsilon}(\bar{\lambda}) = \left\| \varepsilon_1(\bar{\lambda}), \varepsilon_2(\bar{\lambda}), \dots, \varepsilon_I(\bar{\lambda}) \right\|^t. \quad (2)$$

Критерий оптимальности минимум квадрата невязки имеет вид

$$E(\bar{\lambda}) = \sum_{i=1}^I \varepsilon_i^2(\bar{\lambda}) = \bar{\varepsilon}^t(\bar{\lambda}) \cdot \bar{\varepsilon}(\bar{\lambda}) = \min_{\bar{\lambda}}. \quad (3)$$

Оценка, отвечающая соотношению (2), находится из векторного уравнения:

$$\frac{dE(\bar{\lambda})}{d\bar{\lambda}} = \left\| \frac{dE(\bar{\lambda})}{d\lambda_1}, \frac{dE(\bar{\lambda})}{d\lambda_2}, \dots, \frac{dE(\bar{\lambda})}{d\lambda_9} \right\| = 0, \quad (4)$$

эквивалентного системе девяти нелинейных алгебраических уравнений. Применим, как и ранее, итерационный метод решения с использованием линеаризации функции $\psi(\cdot)$ по векторному аргументу $\bar{\lambda}$. На каждом k -м шаге итерационного процесса представляем функцию $\psi(\cdot)$ ее линейным приближением:

$$\psi(\bar{\lambda}, \bar{F}_i) = \psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) + \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*), \quad i = \overline{1, I} \quad (5)$$

в окрестности точки $\bar{\lambda}_{k-1}^*$, найденной на предыдущем $(k-1)$ -м шаге в результате решения системы линейных (линеаризованных) уравнений. В (5) введен вектор-строка частных производных

$$\bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) = \left\| \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_1}, \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_2}, \dots, \frac{d\psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i)}{d\lambda_9} \right\|, \quad i = \overline{1, I} \quad (6)$$

вычисляемых в точке $\bar{\lambda}_{k-1}^*$. Подставив (6) в (1), получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*) - b_{ik} = (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*)^t \bar{\Psi}'^t(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i) - b_{ik}, \\ b_{ik} &= B_0^2 - \psi(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_i), \quad \forall i, k. \end{aligned} \quad (7)$$

Введем далее матрицу, I строк которой образованы векторами (6):

$$\mathbf{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*) = \begin{pmatrix} \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_1) \\ \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_2) \\ \vdots \\ \bar{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*, \bar{F}_I) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Вектор невязок (1) с учетом (7) и (8) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}(\bar{\lambda}) &= \mathbf{\Psi}'(\bar{\lambda}_{k-1}^*) \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{k-1}^*) - \bar{b}_k, \\ \bar{b}_k &= \left\| b_{1k}, b_{2k}, \dots, b_{Ik} \right\|^t. \end{aligned} \quad (9)$$

Квадрат невязки (2) с использованием (9) нетрудно представить выражением

$$E(\bar{\lambda}) = (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_k^* - 1)^t \Psi'^t(\bar{\lambda}_k^* - 1) \Psi'(\bar{\lambda}_k^* - 1) (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_k^* - 1) - 2\bar{b}_k^t \Psi'(\bar{\lambda}_k^* - 1) (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_k^* - 1) + \bar{b}_k^t \bar{b}_k \quad (10)$$

Уравнение относительно $\bar{\lambda}$ получаем путем дифференцирования (10) и приравнивания производной к нулю

$$\frac{dE(\bar{\lambda})}{d\bar{\lambda}} = \bar{\lambda}^t \mathbf{A} - \bar{\lambda}_{k-1}^{*t} \mathbf{A} - \bar{b}_k^t \Psi'(\bar{\lambda}_k^* - 1) = 0$$

где введена матрица $\mathbf{A} = \Psi'^t(\bar{\lambda}_k^* - 1) \Psi'(\bar{\lambda}_k^* - 1)$ размера 9×9 элементов.

Отсюда оценка k -го шага определяется выражением:

$$\bar{\lambda}^t \equiv \bar{\lambda}_k^t = \bar{\lambda}_{k-1}^{*t} + \bar{b}_k^t \Psi'(\bar{\lambda}_k^* - 1) \mathbf{A}^{-1}. \quad (11)$$

Начальное приближение для итерационной процедуры (11), полученной на основе (1)-(10), при дальнейших исследованиях может быть выбрано в предположении об отсутствии калибровочных отклонений параметров от номинальных значений:

$$\bar{\lambda}_0^{*t} = \|0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0\|^t$$

Прекращение итерационного процесса происходит, когда относительная величина невязки становится меньше заданной малой величины $\mu_{\text{дон}}$:

$$\mu(\bar{\lambda}) = \frac{E(\bar{\lambda})}{I \cdot B_0^2} < \mu_{\text{дон}}.$$

Влияние неточности задания шага квантования АЦП на калибровку датчика методом МСКН. При обработке измерительных данных с помощью алгоритма МСКН, может возникать ситуация, при которой неизвестна (известна неточно) величина шага квантования сигналов в аналого-цифровом преобразователе. Введем следующие обозначения параметров датчика и преобразователя магнитометрических сигналов: k_1 – чувствительность датчика по каждой из координатных осей. Это паспортный параметр датчика, для используемого типа прибора $k_1 = 133 \text{ мкВ/нТл}$; k_2 – разрешение АЦП, определяющее приращение входного напряжения АЦП, при котором выходной сигнал получает приращение на 1 квант, $[k_2] = \text{мкВ/квант}$. Величина $k_0 = k_1/k_2$ характеризует общую чувствительность узла, состоящего из магнитометрического датчика и преобразователя полученного сигнала в цифровой код (аналого-цифрового преобразователя – АЦП), ее размерность $[k_0 = k_1/k_2] = \text{квант/нТл}$. С другой стороны, общая чувствительность узла выражается через технические характеристики рассматриваемого узла:

$$k_0 = B_{\text{ши}} / 2^m, \quad (12)$$

где $B_{\text{ши}}$ – ширина полной шкалы (диапазона измерений) датчика, m – разрядность АЦП.

На разных этапах работы возникали из-за влияния условий окружающей среды различные значения параметра k_2 , одно из них

$$k_2 = 1,12 \text{ мкВ/квант}. \quad (13)$$

Предварительно измерительные данные представляются в виде векторного цифрового сигнала с компонентами f_x^{KB} , f_y^{KB} , f_z^{KB} . В магнитометрический сигнал при цифровой обработке они преобразуются при помощи очевидных соотношений:

$$f_x^* = f_x^{KB} / k_0^*, \quad f_y^* = f_y^{KB} / k_0^*, \quad f_z^* = f_z^{KB} / k_0^*, \quad (14)$$

в которых $k_0^* = k_1 / k_2^*$ – шаговая чувствительность измерительного узла. При ее определении используется рабочее значение k_2^* , которое может отличаться от истинного значения k_2 этого параметра, реально реализованного в действующем устройстве при получении сигнала. Таким образом, мы сталкиваемся с ситуацией, когда в аппаратуре реализовано значение параметров k_2 и k , а при всех операциях последующей цифровой обработки используются параметры k_2^* и k_0^* , значения которых отличаются от аппаратных.

Возникает вопрос о том, как это может сказаться на оценке параметров датчика, и как это скажется на значениях модуля восстанавливаемого магнитного поля. Как показывает моделирование, отличия параметров k_2^* и k_0^* от k_2 и k_0 приводят к заметным погрешностям определения калибровочных параметров (таблица 1).

Табл. 1. Влияние неточности задания шага квантования АЦП на оценки параметров датчика.

k_0^* , нТл/ квант	k_2^* , мкВ/ квант	$\delta\lambda_{\max} \text{sign}(\delta\lambda_{\max})$, %
0,0101	1,35	-17
0,0095	1,26	-12
0,0089	1,19	-6
0,0083	1,11	1
0,0077	1,03	9
0,0072	0,95	17

Как видно из таблицы, изменение параметра k_2^* от 0,95 мкВ/квант до 1,35 мкВ/квант при истинном значении $k_2 = 1,12$ мкВ/квант приводит к значительным погрешностям оценок в пределах (-17...+17)%. Как показывает эксперимент, на значение модуля скорректированного вектора магнитной эти погрешности практический не влияют. Корректирующий алгоритм воспринимает наличие дополнительного возмущающего фактора как некоторое изменение корректируемых параметров. В результате это приводит к увеличению погрешностей оценок параметров, а сами полученные оценки по своему смыслу перестают быть оценками физических параметров чувствительности, смещения и неортогональности. В задаче измерения модуля вектора магнитной индукции, когда получение оценок параметров датчика является вспомогательной процедурой, описываемый механизм влияния АЦП особой роли не играет.

Экспериментальное исследование алгоритмов калибровки по реальным сигналам. В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований двух ранее рассмотренных алгоритмов калибровки векторного магнитометра.

Исследование алгоритмов проводилось по результатам экспериментов, проведенных на площадке комплексной магнитной ионосферной станции (КМИС) ИНГГ СО РАН [11]. Исследовался векторный магнитометр Sensys FGM3D/75. Параллельно записывались измерения

протонного магнитометра высокой точности. Датчики располагались на расстоянии ~15 метров. В таблице 2 приведены паспортные параметры, которые оцениваются при калибровке датчика.

Табл. 2. Паспортные параметры калибровки.

Неортогональность осей	< 0,5°
Смещение нуля	< ± 5 нТл

В эксперименте исследуемый датчик последовательно устанавливался в некоторое фиксированное положение, и сигнал записывался в течение одной минуты («статический» эксперимент).

На рисунке 1 приведен сигнал, соответствующий «статическому» эксперименту, в котором магнитометр поочередно устанавливался в 18 положениях (9 положений по азимуту и 2 – по углу места). Длительность записи для одного положения датчика ~1 мин. Записанные данные измеряются в квантах АЦП. Частота дискретизации – 7,8 кГц. Для дальнейшей работы с сигналами требуется перевести кванты в нТл.

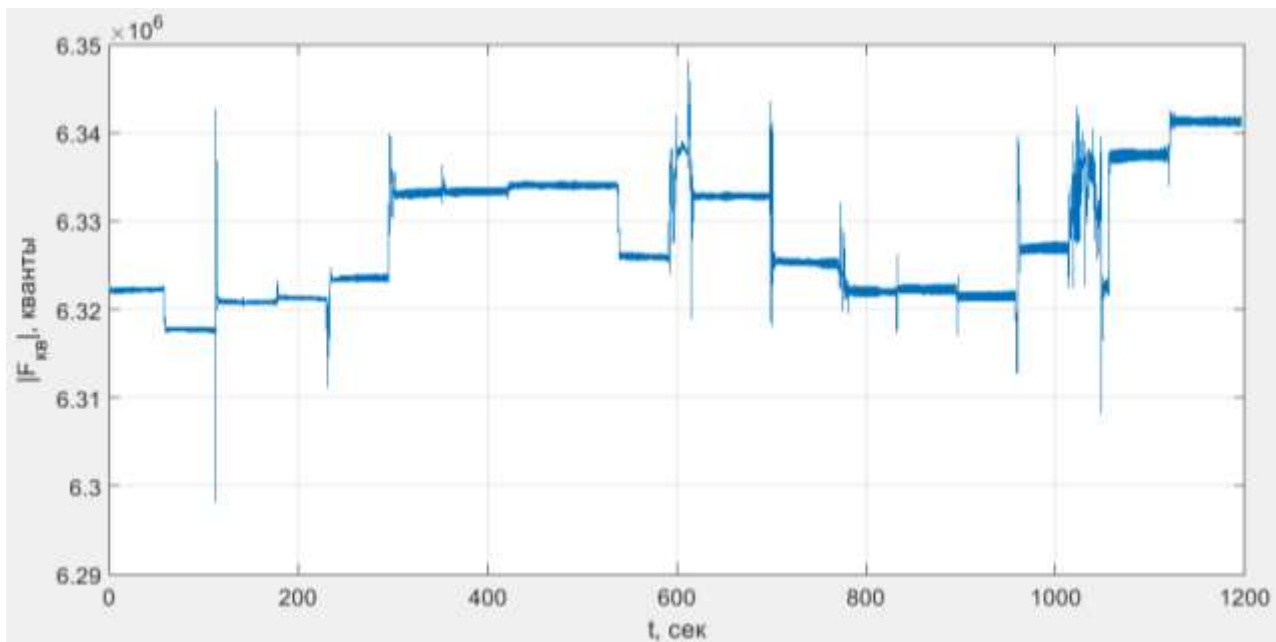


Рис. 1. Модуль магнитного поля (кванты) в «статическом эксперименте».

Перевод прочитанного сигнала в нТл выполняется по формуле

$$F_{нТл} = F_{кв} \cdot \frac{k_2}{k_1},$$

где $F_{нТл}$ – магнитное поле в нТл, $F_{кв}$ – магнитное поле в квантах, k_2 – цена кванта в мкВ,

определяемая схемой записывающего устройства (АЦП, усилители и т.д.), $k_1 = 133 \frac{мкВ}{нТл}$ –

чувствительность магнитометра по паспорту. Здесь k_2 является неизвестным параметром.

Для его оценки используется данные с протонного магнитометра (модуль магнитного поля – 60010 нТл). Цена кванта k_2 подбирается таким образом, чтобы среднее значение $F_{нТл}$ совпадало с показаниями протонного магнитометра. Сигнал протонного магнитометра, совпадающий по времени со «статическим» экспериментом, приведен на рисунке 2. В результате описанной процедуры было получено значение $k_2 = 1.261 мкВ$.

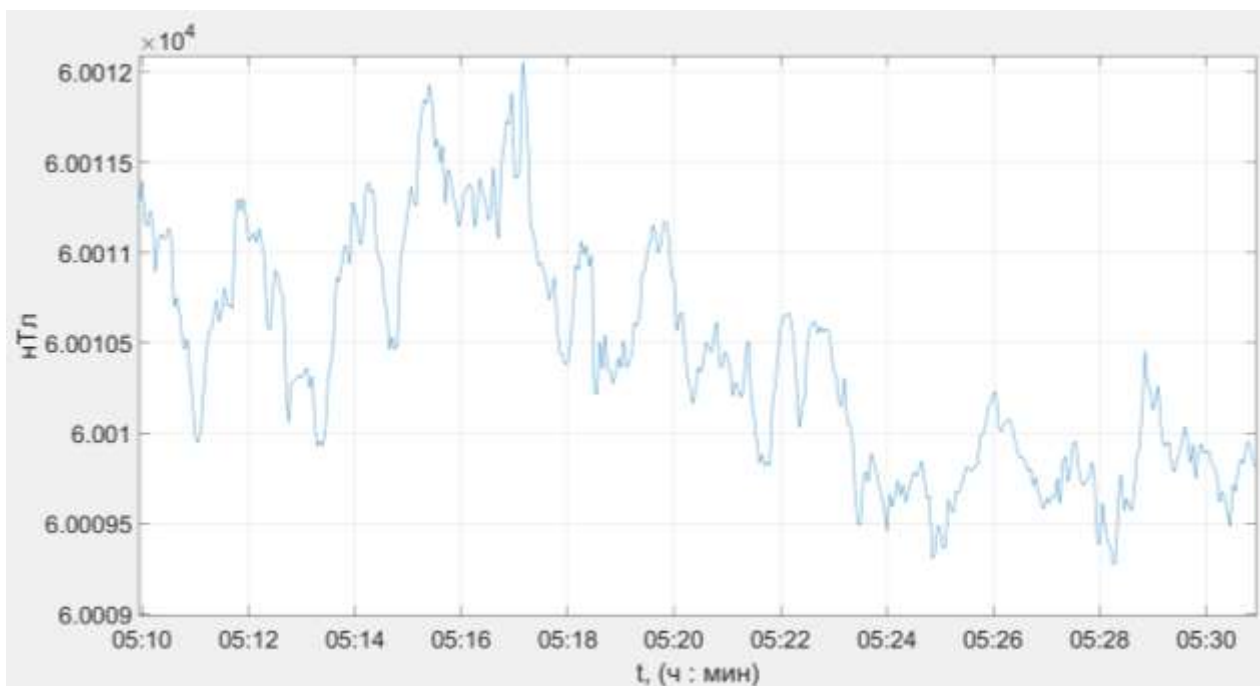


Рис. 2. Модуль магнитного поля протонного магнитометра для «статического» эксперимента.

При таком подходе к оценке k_2 , мы можем исказить читаемый сигнал, что приведет к его смещению по оси ординат. При этом ошибка при оценке k_2 будет влиять на оценку калибровочных параметров.

Заключение. Представлены результаты исследования проблемы калибровки векторного магнитометра. Предложен и получил развитие новый подход, который реализует идею минимизации невязки калибровочных уравнений. На этапе калибровки происходит статистическая оценка физических параметров векторного измерителя. Метод прошел успешную экспериментальную проверку, свидетельствующую о возможности их внедрения в практику.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Renaudin V., Afzal M.H., Lachapelle G.* Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain // *Journal of Sensors*. Vol. 2010. Article ID 967245. 10 p.
- [2] *Morozov Y. V., Murasev A.A.* Calibration of the Vector Magnetometer Based on Solution of the System of Linear Equations // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 December 2020. Novosibirsk: IEEE, 2020. P. 150-154.
- [3] *Морозов Ю.В., Мурасев А.А., Снектор А.А.* Калибровка векторного магнитометра с усреднением калибровочных параметров по комбинациям случайных угловых положений вектора магнитной индукции // *Современные проблемы телекоммуникаций: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 22-23 апр. 2021 г.* Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2021. С. 664-670.
- [4] *Panga H., Chen D., Pan M., Luo S., Zhang Q., Li J., Luo F.* Improvement of Magnetometer Calibration Using Levenberg-Marquardt Algorithm // *IEEE Trans.* 2014. № 9. P. 324-328.
- [5] *Alimi R., Fisher E., Ivry A., Shavit A., Weiss E.* Low Power In Situ AI Calibration of a Three-Axial Magnetic Sensor // *IEEE Transactions On Magnetics*. 2019. Vol. 55. № 7. Article Number: 4002407.
- [6] *Акимов И.О., Илюхин С.Н., Ивлев Н.А., Колосов Г.Е.* Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. № 5. С. 1-18.

WEB-СЕРВИС ДЛЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ

Пермяков Е.В.¹, Амикишиева Р.А.^{1,2}, Косторная А.А.¹

¹ ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
Сибирский центр, Новосибирск

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Разработанный в Сибирском центре НИЦ «Планета» web-сервис позволяет в единой информационной среде интегрировать наземную, спутниковую и прогностическую метеорологическую информацию с возможностью их комбинирования, получения точных значений по координатам и автоматической загрузкой актуальной информации. Сервис развернут на базе клиент-серверной архитектуры, где клиентская часть разработана на высокоуровневом Python-фреймворке Django, в качестве прокси-сервера и сервера обработки запросов используются Nginx и Gunicorn, база данных (БД), реализована на основе PostgreSQL.

Ключевые слова: web-сервис, метеорология, база данных, Python.

WEB-SERVICE FOR ANALYSIS OF METEOROLOGICAL INFORMATION

Permyakov Y.V.¹, Amikishieva R.A.^{1,2}, Kostornaya A.A.¹

¹ Siberian Center of the Federal State Budgetary Institution «Scientific Research Center of Space Hydrometeorology «Planeta», Novosibirsk

² The institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk

Web-service developed at the Siberian Center of the Research Center “Planeta”. The service allows integrating weather forecasts, surface weather observation and satellite data in a unified information environment, combine this information, get exact values by coordinates, and automatically download up-to-date information. The service is deployed based on a client-server architecture, the client part is developed on the high-level Django Python framework, Nginx and Gunicorn are used as a proxy server and request processing server, the database is implemented on the basis of PostgreSQL.

Keywords: web service, meteorology, database, Python.

Введение. Составление прогнозов погоды требует от специалиста-метеоролога анализа большого количества разрозненной информации в короткий промежуток времени. При этом данные с метеорологических и аэрологических станций, доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), спутниковые измерения, модельные прогнозы и пр. расположены в разных программных комплексах, ftp-серверах, имеют различный способ предоставления (таблицы, изображения, карты) и частоту обновления (от 5 минут до 12 часов). Организация удобного доступа к максимальному количеству информации в одном месте, с возможностью сопоставления различных наблюдений для полноценного анализа синоптической ситуации, становится важной задачей. Web-сервисы позволяют решить проблему доступа пользователей по сети интернет к большим объемам оперативных данных вне зависимости от местонахождения. На сегодняшний день создается немало ГИС-систем с целью предоставления результатов тематической обработки спутниковых и наземных данных, каждая из которых имеет свои преимущества [1, 2].

Для создания рабочего инструмента метеоролога необходимо понимать особенности оперативной работы и регламенты руководящих документов. Недостаточная скорость загрузки данных, малое количество информационных продуктов или слабо развитый функционал сервиса являются значительным препятствием на пути эффективной работы с большими объемами пространственно-распределенных данных. Средства визуализации и интерфейс также имеют важное значение для облегчения понимания физики атмосферных процессов.

Реализованный в Сибирском центре НИЦ «Планета» web-сервис обеспечивает получение спутниковых измерений видимого (ВИ), инфракрасного (ИК) спектральных диапазонов и спутниковых информационных продуктов в глобальном и региональном масштабах, включая районы Крайнего Севера, метеорологических измерений по высотам и на уровне подстилающей поверхности, а также прогностических данных в оперативном режиме.

Обработка, визуализация и интерпретация данных. На сегодняшний день в web-сервисе реализовано представление следующих данных:

- ИК канал 10,7 мкм прибора МСУ-ГС Российских космических аппаратов (КА) Арктика-М №1 и Электро-Л №3;
- ИК каналы (11 мкм) приборов VIIRS и AVHRR КА NOAA-20, Suomi-NPP, NOAA-18, NOAA-19, MetOp-B;
- параметры верхней границы облачности (ВГО) (температура (°C) и высота (км)) по данным КА Электро-Л №3 и Арктика-М №1;
- поле ветра по данным КА Арктика-М №1;
- параметры ВГО (типы облачности, температура (°C), высота (км), максимальная интенсивность осадков (мм/ч), водозапас (кг/м²)) по данным полярно-орбитальных КА NOAA-18, NOAA-19, MetOp-B [3];
- восстановленное поле температуры и геопотенциала на стандартных изобарических уровнях (1000, 850, 700 и 500 гПа) по данным полярно-орбитальных КА NOAA-18, NOAA-19, NOAA-20, MetOp-B, MetOp-C, Suomi-NPP;
- карты вероятных зон гроз и атмосферных осадков различной интенсивности по данным спутникового зондирования КА NOAA-18, NOAA-19, NOAA-20, MetOp-B, MetOp-C, Suomi-NPP;
- приземные, высотные и прогностические карты погоды (АТ-850, АТ-700, АТ-500, ОТ-500/1000, анализ приземный, макс. температура и осадки, кольцовки, прогноз приземный у поверхности земли и на высотах), предоставляемые Росгидрометом и ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

Частота обновления спутниковых продуктов составляет от 15 мин до 1,5 часов, карт погоды – каждые 3 часа в стандартные метеорологические сроки, начиная с 00 UTC. Архив данных включает в себя недельный объем, порядка 3,5 Гб.

Подготовка данных для представления в web-сервисе включает в себя формирование изображения и файла геопривязки, запись информации в базу данных (БД).

Исходные данные по всем спутниковым продуктам упакованы в файлы формата HDF5 с геопривязкой в проекции WGS-84 [4]. Интерактивное отображение карт с вариативным настраиваемым функционалом было реализовано с использованием средств языков Python, JavaScript, библиотеки Leaflet и другие. В таблице 1 схематично представлены этапы обработки данных для представления в web-сервисе.

Табл. 1. Этапы обработки данных.

Этап	Используемые библиотеки
Формирование карты в формате PNG с файлом геопривязки	Matplotlib, Scipy
Запись информации в базу данных	Pandas, Psycorg2
Визуализация спутниковых продуктов в web-сервисе по запросу пользователя	Styled Layer Control, Leaflet
Формирование запросов к базе данных по требованию пользователя	Databases, Fust Api, Ssqlalchemy, Pydantic

Для формирования карты в формате PNG производится пересчет координат из исходной проекции WGS-84 в полярную проекцию синоптических карт, которая выбрана в качестве базовой:

$$x = \tan\left(\left(90^\circ - lat\right) \cdot \frac{\pi}{360^\circ}\right) \cdot \sin\left(\left(lon - lon_{cent}\right) \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$y = -\tan\left(\left(90^\circ - lat\right) \cdot \frac{\pi}{360^\circ}\right) \cdot \cos\left(\left(lon - lon_{cent}\right) \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

где x, y – координаты в м, а $lon_{cent} = 84^\circ$ – центральная долгота. С использованием средств библиотек Matplotlib и Scipy формируется цветная карта и сохраняется в PNG-формате [5, 6].

Вспомогательный файл геопривязки хранит координаты двух углов карты – нижнего левого и верхнего правого.

В БД в проекции WGS-84 хранятся численные значения продуктов, которые позволяют пользователю отображать их в конкретной точке карты. Перед загрузкой в БД с использованием средств библиотеки Pandas массив значений интерполируется на регулярную сетку с шагом $0,2^{\circ}$ - $0,5^{\circ}$, в зависимости от продукта. Данные манипуляции оптимизируют занимаемую память и время отклика БД, упрощают функцию запроса значений в точке. В качестве системы управления БД (СУБД) был выбран PostgreSQL [7]. На рисунке 1 представлена структура БД.

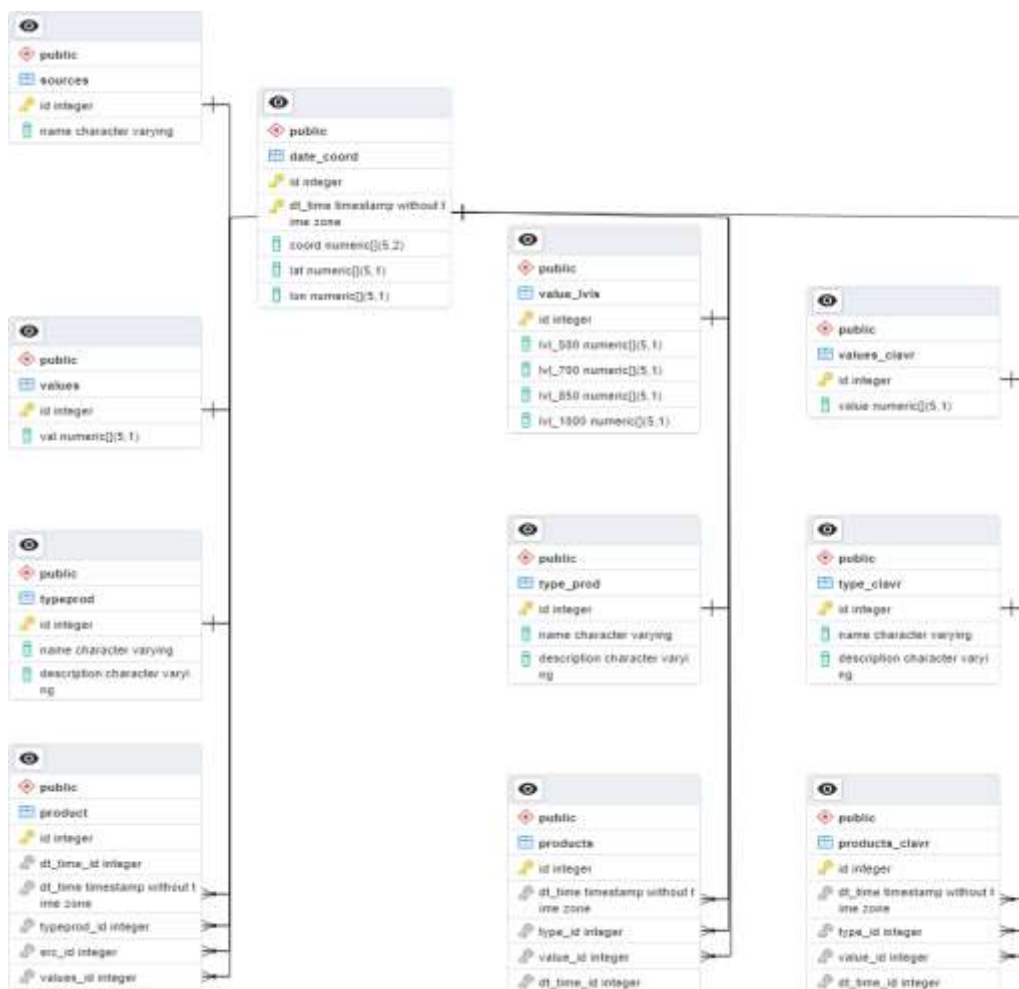


Рис.1. Структура БД.

Для каждого вновь поступающего спутникового продукта хранится информация о времени соответствующего спутникового снимка и координаты WGS-84 (табл. date_coord), название КА, если данные не являются результатом обработки стороннего программного комплекса (табл. sources), наименование и краткое описание продукта (табл. typeprod, type_prod, type_clavr) и непосредственно массивы значений (табл. values, values_lvls, values_clavr). В дальнейшем планируется оптимизация структуры БД в пользу универсализации представления данных и масштабируемости.

Модель и архитектура сервиса. Пользовательский интерфейс web-сервиса представляет собой две связанные интерактивные карты (рисунок 2), на каждой из которых имеется возможность индивидуально настраиваемого функционала для комплексного анализа – наложения одних слоев на другие, синхронизации окон, изменение внешнего вида карты (добавление рек, озер, населенных пунктов, градусной сетки, границ субъектов и пр). Шкала выбора даты предоставляет доступ к недельному доступному архиву. Имеется кнопка автообновления страницы, позволяющая без участия пользователя использовать систему в режиме реального времени.

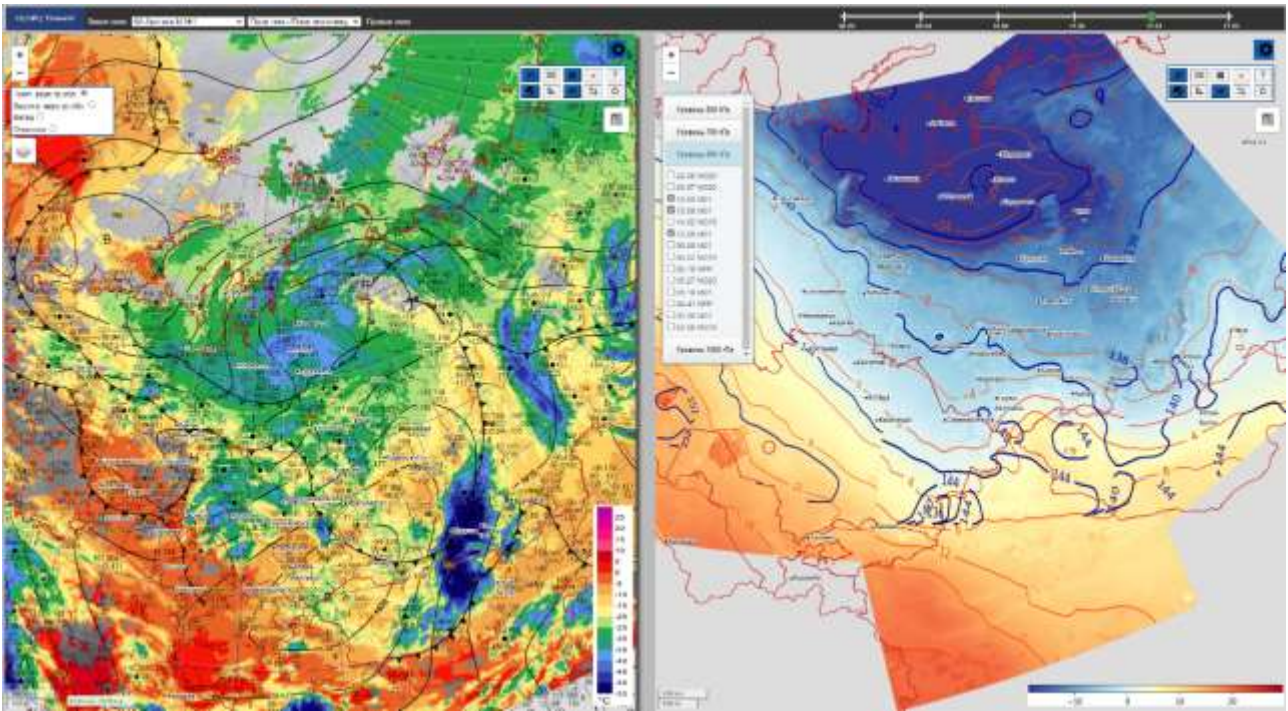


Рис. 2. Пример web-визуализации; слева – поле температуры ВГО по данным КА Арктика-М №1 (12.04.2023, 18:00 UTC), с наложенной на нее картой приземного анализа (18 UTC); справа – поля температуры и геопотенциала на уровне 850 гПа, восстановленные по измерениям КА Metop-B (12.04.2023, 13:29 – 16:50 UTC).

Серверная часть web-сервиса (рисунок 3) состоит из следующих элементов:

- Nginx, использующегося в качестве прокси-сервера, рабочие процессы которого способны обслуживать множество одновременных соединений [8];
- Gunicorn WSGI-сервера (Web-Server Gateway Interface), использующегося для маршрутизации запросов от web-сервера Nginx на web-приложение и являющимся сервером обработки полученных запросов [9];
- web-приложения, написанного на базе высокоуровневого Python web-фреймворка Django [10].

В корневом каталоге Django-проекта расположена ссылка на хранилище данных, что позволяет взаимодействовать с данными как со статичными файлами проекта. Хранилище данных содержит продукты в виде .png изображений и сформированных к ним, в зависимости от типа продукта и даты создания, .js файлам, содержащим координатные данные и адреса соответствующих .png изображений в виде объектов, готовых к использованию библиотекой Leaflet. Также здесь хранятся .js файлы, содержащие в себе GeoJSON объекты или обычные .js массивы, которые используются для формирования базовых карт-основ при загрузке клиентом web-приложения.

Клиентская часть АРМ представлена в виде web-браузера, реализующего пользовательский интерфейс и взаимодействие с серверной частью АРМ путем формирования запросов к web-серверу и БД, и работу с полученными от них ответами. Визуализация географически привязанных данных, а также рендеринг на стороне клиента осуществляется с помощью открытой библиотеки Leaflet (JavaScript). Leaflet поддерживает используемые слои GeoJSON и слои на основе стандарта Web Map Service (WMS).

При запросе клиентом численных значений, хранящихся в базе данных, формируется promise-запрос, содержащий: координаты, дату и время, название космического аппарата, тип продукции. Запрос поступает на Uvicorn, низкоуровневый ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface) сервер, а затем в API, написанном на языке Python, где формируется запрос в БД. Пользователю запрос вернет объект ответа сервера, содержащий значение запрашиваемых данных в конкретной точке на карте.

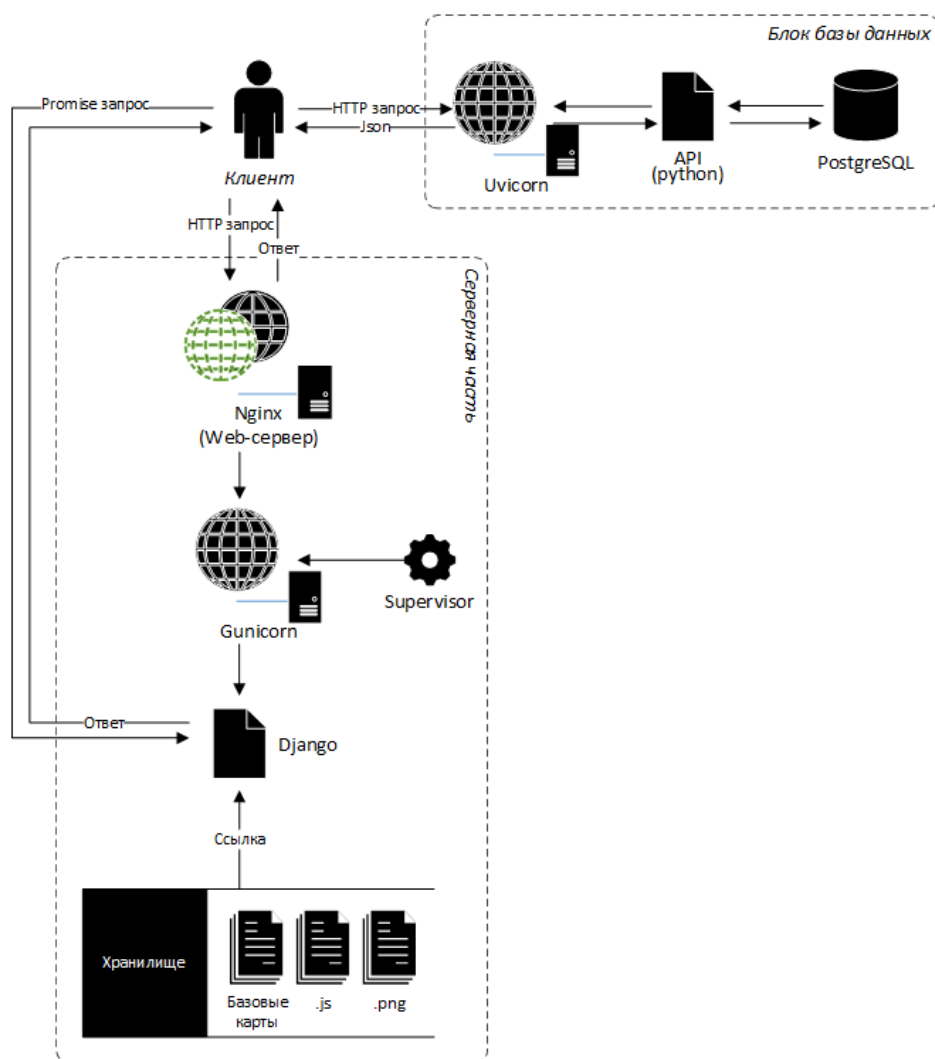


Рис. 3. Клиент-серверная архитектура.

Для реализации пользовательского интерфейса дополнительно был использован плагин StyledLayerControl, который находится в свободном доступе и распространяется по открытой лицензии, модифицирующий некоторые функции Leaflet, а также визуальное отображение некоторых элементов.

Заключение. Web-сервис позволяет организовать удобный доступ пользователей к спутниковой информационной продукции, метеорологической информации и экономит время при составлении прогнозов погоды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EUMETView. Eumetsat Data Services. <https://view.eumetsat.int> (дата обращения: 04.02.2023).
- [2] Метео-Сибирь. <http://ppi.rcpod.ru:85/MeteoSiber> (дата обращения: 04.02.2023).
- [3] World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. International Civil Aviation Organization. 2002. Second Edition. 138 p.
- [4] Косторная А.А., Сапрыкин Е.И., Захватов М.Г., Токарева Ю.В. Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. с. 16-24.
- [5] Matplotlib: Visualization with Python. <https://matplotlib.org> (дата обращения: 13.02.2023).
- [6] SciPy. <https://scipy.org> (дата обращения: 13.02.2023).
- [7] PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 13.02.2023).
- [8] Nginx. <https://nginx.org/ru> (дата обращения: 13.02.2023).
- [9] Gunicorn – Python WSGI HTTP Server for UNIX. <https://gunicorn.org> (дата обращения: 13.02.2023).
- [10] Django: The web framework for perfectionists with deadlines. <https://www.djangoproject.com> (дата обращения: 13.02.2023).

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МНОГОПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ В ИНТЕРЕСАХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Прошин А.А., Кобец Д.А.

Институт космических исследований РАН, Москва

Стремительное развитие систем спутникового мониторинга Земли в последние десятилетия привело к резкому увеличению объемов спутниковых данных и числа их типов. Это привело к необходимости эффективной организации обработки спутниковых данных, позволяющей выполнять сотни различных процедур обработки данных и контролировать их успешность. Для решения вышеперечисленных задач в рамках центра коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» была разработана система управления многопоточковой обработкой спутниковых данных на больших кластерах вычислительных узлов.

Ключевые слова: обработка спутниковых данных, управление задачами обработки, большие данные.

ORGANIZATION OF DISTRIBUTED MULTISTREAM PROCESSING OF SATELLITE DATA IN THE INTERESTS OF ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEMS

Proshin A.A., Kobets D.A.

Space Research Institute RAS, Moscow

The rapid development of satellite Earth monitoring systems in recent decades has led to a dramatic increase in the volume of satellite data and the number of data types. This has led to the need for efficient organization of satellite data processing, allowing hundreds of different data processing procedures and monitoring their success. In order to solve the above-mentioned tasks, a system of multithreaded satellite data processing management on large clusters of computing nodes was developed within the Center for Collective Use of CPC «IKI-Monitoring».

Keywords: satellite data processing, processing task management, big data.

Введение. Стремительное развитие систем спутникового мониторинга Земли в последние десятилетия привело к тому, что в настоящее время для получения различных информационных продуктов используются данные десятков различных приборов наблюдения. Это приводит к необходимости эффективной организации распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных, позволяющей выполнять сотни различных процедур обработки данных, контролировать их успешность и анализировать оптимальность используемых подходов. Для решения вышеперечисленных задач в рамках центра коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [1] была разработана система управления многопоточковой обработкой спутниковых данных на кластере windows серверов, который в настоящее время включает в себя около 200 компьютеров и виртуальных машин.

В статье рассматривается архитектура построения комплекса распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных, реализованного для решения задач мониторинга окружающей среды в рамках функционирования ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Также в ней приводятся краткие сведения о реализации основных его программных компонент, при этом более подробно описаны компоненты, непосредственно отвечающие за обработку данных и контроль ее выполнения. В заключение рассматриваются перспективы развития комплекса обработки.

Архитектура построения. Архитектура построения комплекса распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных, реализованного в ИКИ РАН, представлена на рисунке 1. В рамках нее на основе разработанных программных компонент обеспечиваются следующие основные уровни обработки данных:

- Уровень получения данных (закачка и распаковка приборных потоков данных из центров приема);
- Уровень архивации данных (архивы исходных и обработанных данных);
- Уровень подготовки данных (отслеживание полноты данных, формирование комплектов под каждый тип обработки, выдача их вычислительным узлам, архивация полученного результата);
- Уровень обработки данных (вычислительные узлы и их конфигурация);
- Уровень управления и контроля (управление обработкой, сбор статистических показателей о ходе процессов обработки и их анализ).

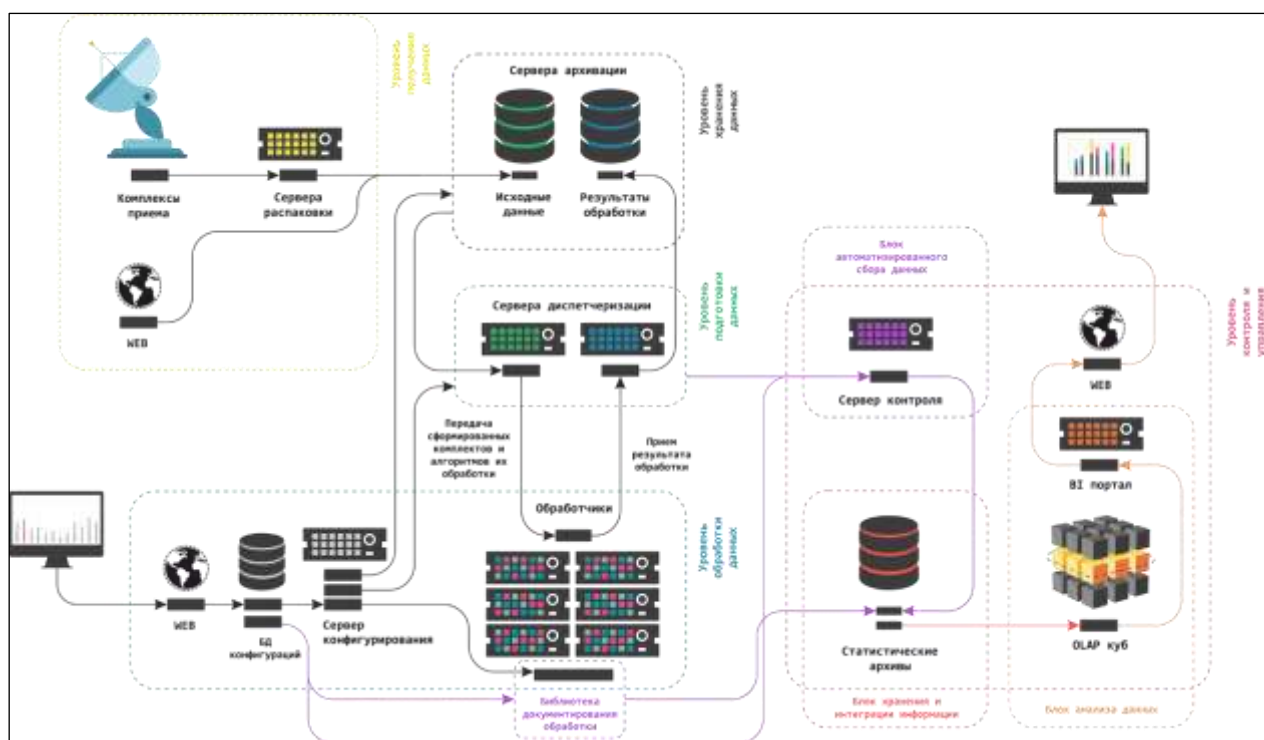


Рис. 1. Архитектура построения комплексов распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных.

Сервера, обеспечивающие получение данных, их архивацию, подготовку данных, диспетчеризацию процессов обработки и контроль за их выполнением реализованы под управлением операционных систем FreeBSD и Linux. Выполнение широкого спектра различных процедур обработки спутниковых данных реализовано на кластере серверов под управлением ОС Windows, на которых устанавливается стандартный комплект разработанного в ИКИ РАН программного обеспечения. Часть задач по обработке данных также решается на серверах под управлением ОС Unix, что обусловлено использованием стороннего программного обеспечения, реализованного на этой платформе.

Программное обеспечение UNIX-серверов реализовано в основном на языках программирования Perl, Python и C с использованием большого количества специально разработанных библиотечных модулей. Автоматический запуск программ на серверах производится по расписанию на основе стандартного Unix-сервиса cron. Частота запуска конкретных программ, естественно, зависит от их назначения. К примеру, пакетные процедуры архивации данных и актуализации состояния распределенных архивов запускаются каждую минуту, а программы для создания резервных копий баз данных – раз в сутки. На серверах используются СУБД MySQL, MariaDB, а также PostgreSQL.

Реализация программных компонент. Подсистема сбора данных предназначена для получения из различных источников, как исходных спутниковых данных, так и различных информационных продуктов, полученных на основе их обработки. Также в ее задачи входит

предварительная подготовка данных для архивации. Основным достоинством реализованной подсистемы является полная автоматизация процессов получения спутниковых данных.

Подсистема архивации данных отвечает за архивацию спутниковых данных и продуктов, полученных на основе их обработки, а также за предоставление доступа к метаданным и данным в архивах на уровне программных интерфейсов. Ключевой технологией при ее построении является разработанная в ИКИ РАН унифицированная технология ведения сверхбольших распределенных архивов разнородных спутниковых данных UNISAT.

Подсистема обработки данных предназначена для проведения потоковой обработки поступающих в архивы новых данных, а также для построения различных информационных продуктов, получаемых на основе обработки уже имеющихся в архивах данных. Программная реализация основана на использовании разработанной в ИКИ РАН технологии и соответствующего ей программного обеспечения, функционал которого постоянно расширяется путем добавления модулей, отвечающих за новые типы обработки. В 2016 году в ИКИ РАН была внедрена новая технология организации распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных [2], позволяющая более эффективно управлять работой многих десятков станций обработки спутниковых данных, входящих в состав программно-аппаратного комплекса ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Реализованная технология дает возможность отслеживать все этапы выполнения процессов обработки спутниковых данных, что позволило на качественно более высоком уровне реализовать контроль их выполнения и анализ эффективности их программной реализации. За последние годы вышеупомянутая технология неоднократно подвергалась существенной модернизации, что позволило существенно ее оптимизировать и эффективно поддерживать работу гораздо большего числа узлов обработки.

Программный пакет для обработки спутниковых данных, устанавливаемый на Windows-серверах, разработан на языках C и C++ с использованием свободно распространяемого программного обеспечения. При разработке программного обеспечения особое внимание уделялось его унификации, что позволяет использовать одни и те же программные компоненты на большом числе различных серверов, в том числе территориально удаленных и развернутых на разных платформах. Кроме того, на таких серверах установлена специальная программа, которая периодически обращается к управляющим Unix-серверам для получения очередного назначенного на выполнение задания по обработке спутниковых данных. После получения такого задания программа запускает его выполнение в многопоточном режиме (сессии), при этом количество потоков зависит как от свойств конкретной обработки, так и от имеющихся на сервере аппаратных ресурсов. В рамках каждого из потоков последовательно запускаются отдельные процессы, предназначенные для скачивания на сервер требуемых данных, проведения различных этапов их обработки и передачи результатов на сервер архивации. Для многих задач обработки спутниковых данных также активно используется и различное свободно распространяемое программное обеспечение, в частности, GDAL, GRAS GIS, Proj, Imager и др.

Наряду со станциями обработки, функционирующими под ОС Windows, в настоящее время активно используется также сервера обработки под управлением различных версий ОС UNIX, что позволяет использовать специализированные пакеты обработки, созданные для работы с данными различных спутниковых систем. В частности, для обработки данных прибора MODIS нами в том числе используется разработанный в NASA программный пакет SeaDAS (<https://seadas.gsfc.nasa.gov>), а для обработки данных спутников серии Sentinel - разработанный в ESA пакет приложений SNAP (Sentinel Application Platform, <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap>). Однако на текущий момент программная реализация технологии организации распределенной многопоточковой обработкой данных не в полной мере поддерживает управление такими серверами обработки.

Управление выполнением заданий по обработке спутниковых данных реализовано на основе использования специализированного веб-интерфейса, который позволяет сконфигурировать параметры выполнения каждого из заданий на кластере вычислительных узлов. К таким параметрам в частности относятся: приоритет задания, требуемая для его выполнения оперативная память и дисковое пространство, характерное время выполнения (от десятков минут

до суток), используемый для него сервер диспетчеризации и другие. Одной из наиболее актуальных задач системы управления является обеспечение приоритетного выполнения наиболее критичных заданий по обработке после их появления в очереди. Сложность решения этой задачи связана с тем, что необходимо обеспечить минимальное время простоя в работе вычислительных узлов кластера притом, что многие задание могут выполняться достаточно долго. С этой целью для длительных и не очень срочных заданий устанавливается максимальное количество вычислительных узлов, на которых они могут одновременно выполняться.

Контроль выполнения процедур на Unix-серверах диспетчеризации обработки реализуется на основе использования разработанного в ИКИ РАН программного пакета PMS (Process Monitoring System). Для этого все контролируемые процессы запускаются при помощи специальной программы, которая заносит протоколы их выполнения и стандартные коды возврата в специализированную базу данных. Для доступа к этой информации и настройки параметров контроля выполнения процессов используется специализированный веб-интерфейс.

Контроль выполнения процедур обработки данных на Windows-серверах обработки реализован на основе протоколов системы управления многопоточковой обработкой спутниковых данных. Программа запуска заданий по обработке спутниковых данных, установленная на Windows-серверах, протоколирует информацию обо всех выполняемых процессах в централизованную базу данных, предназначенную для этой цели. При этом для каждого из элементарных процессов фиксируется следующая информация: идентификатор сервера, тип обработки, идентификатор сессии, номер потока выполнения, время начала и окончания, а также код возврата. В случае возникновения ошибки при выполнении процесса фиксируется сообщение о ее причинах, а выполнение соответствующего потока выполнения задания по обработке данных прекращается. Следует отметить, что в настоящее время за сутки в централизованную базу данных поступает информация о сотнях тысяч элементарных процессов, относящихся к различным типам обработки и выполняемых на разных серверах, в сессиях и потоках. В результате использование обычных веб-интерфейсов, наподобие тех, что применяются для контроля процессов, выполняемых на Unix-серверах, оказывается практически невозможным. Таким образом, возникает необходимость в интерфейсах, позволяющих просматривать информацию о выполнении процессов в различных агрегированных представлениях. В результате решение было найдено в применении современных BI-технологий (Business intelligence), использующих хранилища структурированной информации на основе OLAP-структур (online analytical processing). Благодаря возможности предварительной агрегации информации по различным признакам и параметрам, эти инструменты позволяют достаточно быстро проводить анализ больших объемов многомерных данных. На основе BI-технологий был реализован целый ряд различных интерактивных отчетных форм (таблиц, гистограмм, графиков) [3], позволяющих визуально анализировать информацию о выполнении как элементарных процессов, так и комплексных процедур обработки. На рисунке 2 приведен пример одной из таких форм, предназначенной для получения агрегированной информации о выполнении заданий по обработке на различных вычислительных узлах.

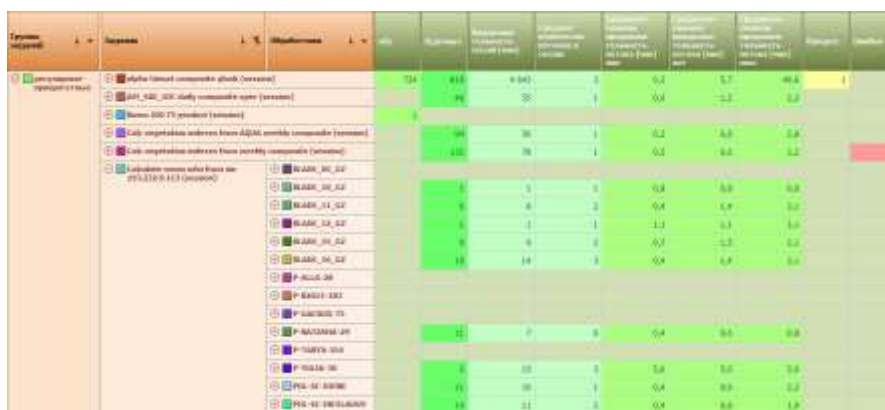


Рис. 2. Пример использования BI-интерфейса для получения информации о выполнении заданий обработки спутниковых данных.

На рисунке 3 приведен пример интерфейса, построенного по технологии ВІ и предназначенного для сравнительного анализа времени, затраченного на выполнение наиболее ресурсоемких заданий по обработке спутниковых данных.

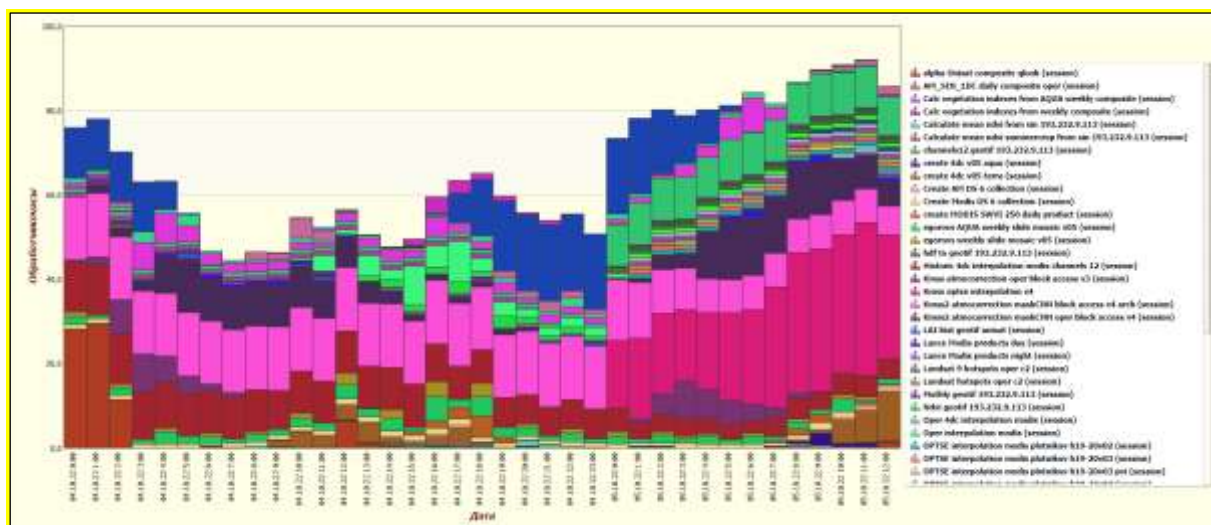


Рис. 3. Пример использования ВІ-интерфейса для сравнительного анализа времени, затраченного на выполнение различных задач по обработке спутниковых данных.

Заключение. Реализованная в ИКИ РАН технология распределенной многопоточковой обработки спутниковых данных обеспечивает эффективное функционирование большого кластера вычислительных узлов для решения широкого спектра задач ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В перспективе планируется дальнейшая модернизация программной реализации с целью минимизации времени простоя вычислительных узлов при условии обеспечения приоритетов выполнения наиболее критичных задач обработки. Также ведутся работы по поддержке всего реализованного функционала для вычислительных узлов, работающих под управлением операционных систем Unix.

Работы по развитию технологий обработки спутниковых данных с 2019 г. выполняются при поддержке темы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, гео-сфера» (№ 122042500019-6).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толтин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- [2] Кобец Д.А., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А. Организация автоматизированной многопоточковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 145-155.
- [3] Кобец Д.А., Балашов И.В., Сычугов И.Г., Толтин В.А. Организация контроля и анализа работоспособности систем автоматизированной обработки спутниковых данных с использованием ВІ-технологий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 92-103. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-3-92-103.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДЫ ДЕРЕВА ПО ДАННЫМ БПЛА В ЗАДАЧЕ ЛЕСНОЙ ТАКСАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ КУЗНЕЦОВСКОГО ПЛАТО

Пятаева А.В., Гулютин Н.Н., Михалев А.С.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск

В работе показано применение нейронных сетей глубокого обучения для задачи определения породы дерева по данным изображений с беспилотного летательного аппарата для решения задачи лесной таксации. Экспериментальные исследования проведены на тестовом наборе данных Vert и с помощью данных, полученных самостоятельно.

Ключевые слова: определение породы дерева, БПЛА, YOLO v8.

TREE SPECIES DETERMINATION ON IMAGES FROM UAV AT THE KUZNETSOVSKY PLATEAU TERRITORIES

Pyataeva A.V., Gulyutin N.N., Mikhalev A.S.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

The paper shows the use of deep learning neural networks for the task of determining the type of tree based on images from an unmanned aerial vehicle to solve the problem of forest taxation. Experimental studies were carried out on the Vert test dataset and with the help of data obtained independently.

Keywords: tree species, UAV, YOLO v8.

Введение. Таксация зеленых насаждений актуальна как для решения различных задач лесного здоровья, так и при вынужденной рубке деревьев в различной хозяйственной деятельности. К таксационным характеристикам зеленых насаждений относятся порода дерева, его возраст, высота и диаметр ствола и кроны, тип древесины. На основе таксационных характеристик осуществляется принятие решений о здоровье, стоимости и возможностях использования отдельного дерева и лесного участка в целом. В настоящее время эти данные получают при натурном осмотре специалисты-лесопатологи. Применение дистанционных методов для проведения таксации зеленых насаждений позволит исключить человеческий фактор и уменьшить стоимость проведения таксационных работ. В дистанционных методах использование спутниковых снимков не позволяет эффективно и оперативно решить задачу лесной таксации, так как имеется ограничение на детализацию данных таких снимков. Поэтому в настоящей работе использованы данные с БПЛА. Первым этапом лесной таксации является подсчет деревьев на определенном участке и детектирование их пород. Очевидно, что использование данных с БПЛА позволяет обеспечить необходимую точность при обнаружении дерева и его отнесении к той или иной породе. Далее на основе выделенных крон представляется возможным решить задачу оценки степени густоты найденной кроны дерева. Именно степень густоты кроны является определяющей характеристикой при детектировании состояния конкретного дерева. Вид и густота кроны существенно варьируется от в зависимости от породы, поэтому оценка породы имеет такое существенное значение. Для решения задачи определения породы по данным БПЛА в настоящей работе использованы глубокие нейронные сети.

Использование данных БПЛА и технологий глубоких нейронных сетей для оценки и описания лесных насаждений является популярным подходом. Так, в работе Хелы Джема и соавторов [1] исследователи разработали систему компьютерного зрения для автоматического обнаружения яблонь в саду и оценки их состояния. Она основана на использовании БПЛА для сбора данных и глубоких нейронных сетей для обработки этих данных. Сначала для обнаружения деревьев использовался стратегия отрицательной выборки (hard negative mining), затем для определения состояния здоровья деревьев применялись индексы растительности, полученные из многоканальных изображений. В исследовании Яо Лю и его коллеги [2] использовали БПЛА для сбора двух типов данных: данные LiDAR и стереоизображения. Исследователи

применили три алгоритма глубокого обучения для сегментации древесных крон: PointNet, PointNet++ и 3D U-Net. Особое внимание уделялось сегментации древесных крон Лириодендрона китайского, так как эта порода деревьев наиболее распространена в регионе исследования. Статья Хосе Луиса Гальярдо-Салазара и его коллег [3] ориентирована на исследование возможного ухудшения состояния горной сосны Хартвега (*Pinus hartwegii* Lindl.) в условиях изменения климата. В статье [4] рассматривается применение беспилотных летательных аппаратов с различными камерами над лесными участками с хвойными породами разных возрастов и высот, показано превосходство RGB-камер над мультиспектральными на высоте полета 150 метров.

Для создания детализированных карт лесного покрова высокого разрешения в работе [5] разработан метод на основе объектно-ориентированного аугментирования для минимизации количества размеченных данных высокой детализации и обучения нейронной сети на большом наборе данных лесов с меньшей точностью разметки. Полученная модель была протестирована на разных территориях России и Китая, показав высокое качество и детализацию в предсказании отдельных деревьев и малых групп деревьев. В статье [6] для обнаружения кластеров мертвых деревьев на снимках дистанционного зондирования Земли использованы глубокие нейронные сети моделей Longitude Latitude Attention (LLAM) и сеть Augmented Feature Pyramid Network (AugFPN). Для подсчета крон фруктовых деревьев в работе [7] данные с БПЛА обрабатываются моделями YOLO v4 и Mobilenet v3. Комбинирование этих моделей позволило эффективно обнаруживать и подсчитывать кроны фруктовых деревьев в условиях орхардов с высокой точностью и скоростью обработки. Кроме глубокого обучения для задач описания леса и мониторинга углеродного следа используют и классические методы машинного обучения такие как случайный лес [8], метод опорных векторов [9] и другие [10].

Алгоритм определения породы дерева. В работе для детектирования дерева и определения его породы использована глубокая нейронная сеть архитектуры YOLO v8 (рис. 1) [11]. Она является одной из самых эффективных архитектур для решения задачи детектирования объектов. В настоящее время YOLO v8 является последней версией данного алгоритма. Основной составляющей моделей YOLO начиная с v4 является магистральная сеть извлечения признаков на основе CSP – слоев (Cross Stage Partial). CSP – слой представляет собой модуль, который принимает на вход одну или несколько карт признаков, разделяет их на части, обрабатывает их в разных путях и затем выполняет их объединение, обеспечивая связь между разными уровнями глубины сети. В архитектуре YOLO v8 размер ядра свертки перед каждым модулем CSP был выбран равным 3x3 что в свою очередь позволяет снизить частоту дискретизации. В модуле CSP к входным данным сперва применяется свертка 1x1, затем данные разделяются и одна из частей обрабатывается с помощью модуля «узкое горлышко» (которое представляет собой комбинацию двух сверточных слоев размера 3x3 с остаточными связями). В итоге выполняется объединение высокоуровневых признаков с контекстной информацией и в конце применяется свертка 1x1, чтобы уменьшить количество каналов. В конце магистрали используется модуль SPPF. Модуль SPPF решает проблему обработки объектов разных размеров. Это достигается путем применения разных уровней операции пулинга к входным данным, чтобы генерировать карты признаков различных масштабов. Затем эти карты признаков объединяются в единую карту признаков фиксированного размера.

После этапа извлечения признаков следует их уточнение. Для этой цели используются подходы FPN (Feature Pyramid Networks) и PAN (Path Aggregation Network). FPN представляет собой структуру, которая генерирует пирамиду признаков на разных масштабах, позволяя нейронной сети работать с объектами разного размера. Это достигается путем создания серии сверточных слоев, каждый из которых работает на разных уровнях разрешения, и затем объединяет их вместе посредством нисходящего пути и боковых связей. PAN представляет собой метод для улучшения передачи информации в сверточных нейронных сетях. PAN соединяет слои нейронной сети в разных масштабах, позволяя информации о признаках передаваться вверх и вниз по сети. Это помогает улучшить способность сети к обнаружению объектов на разных масштабах и уровнях детализации. FPN в YOLO v8 передает сильные семантические

признаки сверху вниз, PAN передает сильные признаки позиционирования в обратном направлении. Для нахождения объектов в предыдущих версиях YOLO использовались якорные рамки, которые представляют собой набор predefined рамок разного масштаба и пропорций, которые используются для обнаружения объектов различного размера и формы. В версии 8 было решено отказаться от их использования. Данная модель теперь напрямую предсказывает центр объекта, а не смещение относительно известной якорной рамки. Кроме этого, в головной части сети используется операция разделения головы для задачи классификации и локализации. Такой дизайн позволяет каждой части сосредоточиться на своей задаче и соответственно повышает общую точность модели.

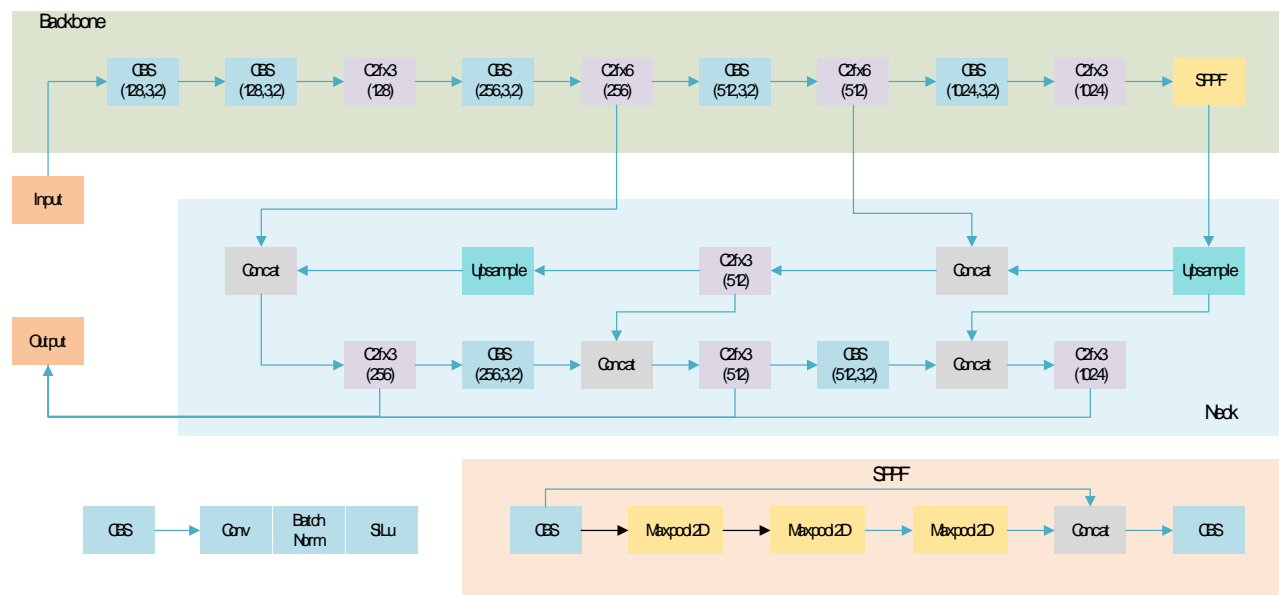


Рис. 1. Архитектура YOLO v8.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований использован тестовый набор Vert Dataset [12] – набор размеченных аэрофотоснимков лесов Швеции и самостоятельно полученный набор данных на территории лесопарка Кузнецово.

В наборе Vert Dataset представлены береза, сосна, ель, а также деревья категории «другое», к которой отнесены все другие породы. Этот набор данных был выбран для обучения модели, так как породный состав этого набора данных идентичен породному составу лесопарковой территории Кузнецово, на которой представлены в основном именно береза, сосна и ель. Распределение деревьев различных классов в наборе данных Vert Dataset: ель 41048, сосна 44363, береза 12389, другие 1923.

Самостоятельно построенный набор данных основан на данных с БПЛА DJI Mini, полученных в лесном массиве около деревни Кузнецово в Березовском районе Красноярского края в июне 2023 года. Съемка проведена на высоте полета в 120 метров. Деревья на полученных снимках вручную размечены экспертом. Самостоятельно полученные аэрофотоснимки содержат деревья следующих видов: сосна 3543, береза 3605. Для проведения экспериментальных исследований наборы данных разбиты случайным образом на обучающую и тестовую часть в соотношении 70:30 процентов. Примеры снимков показаны на рисунке 2.

Обучение выполнялось в течение 100 эпох, с применением мини-пакетного режима обучения с размером 32 изображения. Проверка качества работы модели выполнена в три этапа. На первом этапе YOLO v8 обучена и протестирована на данных шведского Vert Dataset. На втором этапе обученная на Vert Dataset модель протестирована на самостоятельно построенном наборе данных. Затем выполнена новая настройка весов YOLO v8 на самостоятельно размеченном наборе данных и на нем же проведено тестирование модели. Результаты тестирования модели с использованием классических метрик компьютерного зрения используемых в задачах детектирования объектов приведены в таблице 1.



Рис. 2. Примеры изображений из наборов данных: а – Vert Dataset; б – снимки лесопарка Кузнецово.

Табл.1. Значение метрик тестовой части модели YOLO v8.

Этап 1. Обучение и тестирование на Vert Dataset				
Порода	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95
Береза	0.715	0.673	0.729	0.431
Сосна	0.863	0.863	0.914	0.599
Ель	0.823	0.802	0.878	0.559
Прочее	0.449	0.396	0.369	0.216
Этап 2. Обучение Vert Dataset, тестирование на своем наборе данных				
Береза	0.433	0.0726	0.245	0.114
Сосна	0.875	0.0407	0.457	0.294
Этап 3. Обучение и тестирование на своем наборе данных				
Береза	0.655	0.422	0.406	0.180
Сосна	0.547	0.407	0.365	0.145

Для оценки качества работы модели рассчитаны точность (Precision), полнота (Recall), усреднённая по всем классам величина средней точности (mAP50) и метрика mAP50-95, усреднённая по ряду значений IoU (метрика Жаккадра) от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05. Метрика Precision характеризует способность модели правильно классифицировать положительные объекты относительно количества всех положительных объектов, то есть оценить насколько точно были обнаружены деревья той или иной, например, насколько точно определяются сосны, не принимает ли модель за сосну деревья других пород. Оценка полнота показывает сколько всего верно найдено деревьев среди всех деревьев. Кроме того, в работе использованы ставшие популярными в последнее время метрики mAP50, рассчитанная при пороге $IoU = 0,5$ и метрика mAP50-95, усреднённая по ряду значений IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05.

На первом этапе тестовые данные и данные для обучения сети содержались в одном и том же наборе данных. Поэтому для пород береза и сосна получены достаточно высокие значения метрики Precision при приемлемой полноте. Так, на этом этапе модель верно нашла 86% всех сосен и обеспечила при этом достоверность их обнаружения в 86%. На втором этапе, когда тестирование обученной модели проведено на собственном наборе данных резко упало

значение Recall, метрики отвечающей за полноту обнаружения деревьев. То есть на втором этапе модель обнаружила только 4% и берез 7% из всех сосен, присутствующих на снимке. Это обусловлено различными видами совпадающих пород деревьев участка съемки и деревьев из шведского Vert Dataset. Например, в Швеции произрастает ель европейская (*Picea abies*), характеризующаяся ширококонической кроной с горизонтальными ветвями, высотой дерева 35-55 м, диаметром ствола 1-1,5 м [13]. Ель сибирская (*Picea obovata*) имеет коническую крону с поникшими ветвями, высоту дерева 15–35 м и диаметр ствола аналогичный *Picea abies*. Однако, так как по данным снимков с БПЛА решение о породе дерева принимается по кроне, то значительные визуальные различия кроны существенно снижают эффективность работы модели.

Следовательно, потребовалось настроить веса модели на выделение признаков для деревьев именно нашего региона используя самостоятельно созданный и размеченный набор данных. При тестировании модели на этапе 3 полнота обнаружения деревьев возросла на порядок. Таким образом, в сравнении с предыдущими результатами этапа 2, обучение на новых данных позволило повысить полноту модели. Дальнейшее увеличение набора данных позволит увеличить качество работы алгоритма определения породы дерева.

Заключение. Определение породы дерева является первым шагом работы алгоритма лесной таксации. Для детектирования породы применены глубокие нейронные сети современной архитектуры YOLO v8. Эффективность модели напрямую зависит от количества обучающих данных в наборе. Разработка собственного набора данных позволила существенно увеличить точность работы алгоритма и повысить общее количество найденных деревьев.

Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках проекта «Цифровая импортозамещающая технология обнаружения лесных пожаров на основе использования уникальной российской спутниковой группировки Арктика-М с последующей интеграцией с системой ИСДМ-Рослесхоз» № 2023031409613.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Jemaa H., Bouachir W., Lebion B., Bouguila N.* UAV-Based Computer Vision System for Orchard Apple Tree Detection and Health Assessment // *Remote Sens.* 2023, Vol. 15, No. 3558. DOI:10.3390/rs15143558.
- [2] *Liu Y., You H., Tang X., You Q., Huang Y., Chen J.* Study on Individual Tree Segmentation of Different Tree Species Using Different Segmentation Algorithms Based on 3D UAV Data // *Forests.* 2023. N 14(7), DOI:10.3390/f14071327.
- [3] *Gallardo-Salazar J. L., Lindig-Cisneros R.A., Lopez-Toledo L., Endara-Agramont A.R., Blanco-García A., Sáenz-Romero C.* Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change // *Forests.* 2023. Vol. 14. No 6:1176. DOI:10.3390/f14061176.
- [4] *Komárek J., Klápšt P., Hrach K., Klouček T.* The Potential of Widespread UAV Cameras in the Identification of Conifers and the Delineation of Their Crowns // *Forests.* 2022. Vol. 13. No 5:710. DOI:10.3390/f13050710.
- [5] *Illarionova S., Shadrin D., Ignatiev V., Shayakhmetov S., Trekin A., Oseledets I.* Augmentation-Based Methodology for Enhancement of Trees Map Detalization on a Large Scale // *Remote Sens.* 2022, 14, 2281. DOI:10.3390/rs14092281.
- [6] *Li Z., Yang R., Cai W., Xue Y., Hu Y., Li L.* LLAM-MDCNet for Detecting Remote Sensing Images of Dead Tree Clusters // *Remote Sensing.* 2022. Vol. 14, 3684. DOI:10.3390/rs14153684.
- [7] *Zhu Y., Zhou J., Yang Y., Liu L., Liu F., Kong W.* Rapid Target Detection of Fruit Trees Using UAV Imaging and Improved Light YOLOv4 Algorithm // *Remote Sensing.* 2022. Vol. 14. No. 17:4323, DOI:10.3390/rs14174324.
- [8] *Breiman L.* Random Forests // *Machine Learning*, 2001 Vol. 45, 5-32. DOI:10.1023/A:1010933404324.
- [9] *Cortes C., Vapnik V.* Support-vector networks // *Machine Learning.* 1995 Vol. 20, 273-297. DOI:10.1007/BF00994018.

- [10] *Illarionova S., Shadrin D., Tregubova P., Ignatiev V., Efimov A., Oseledets I., Burnaev E.A.* A Survey of Computer Vision Techniques for Forest Characterization and Carbon Monitoring Tasks // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No 22: 5861. DOI:10.3390/rs14225861.
- [11] *Jocher G., Chaurasia A., Qiu J.* YOLO by Ultralytics. Github. 2023. github.com/ultralytics/ultralytics, 2023. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5861> (дата обращения 16.07.2023).
- [12] Trees Computer Vision Project. Vert Dataset. <https://universe.roboflow.com/project-nqwx/b/trees-3nzd6> (дата обращения 16.07.2023).
- [13] *Caudullo G., Willy T., Daniele R.* Picea abies in Europe: distribution, habitat, usage and threats // European Atlas of Forest Tree Species. 2016. P. 114-116. DOI:10.2760/233115.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА СО СКВАЖИНЫ

Сидоров А.В., Будников К.И.

Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск

Нефтяная отрасль является одним из крупнейших и важнейших секторов современной российской промышленности. Для разведки новых месторождений и бурения добывающих скважин требуются большие временные и финансовые затраты, поэтому повышенное внимание отводится мониторингу состояния и производительности эксплуатируемых участков. Применение различных методов искусственного интеллекта для оценки процентного содержания фракций в нефтяном потоке из скважины получило широкое распространение в настоящее время. В работе представлено исследование возможностей нейронных сетей разных архитектур для предсказания расхода компонентов многофазного потока со скважины. Для проведения исследования использовались показания с датчиков многофазных расходомеров на основе трубы Вентури и рентгеновского расходомера.

Ключевые слова: нефтяные скважины, многофазные расходомеры, машинное обучение, нейронные сети.

INVESTIGATION OF NEURAL NETWORK MODELS FOR THE USE IN THE PROCESS OF MEASURING THE PARAMETERS OF A MULTI-PHASE FLOW FROM A WELL

Sidorov A.V., Budnikov K.I.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

The oil industry is one of the largest and most important sectors of modern Russian industry. Exploration of new fields and drilling of production wells require large time and financial costs, therefore, increased attention is paid to monitoring the condition and productivity of exploited areas. The use of various artificial intelligence methods to estimate the percentage of fractions in the oil flow from the well has become widespread at the present time. The paper presents a study of the capabilities of neural networks of different architectures for predicting the consumption of components of a multiphase flow from a well. To conduct the study, readings from sensors of multiphase flow meters based on a Venturi tube and an X-ray flow meter were used.

Keywords: oil wells, multiphase flow meters, machine learning, neural networks.

Введение. Одним из крупнейших и важнейших секторов современной промышленности России является нефтегазовая отрасль. Доходы от экспорта ее продукции обеспечивают до 40 % доходов федерального бюджета и до 16 % ВВП [1]. Извлечение ископаемых из недр сопряжено с большими временными и финансовыми затратами, которые требуются для разведки новых месторождений и бурения добывающих скважин, поэтому мониторингу состояния и производительности эксплуатируемых участков отводится повышенное внимание. Для этого используется измерение скорости протекания или расхода нефтяных фракций через трубопровод как один из способов контроля. С этой целью в настоящее время на большинстве скважин установлен сепаратор, который разделяет сырую нефть на фракции: нефть, газ и воду. При этом расход каждой составляющей измеряется отдельно с помощью расходомеров однофазной среды [2]. Подобный подход позволяет наиболее точно определить расход, однако имеет ряд недостатков:

- высокая стоимость;
- требуется много места для анализа и необходимо периодическое обслуживание;
- обязательно поддержание стабильных условий внутри сепаратора;
- медленный - для проведения надежных измерений требуется несколько часов;
- эксплуатационные условия иногда не позволяют полностью разделить фазы смеси;
- чувствителен к наличию пены, сгусткам и образованию эмульсий.

В качестве альтернативы этому способу измерений применяются многофазные расходомеры [3-6]. В отличие от сепараторов, они позволяют непрерывно измерять расход газа, нефти и воды непосредственно в трубопроводе без их физического разделения на фракции. С помощью многофазных расходомеров можно быстро сделать оценку, однако для них существуют только эмпирически полученные формулы расчета расходов с использованием различных измерений [7]. Однако, с помощью подобного подхода не удается показать точность измерений, сопоставимую с классическими методами.

Применение различных видов машинного обучения для оценки процентного содержания жидких фракций в нефтяном потоке из скважины получило широкое распространение в настоящее время [8-10]. Для прогнозирования производительности скважин с высоким газовым фактором и содержанием воды использовались модели с использованием таких методов как машина опорных векторов (SVM) и случайные леса (RF). При оценке скважин в газоносных песчаниках применялись искусственные нейронные сети (ANN) и адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS). Эти модели показали хорошие результаты. Однако совершенствование имеющихся и создание новых методов прогноза расхода потока из скважины остается актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование характеристик нейронных сетей, имеющих разные архитектуры, для предсказания параметров многофазного потока со скважины. Для проведения исследования использовались показания с датчиков многофазных расходомеров на основе трубы Вентури и рентгеновского расходомера.

Расходомеры на основе трубы Вентури. Расходомеры данного типа представляют собой трубу с горловиной, включаемую в разрыв нефтепровода (рис. 1). Принцип действия основан на эффекте Вентури – явлении уменьшения давления в потоке жидкости или газа, когда этот поток проходит через суженный участок трубы. Отводы от трубы в широкой и узкой частях подключаются к дифференциальному манометру. Расход определяется по формуле (1):

$$Q = \frac{CA_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}}, \quad (1)$$

где Q – расход субстанции, C – экспериментальный коэффициент, отражающий потери внутри расходомера, A_1 и A_2 – площади сечения трубопровода и горловины (узкой части) соответственно, ρ – плотность жидкости или газа, P_1 и P_2 – статические давления на входе трубы и в горловине.

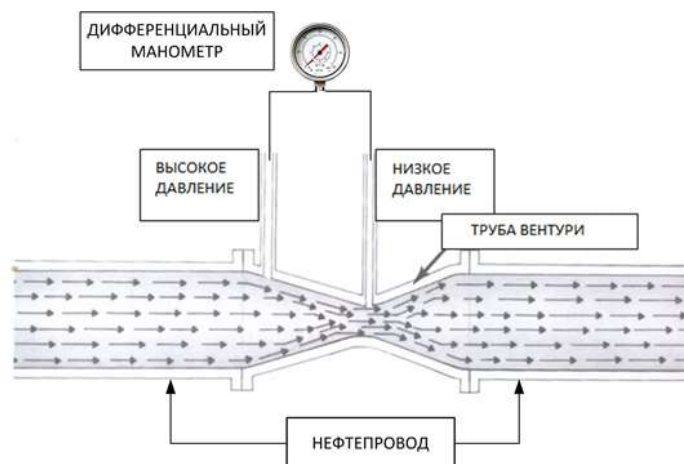


Рис. 1. Схема применения расходомера на основе трубы Вентури.

При измерении расхода в скважине многофазный флюид сначала проходит через трубу Вентури, где с помощью датчиков перепада давления измеряется общий массовый расход, а также температура. Затем поток направляется в гамма-плотномер, который находится после

трубы Вентури, для определения плотности многофазной среды. Кроме того, используются емкостные или СВЧ-датчики для контроля солености и других параметров.

К преимуществам расходомеров данного типа относятся: непрерывное измерение; универсальность; простота обслуживания; наименьшие потери давления.

Многофазные рентгеновские расходомеры. Данный тип расходомеров (рис.2) предполагает эмиссию через поток гамма и рентгеновского излучения с последующим детектированием фотонов высокой и низкой энергии [5].

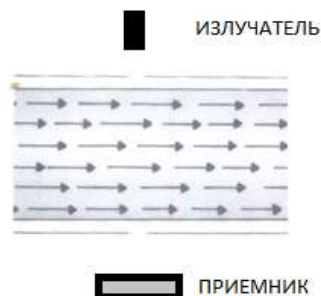


Рис. 2. Схема применения рентгеновского расходомера.

Измерения основаны на эффекте зависимости коэффициента поглощения гамма / рентгеновских лучей, который зависит от облучаемого материала и энергии фотона. На низких энергиях разница в коэффициентах поглощения излучения между водой и нефтью максимальна, что позволяет различить эти две фазы. На высоких энергиях разница между коэффициентами поглощения излучения воды и нефти уменьшается, а между жидкими компонентами и природным газом, наоборот, возрастает [6]. Анализ измерений позволяет осуществить оценку расхода воды, нефти и газа, проходящих через расходомер. Для расчета параметров расхода по показаниям датчиков используются различные математические модели.

Рентгеновские расходомеры обладают следующими преимуществами: непрерывный процесс измерений; отсутствие ограничителей потока (по сравнению с трубой Вентури); высокая точность; низкая стоимость.

Анализ и подготовка данных. При проведении исследования использовался набор данных (датасет), содержащий показания с различных датчиков многофазных расходомеров, которые снимались с интервалом в 1 минуту, и целевые параметры реальных скважин. Также этот датасет содержит различные расчетные параметры.

Перед разработкой модели машинного обучения необходима предварительная обработка набора данных с целью определения важности признаков и очистки датасета от бесполезных данных, а также избавление от чрезмерной линейной зависимости. Это требуется для экономии вычислительных ресурсов, а также уменьшения процента ошибки разрабатываемой модели.

В качестве целевых признаков приняты данные о расходе газа (qg_sc) и нефти (qo_sc). Входными параметрами являются:

- показатели датчиков рентгеновского расходомера – это показатели числа фотонов различных энергий 32 кЭв(N32), 81 кЭв(N81) и 356 кЭв(N356), а также общее число фотонов (NTotal);
- показатели датчиков с трубы Вентури – данные о перепаде давления на трубе (DPV), а также температуры (TL) и давления (PL) на входе;
- данные о плотности и вязкости флюида (GOR , μ_{o_lc} , μ_{l_lc});
- расчетные параметры

Анализ тепловой карты всех признаков исходного датасета показал наличие мультиколлинеарности – тесной корреляционной взаимосвязи между отбираемыми для анализа признаками, совместно воздействующими на общий результат.

Для того чтобы определить какие из признаков следует удалить, использован критерий Gain Ratio (Мощность признака) из алгоритма C4.5 [11] для признаков с высокой корреляцией.

После исключения высоко коррелирующих параметров получен датасет, который использовался для прогноза расхода нефти и газа.

Исследуемые архитектуры нейронных сетей. Для проведения исследования были выбраны следующие популярные архитектуры нейронных сетей:

- многослойный линейный перцептрон (MLP),
- рекурсивная нейронная сеть (RNN),
- нейронная сеть с долговременной и кратковременной памятью (LSTM).

Для оценки точности аппроксимации использовалась метрика R^2 – коэффициент детерминации, который характерен при решении задач регрессии.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_y^2}, \quad (2)$$

где σ_y^2 – дисперсия используемой для прогноза случайной величины, а σ^2 – дисперсия остатков (ошибок) регрессии (прогноза) модели. В качестве функции потерь для обучения использовалась среднеквадратичная ошибка:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

где n – количество наблюдений по которым строится модель и количество прогнозов; Y_i – фактическое значение зависимой переменной для i -го наблюдения; \hat{Y}_i – значение зависимой переменной, предсказанное моделью.

В процессе обучения использовались 70% имеющихся данных и на 30% делались проверки.

Многослойный линейный перцептрон. Для проведения исследования был построен MLP со следующей конфигурацией слоев: входной слой; 3 скрытых слоя на 500, 100 и 50 нейронов каждый; выходной слой.

Эксперименты проводились с двумя различными наборами входов:

- показатели датчиков с многофазного расходомера Вентури;
- показатели с рентгеновского расходомера.

В качестве функции потерь для обучения использовалась среднеквадратичная ошибка, а как функция активации использовалась сигмоида:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (4)$$

Поскольку область значений функции лежит в диапазоне от 0 до 1, то **необходимо** выполнить нормализацию входных данных в этом диапазоне. В качестве нормализующей функции использовалась min-max нормализация [12] в интервале [a, b]:

$$X_{norm} = a + \frac{(a-b) * (X - \min(X))}{\max(X) - \min(X)} \quad (5)$$

где $a = 0$, $b = 1$. Результаты обучения и тестирования данной архитектуры представлены в таблице 1. Хорошо видно, что данная архитектура не справляется с поставленной задачей прогноза расхода как нефти, так и газа.

Табл. 1. Результаты обучения MLP.

Набор данных	Epoch	R^2 нефть	R^2 газ	Train MSE	Test MSE
Расходомер Вентури	1000	0.0	0.86	0.002	0.016
Рентгеновский расходомер	5000	0.73	0.28	0.006	0.007

Рекуррентная нейронная сеть (RNN). Сети данного типа способны обрабатывать серии данных, распределенных во времени. Для исследований использовалась архитектура, состоящая из трех слоев RNN по 128 нейронов в каждом и один полносвязный слой для получения выходов. Длина последовательности данных 10 элементов. В качестве функции активации был выбран гиперболический тангенс. Функция потерь аналогична многослойному перцептрону – MSE. Так как функция активации имеет область значений от -1 до 1, min-max нормализация выполнена в этом диапазоне.

Для этой модели заметно значительное улучшение показателей аппроксимации по всем показателям (Таблица 2) по сравнению с перцептроном.

Табл. 2. Результаты обучения RNN.

Набор данных	Epoch	R^2 нефть	R^2 газ	Train MSE	Test MSE
Расходомер Вентури	3000	0.90	0.95	0.039	0.045
Рентгеновский расходомер	3000	0.81	0.83	0.015	0.018

Нейронная сеть с долговременной и кратковременной памятью (LSTM). Сети этой разновидности являются усовершенствованием рекуррентных нейронных сетей. Они способны к обучению долговременным зависимостям [13]. Применение сетей этой архитектуры потенциально может помочь получить лучшие показатели точности по сравнению с RNN. Для эксперимента использовалась архитектура, аналогичная предыдущей, состоящая из трех слоев LSTM по 128 ячеек в каждом и один полносвязный слой для получения выходов. Результаты обучения и аппроксимации представлены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты обучения LSTM.

Набор данных	Epoch	R^2 нефть	R^2 газ	Train MSE	Test MSE
Расходомер Вентури	2500	0.92	0.94	0.041	0.04
Рентгеновский расходомер	10000	0.81	0.84	0.014	0.019

По итогам обучения полученная точность прогноза сопоставима с точностью, получаемой с помощью предыдущей архитектуры – RNN. Отсюда можно сделать вывод об отсутствии долговременных зависимостей, из-за чего LSTM не дает желаемого улучшения результата.

Заключение. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Применение нейронных сетей для увеличения точности показаний многофазных расходомеров дает положительный эффект. Качество предсказания расхода по метрике в лучшем варианте составило 92% для нефти и 94% для газа.
2. Имеется преимущество рекуррентных нейронных сетей над классическим перцептроном при решении задач данного типа.
3. Сети с архитектурами RNN и LSTM показали близкие результаты по точности прогноза.
4. Расходомер с трубой Вентури показал преимущество перед рентгеновским расходомером при определении фракций нефти и газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Манукян М.М. Современное состояние нефтегазовой отрасли России и тенденции ее развития // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2020;11(1):34-42. DOI:10.18287/2542-0461-2020-11-1-34-42.
- [2] ГОСТ Р 8.615-2005 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования (с Изменениями № 1, 2) <http://docs.cntd.ru/document/1200043054> (дата обращения: 08.06.2023).
- [3] Рымаренко К.В. Многофазная расходомерия: принципы работы и опыт применения на примере технологии VX // Недропользование XXI век, №1 (26), 2011, стр 28-35.
- [4] Свидетельство об утверждении типа средств измерений NO.Е.29.006.А № 43528, Расходомеры многофазные МРМ <http://www.kip-guide.ru/docs/47474-11.pdf> (дата обращения: 08.06.2023)
- [5] Полихов С.А. Устройство и способ для измерения многофазного потока флюида.// Патент на изобретение № 2533758 С2. Официальный бюллетень Роспатента «Изобретения. Полезные модели», 2014, №32.
- [6] Аминов О.Н., Полихов С.А., Зубков Ю.А. Многофазный расходомер // Патент на изобретение № 2663418 С1. Официальный бюллетень Роспатента «Изобретения. Полезные модели», 2018, №22.
- [7] Наумчик И.В., Пирогов С.Ю., Шевченко А.В. Способ измерения расхода многофазной среды // Фундаментальные исследования, № 10 (часть 3), 2015, стр. 507-511
- [8] Ibrahim A.F., Al-Dhaif R., Elkhatatny S., Al Shehri D. Applications of Artificial Intelligence to Predict Oil Rate for High Gas–Oil Ratio and Water-Cut Wells // ACS Omega. 2021. Vol. 6, № 30. P. 19484-19493. DOI:10.1021/acsomega.1c01676.
- [9] Ruiz M., Obando A., Alvarez H. Combined artificial intelligence modeling for production forecast in an oil field // CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 9, no. 1, pp. 27-35, 2019, DOI:10.29047/01225383.149. <https://www.redalyc.org/journal/465/46570769003/html> (дата обращения: 08.06.2023).
- [10] Khamis M., Elhaj M., Abdulraheem A. Optimization of choke size for two-phase flow using artificial intelligence // J Petrol Explor Prod Technol. 2020. Vol. 10, № 2. P. 487-500.
- [11] Quinlan J.R. Improved Use of Continuous Attributes in C4.5 // Journal of Artificial Intelligence Research. 1996. p. 77-90. <https://arxiv.org/pdf/cs/9603103.pdf> (дата обращения: 08.06.2023).
- [12] Juszczak P., Tax D.M.J., Dui R.P.W. Feature scaling in support vector data descriptions. // Proc. 8th Annu. Conf. Adv. School Comput. Imaging: p. 25-30. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.100.2524> (дата обращения: 08.06.2023).
- [13] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-term Memory // Neural computation. 9(8), 1997, 1735-80. DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735. https://www.researchgate.net/publication/13853244_Long_Short-term_Memory (дата обращения: 08.06.2023).

ПОДБОР АРХИТЕКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ВОД

Счастливец Е.Л., Юкина Н.И.

Кемеровский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Институт водных и экологических проблем СО РАН

Работа посвящена исследованию и подбору параметров нейронной сети для оценки качества природно-техногенных вод. Проведены сравнительные анализы эффективности нейронных сетей при разных архитектурах. В качестве исходных данных использовали гидрохимические показатели природно-техногенных вод. Для сравнения использовали следующие архитектуры нейронных сетей: полносвязную, сверточную, рекуррентную, а также несколько предобученных моделей, таких как TabNet, AutoGluon, CatBoost.

Ключевые слова: нейронные сети, модели, параметры, водные объекты, ингредиенты, оценка качества вод, архитектуры нейронных сетей.

SELECTION OF THE ARCHITECTURE AND PARAMETERS OF NEURAL NETWORKS FOR ASSESSING THE QUALITY OF NATURAL AND TECHNOGENIC WATERS

Schastlivtsev E.L., Yukina N.I.

Kemerovo Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS

The article is devoted to the study and selection of neural network parameters for assessing the quality of natural and technogenic waters. Comparative analyzes of the efficiency of neural networks for different architectures have been carried out. Hydrochemical indicators of techno-natural waters were used as initial data. For comparison, neural network architectures were used: fully connected, convolutional, recurrent, as well as several pre-trained models, such as TabNet, AutoGluon, CatBoost.

Keywords: neural networks, models, parameters, water bodies, ingredients, water quality assessment, neural network architectures.

В области оценки качества воды существует множество современных методов, которые могут быть применены с использованием нейронных сетей и машинного обучения. Однако, выбор конкретного метода зависит от поставленных задач и доступности данных.

Оценка качества природно-техногенных вод является важной задачей, связанной с экологической безопасностью и здоровьем людей. Нейронные сети применяются для решения этой задачи, так как с их помощью анализируют большие объемы данных и выделяют сложные зависимости между различными параметрами воды.

Природно-техногенные воды, такие как воды рек, озер и водохранилищ, содержат вредные примеси и загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, пестициды и другие химические соединения. Эти загрязнители негативно влияют на живые организмы, включая человека, и вызывают различные заболевания.

Нейронные сети могут помочь в разработке системы мониторинга качества воды, позволяя быстро и эффективно анализировать данные и выделять аномалии в качестве воды. Архитектуры нейронных сетей могут быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить высокую точность предсказаний и устойчивость к шуму и аномалиям в данных.

Таким образом, анализ и подбор архитектур нейронных сетей для оценки качества природно-техногенных вод является актуальной задачей, которая может иметь практическое применение в различных областях, связанных с экологией и здравоохранением.

В данной работе, уровень загрязненности вод определяем по ассоциативному показателю (АП), который будем предсказывать с помощью разных нейронных сетей.

Табл.1. Определение качества воды по ассоциативным показателям [1].

Класс качества	Название классов	Диапазоны АП
I	Очень чистая	<0,3
II	Чистая	0,3 ÷ 1
III	Умеренно загрязненная	1 ÷ 2,5
IV	Загрязненная	2,5 ÷ 4
V	Грязная	4 ÷ 6
VI	Очень грязная	6 ÷ 10
VII	Чрезвычайно грязная	10 ÷ 20
VIII	Экстремально грязная	> 20

Уровень загрязненности вод или класс качества вод определяется по таблице 1 в зависимости от диапазона АП. Методика расчета показателей АП подробно описанного в [1].

Главной целью работы является подбор параметров и архитектуры нейронной сети, которая более точно предсказывает показатель АП по гидрохимическим показателям (аммоний, ХПК, БПКпол., взвешенные вещества, железо, марганец, медь, минерализация, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, сульфаты, сухой остаток, фенолы, фосфаты, хлориды, хром VI, цинк, кислород). Качество работы нейронной сети и точность предсказаний оцениваем по средней абсолютной ошибке (MAE).

MAE - это средняя абсолютная разница между предсказанными значениями и фактическими значениями.

В качестве водного объекта для определения загрязненности вод выбрана река Тайда, протекающая в Кемеровской области. Река Тайда – равнинная река на всем протяжении, левосторонний приток р. Томь второго порядка через р. Аба. Длина реки составляет 10-12 км. Протекает река по территории разрезов, угольных шахт и промзоны г. Киселевска, в том числе в границах земельного отвода ООО «Шахта № 12» южнее участков открытых горных работ.

Для сравнения предложены следующие архитектуры нейронных сетей: полносвязная, сверточная, рекуррентная, а также несколько предобученных моделей, таких как TabNet, AutoGluon, CatBoost.

Полносвязная нейронная сеть. Модель с двумя слоями по 64 нейрона, активационная функция которых - ReLU, и выходным слоем с одним нейроном. Скриншот архитектуры нейронной сети, представлен на рис. 1. В качестве функции потерь мы использовали среднеквадратичную ошибку (MSE), а в качестве метрики - среднюю абсолютную ошибку (MAE). Затем обучили модель на данных, разбив их на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80:20. После обучения построили график потерь модели на обучающей и валидационной выборках в зависимости от эпохи (рис. 2).

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape         Param #
-----
dense (Dense)                (None, 64)           1344
dense_1 (Dense)              (None, 64)           4160
dense_2 (Dense)              (None, 1)            65
-----
Total params: 5,569
Trainable params: 5,569
Non-trainable params: 0
    
```

Рис. 1. Архитектура полносвязной нейронной сети.

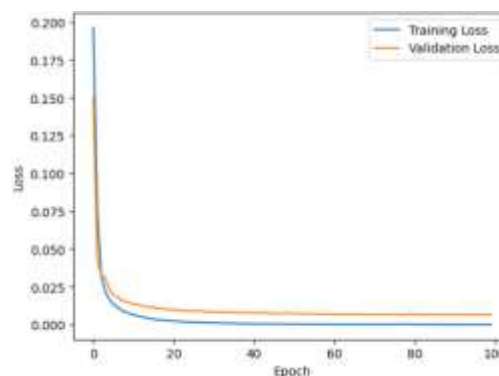


Рис. 2. Ошибка на обучающей (Training Loss) и проверочной (Validation Loss) выборках.

После обучения нейронной сети, оценивали ее работу на тестовой выборке, данные которой не использовались в обучающей и проверочной выборках. В результате были получены следующие показатели, табл. 2. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Pred) на тестовой выборке представлено на рис. 3.

Табл. 2. Средняя абсолютная ошибка на проверочной и тестовой выборках.

	Проверочная	Тестовая
Средняя абсолютная ошибка	0.08	0.15
Средняя абсолютная ошибка в %	13.5	24.9

Табл. 3. Средняя абсолютная ошибка на проверочной и тестовой выборках.

	Проверочная	Тестовая
Средняя абсолютная ошибка	0.015	0.06
Средняя абсолютная ошибка, %	2.55	9.97

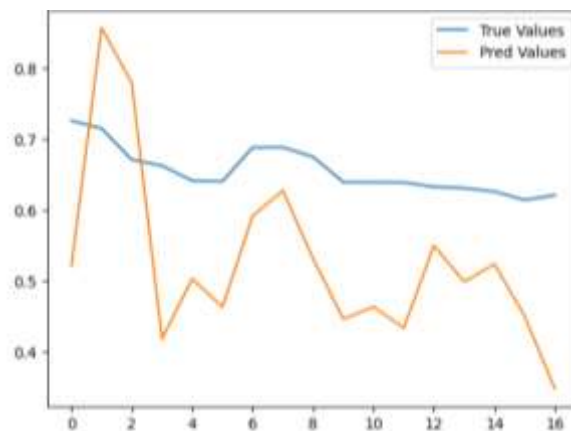


Рис. 3. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Pred) на тестовой выборке.

Сверточная нейросеть. Скриншот архитектуры сверточной сети представлен на рис. 4. Ниже приведено описание модели по слоям:

1. Conv1D: Сверточный слой с 64 фильтрами и размером ядра равным 3. Функция активации ReLU. Входной размер данных: (20, 1).
2. MaxPooling1D: Пулинг слой с размером пула 2. Уменьшает размерность данных в 2 раза. Выходной размер данных: (10, 64).
3. Flatten: Преобразует многомерные данные в одномерный вектор. Выходной размер данных: (640).
4. Dense: Полносвязный слой с 64 нейронами. Функция активации ReLU. Выходной размер данных: (64).
5. Dense: Полносвязный слой с 32 нейронами. Функция активации ReLU. Выходной размер данных: (32).
6. Dense: Полносвязный слой с 16 нейронами. Функция активации ReLU. Выходной размер данных: (16).
7. Dense: Полносвязный слой с 1 нейроном. Функция активации linear. Выходной размер данных: (1).

```

Model: "sequential_14"
-----
Layer (type)                Output Shape         Param #
-----
conv1d_14 (Conv1D)          (None, 18, 64)      256
max_pooling1d_8 (MaxPooling (None, 9, 64)      0
1D)
flatten_6 (Flatten)         (None, 576)         0
dense_21 (Dense)            (None, 64)          36928
dense_22 (Dense)            (None, 32)          2080
dense_23 (Dense)            (None, 16)          528
dense_24 (Dense)            (None, 1)           17
-----
Total params: 39,889
Trainable params: 39,889
Non-trainable params: 0
    
```

Рис. 4. Архитектура сверточной нейронной сети.

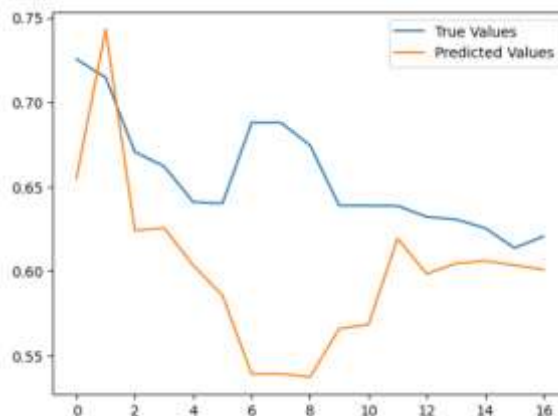


Рис. 5. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Predicted) на тестовой выборке.

Затем модель компилируется с использованием средства оптимизации Adam и функции потерь mse (среднеквадратическая ошибка). В результате были получены следующие показатели, табл.3. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Pred) на тестовой выборке представлено на рис.5.

Рекуррентная нейросеть. Скриншот архитектуры рекуррентной сети представлен на рис.6

Модель Sequential. Первый слой LSTM с 50 скрытыми узлами и функцией активации relu. Затем добавляем полносвязный слой с одним выходным узлом. Компилируем модель, используя оптимизатор adam и функцию потерь mse (среднеквадратичную ошибку).

Модель обучается на тренировочных данных x_train и y_train в течение 100 эпох с размером пакета 32. Результат работы нейронной сети представлен в табл.4. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Predicted) на тестовой выборке представлено на рис.7.

Табл. 4. Средняя абсолютная ошибка на проверочной и тестовой выборках.

	Проверочная	Тестовая
Средняя абсолютная ошибка	0.02	0.056
Средняя абсолютная ошибка в %	3.23	8.5

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape         Param #
-----
lstm (LSTM)                  (None, 50)          10400
dense (Dense)                (None, 1)           51
-----
Total params: 10,451
Trainable params: 10,451
Non-trainable params: 0
    
```

Рис. 6. Архитектура рекуррентной нейронной сети.

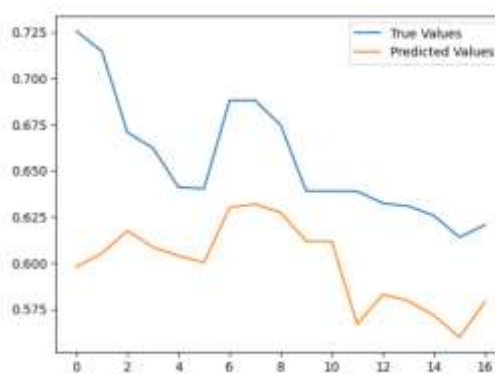


Рис. 7. Сравнение значений истинных (True) и предсказанных (Predicted) на тестовой выборке.

Предобученные модели (TabNet, AutoGluon, CatBoost). TabNet – новая высокопроизводительная каноническая архитектура глубокого обучения на основе табличных данных, которая представляет собой комбинацию методов машинного обучения, таких как деревья решений и нейронные сети, с использованием внимания и механизмов выбора функций. TabNet последовательно оценивает функции, которые используются на каждом этапе принятия решения. Это обеспечивает интерпретируемость и эффективность процесса обучения, поскольку способность к обучению определяется более релевантными функциями (наиболее адекватными) [2].

TabNet использует необработанные табличные данные без предварительной обработки и обучается с использованием оптимизации на основе методов градиентного спуска для изучения гибких представлений и обеспечения гибкой интеграции в сквозном обучении; а также TabNet использует последовательные итерации, чтобы выбрать, какие особенности следует обосновать на каждом этапе принятия решения, обеспечивая интерпретируемость и лучшее обучение, поскольку способность обучения используется для наиболее значимых признаков.

TabNet состоит из нескольких компонентов, включая многоступенчатый архитектурный блок, который называется TabNetEncoder, а также специальный механизм выбора функций, называемый «adaptive feature selection». TabNetEncoder состоит из нескольких последовательных блоков, каждый из которых состоит из двух частей – внутреннего блока и механизма выбора функций. Внутренний блок содержит несколько слоев внимания, которые вычисляют взвешенную сумму значений входных признаков. Это позволяет модели учитывать взаимодействия между признаками и учитывать нелинейные зависимости между ними. Механизм

выбора функций осуществляет выбор наиболее информативных признаков и передает их в следующий блок. Adaptive feature selection- механизм выбора функций в TabNet позволяет модели автоматически выбирать наиболее значимые признаки для каждого примера. Он основан на механизме выбора функций на основе энтропии, который определяет, какие признаки являются наиболее информативными для текущего примера. Этот механизм позволяет модели использовать только те признаки, которые действительно важны для решения задачи, что может привести к более высокой точности и более быстрой обучаемости модели.

Общая архитектура TabNet состоит из TabNetEncoder, после которого следует несколько полносвязных слоев, которые выполняют финальную классификацию или регрессию.

Одной из особенностей TabNet является то, что она может работать с разнородными данными, такими как категориальные, бинарные, числовые и текстовые признаки, и обрабатывать их вместе. Кроме того, TabNet может работать с несбалансированными классами, так как механизм выбора функций помогает модели фокусироваться на наиболее информативных признаках для каждого класса.

TabNet также имеет ряд дополнительных функций, таких как возможность использования предобученных моделей для ускорения обучения новых моделей и возможность интерпретации результатов модели с помощью механизма визуализации признаков.

В целом, TabNet представляет собой мощный инструмент для обработки и анализа табличных данных, который объединяет преимущества различных методов машинного обучения и позволяет автоматически выбирать наиболее информативные признаки для каждого примера, что может помочь повысить точность модели и ускорить ее обучение.

Результаты работы модели TabNet представлены в таблице 5. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке представлено на рис. 8.

AutoGluon – это инструмент машинного обучения с открытым исходным кодом, разработанный компанией Amazon, который позволяет легко и быстро создавать высокопроизводительные модели машинного обучения для различных задач, включая классификацию, регрессию, кластеризацию, обнаружение аномалий и другие [3].

AutoGluon автоматически подбирает архитектуру модели, оптимизирует ее параметры и выбирает наиболее эффективный набор признаков для каждой задачи машинного обучения. Все это делается автоматически, без необходимости для пользователя задавать специальные параметры или конфигурации. Таким образом, AutoGluon упрощает и ускоряет процесс создания моделей машинного обучения.

Одной из особенностей AutoGluon является то, что он обеспечивает максимальную скорость и производительность моделей. AutoGluon использует оптимизированные алгоритмы и библиотеки машинного обучения, которые позволяют создавать модели с высокой точностью и эффективностью, работающие на различных аппаратных платформах.

AutoGluon также предоставляет интерфейс командной строки и библиотеки Python для интеграции в приложения и проекты машинного обучения. Это позволяет пользователям использовать AutoGluon как отдельный инструмент или в сочетании с другими библиотеками машинного обучения для создания настраиваемых решений.

В целом, AutoGluon представляет собой мощный и простой в использовании инструмент машинного обучения, который позволяет пользователям легко создавать высокопроизводительные модели машинного обучения для различных задач.

Результаты работы модели AutoGluon представлены в таблице 5. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке представлено на рис. 9.

CatBoost (Categorical Boosting) – это открытая библиотека градиентного бустинга на деревьях решений, которая разработана компанией Yandex. Она используется для решения задач классификации, регрессии и ранжирования. Основное отличие CatBoost от других библиотек бустинга заключается в его способности автоматически обрабатывать категориальные признаки.

CatBoost использует алгоритмы градиентного бустинга над деревьями решений, который построен на основе функции потерь, оптимизируемой градиентным спуском. Кроме того, CatBoost реализует ряд уникальных методов для обработки категориальных признаков, включая кодирование категориальных признаков на основе статистических методов и использование комбинированного алгоритма кодирования.

Одним из главных преимуществ CatBoost является его способность работать с большими объемами данных и обрабатывать категориальные признаки с высокой точностью и эффективностью. Кроме того, CatBoost позволяет использовать различные метрики качества для оптимизации моделей, включая MAE, RMSE, LogLoss, AUC и др. [4].

В CatBoost реализованы также различные функции интерпретации моделей, которые позволяют анализировать важность признаков, визуализировать деревья решений и многое другое.

Результаты работы модели CatBoost представлены в таблице 5. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке представлено на рис.10.

Табл. 5. Средняя абсолютная ошибка на тестовых выборках.

	AutoGluon	CatBoost	TabNet
	Тестовая выборка		
Средняя абсолютная ошибка	0.0091	0.0087	0.032
Средняя абсолютная ошибка в %	1.52	1.45	5.25

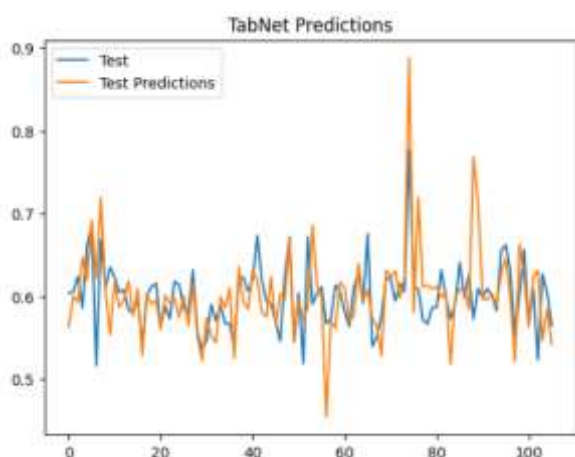


Рис. 8. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке модели TabNet.

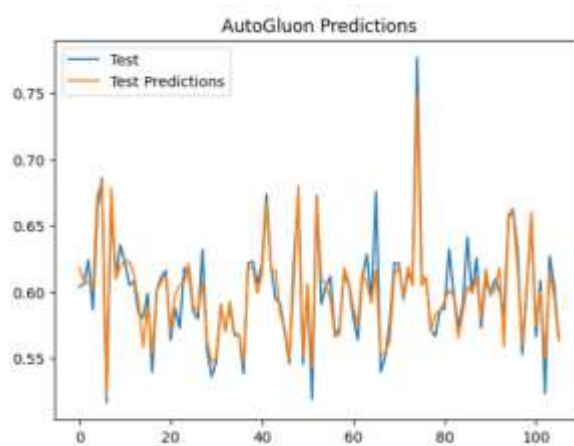


Рис. 9. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке модели AutoGluon.

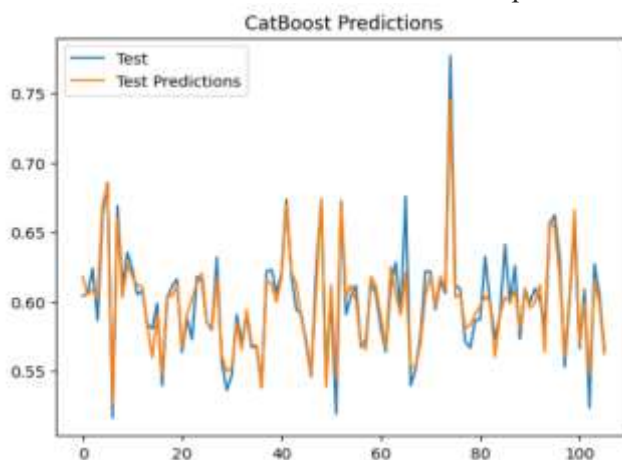


Рис. 10. Сравнение значений истинных (Test) и предсказанных (Test Predictions) на тестовой выборке модели CatBoost.

Выводы. В работе были протестированы нейронные сети с разными архитектурами для оценки качества вод: полносвязной, сверточной, рекуррентной, а также несколько предобученных моделей, таких как TabNet, AutoGluon, CatBoost. Результаты работы этих нейросетей представлены в итоговой таблице 6.

Табл. 6. Сравнение средней абсолютной ошибки на тестовых выборках.

Нейронные сети	Средняя абсолютная ошибка	Средняя абсолютная ошибка, %
Полносвязная	0.15	24.9
Сверточная	0.06	9.97
Рекуррентная	0.056	8.5
TabNet	0.032	5.25
AutoGluon	0.0091	1.52
CatBoost	0.0087	1.45

Таким образом, наилучшие параметры и архитектуры для оценки качества природно-техногенных вод дают предобученные модели AutoGluon и CatBoost. С помощью этих моделей получена наименьшая ошибка (1,52% и 1,45%) при прогнозе показателя АП. Предобученные модели AutoGluon и CatBoost в дальнейшем будут применены при разработке системы мониторинга качества воды, позволяя быстро и эффективно анализировать данные и выделять изменения в качестве воды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Потанов В.П., Мазикин В.П., Счастливцев Е.Л., Вахлаева Н.Ю.* Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: Наука, 2005. 660 с.
- [2] Обучение на табличных данных. TABNet. Часть 1. <https://habr.com/ru/articles/534186> (дата обращения 02.06.2023).
- [3] AutoGluon. <https://auto.gluon.ai/stable/index.html> (дата обращения 02.06.2023).
- [4] CatBoost <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=CatBoost> (дата обращения 02.06.2023).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО АРХИВА ДАННЫХ МОДЕЛИ GFS

Токарев А.В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Рассматривается программно-технологическое решение для автоматической загрузки, обработки и создания локального архива результатов расчетов модели GFS по заданным территориям. На основе архива данных реализовано формирование исторических трендов по отдельным показателям на заданную область в виде CSV таблиц. Обсуждаются особенности обработки многоканальных растровых данных в системе управления базами данных PostgreSQL.

Ключевые слова: модель GFS, атмосфера, данные реанализа, база данных, временные тренды, ГИС.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE SOLUTION FOR GENERATING A LOCAL DATA ARCHIVE FOR THE GFS MODEL

Tokarev A. V.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

A software and technological solution for automatic loading and processing of a local archive of the results of calculations of the GFS model for given territories is considered. On the basis of the data archive, the formation of historical trends for individual indicators for a given area in the form of CSV tables is supported. The features of processing multichannel raster data in the PostgreSQL database management system are discussed.

Keywords: GFS model, atmosphere, reanalysis data, time trends, GIS.

Введение. При решении задач мониторинга состояния окружающей природной среды во многих случаях необходимы метеорологические данные. В России такую информацию предоставляет Гидрометцентр и региональные управления Росгидромета. Организация оперативного получения такой информации требует специальных договоров и финансирования. В тоже время во многих странах в рамках больших государственных проектов создаются глобальные многолетние архивы данных реанализа и прогноза на основе компьютерных моделей атмосферы, данных дистанционного зондирования и прямых измерений. Качество информации и открытый доступ к данным приводит к значительному интересу со стороны многих научно-исследовательских проектов.

Компьютерные модели атмосферы обычно подразделяют на классы в соответствии с пространственным масштабом моделируемых явлений (глобальные, региональные и мезомасштабные). В моделях глобальной циркуляции атмосферы рассматриваются процессы планетарного масштаба, при этом используются данные всех доступных метеонаблюдений, включая прямые наблюдения (с помощью наземных станций, самолётов, метеозондов) и данные дистанционного зондирования (со спутников, наземных радаров и лидаров) [1].

В настоящее время выходные данные нескольких глобальных моделей прогноза погоды (GFS, GEM, ICON, ПЛАВ) в формате GRIB2 находятся в открытом доступе, и могут быть использованы для исследований [2]. Кроме прогнозов, представляют интерес данные реанализа, которые обеспечивают многомерную, пространственно-полную и согласованную информацию о глобальной атмосферной циркуляции. В отличие от архивных анализов погоды из оперативных систем прогнозирования, реанализ производится с помощью одной версии системы ассимиляции данных, включая используемую модель прогноза [3]. Во многих случаях результаты расчетов глобальных моделей используются в качестве начальных данных и граничных условий для более мелкомасштабных моделей.

В работе исследуется технология загрузки и обработки данных Глобальной системы прогнозирования (GFS). Показано, что использование результатов современных глобальных моделей атмосферы оправдано и имеет хорошие перспективы для решения разного круга прогностических задач метеорологии и экологии [4]. Есть результаты, говорящие о хорошей применимости метеоданных модели GFS в задачах исследования состояния атмосферы города Красноярска [5,6]. Данные модели GFS используются для прогноза пожарной опасности растительности природными факторами, и антропогенные условия на примере Дальнего Востока России [7]. Как показывает многолетний опыт, накопленный в ИКИ РАН [8], данные анализа более востребованы в различных системах дистанционного мониторинга, по сравнению с прогнозными данными.

Похожая задача решалась в ИКИ РАН для организации работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга [8]. В дальнейшем полученные результаты были использованы как один из модулей в системе «Вега-Science» [9]. Авторам была выбрана программно-технологическая платформа Perl + MySQL. На текущий интерес к языку программирования Perl стремительно падает среди мирового сообщества [10]. Это затрудняет развитие предложенных решений. Кроме того, не удалось найти публикаций с детальным описанием внутренних структур и алгоритмов. Поэтому решено было исследовать построение технологию обработки данных GFS на более современной платформе PHP + PostgreSQL / PostGIS.

Целью работы является разработка программно-технологического решения для автоматической загрузки, обработки и формирования локального архива результатов расчетов модели GFS для заданных территорий. Выделены следующие задачи:

- создание структуры локального архива данных;
- проектирование базы данных для хранения метаданных о архиве;
- организация регулярной автоматической загрузки результатов расчетов модели GFS и обрезка по заданным территориям меньшей площади;
- подготовка растровых данных и их регистрация для последующей генерации производных продуктов и временных трендов средствами СУБД.

Материалы и методы исследования. GFS – это численная модель прогноза погоды, разработанная NCEP, которая генерирует данные по десяткам переменных параметров атмосферы и почвы, включая температуры, ветры, осадки, влажность почвы, концентрацию озона в атмосфере и др. Модель развивается начиная с 1980 года, на текущий момент работает 16 версия [11]. GFS выдает прогноз по всему земному шару на сетке с разрешением 0.25° (~27 км) на 10 суток вперед с шагом в один час. Обновляется прогноз 4 раза в сутки. По вертикали рассчитывается 127 слоев, простирающихся до мезопаузы. GFS состоит из четырех отдельных моделей (атмосфера, океаническая модель, модель земли/почвы и морского льда), которые работают вместе для точного отображения погодных условий. Актуальный список кодов всех выдаваемых параметров модели является стандартизированным и доступен на сайте NCEP [12].

Результаты расчетов модели доступны в виде файлов формата GRIB2 – это открытый стандарт, используемый во всем мире для хранения и обмена метеорологическими данными с координатной привязкой [13]. Файл состоит из независимых записей с 2D-данными, каждая запись состоит из заголовка (разрешение сетки, время, переменная, уровень) и самих двоичных данных. Файлы с архивными и актуальными результатами расчетов модели GFS доступны на внешних серверах с покрытием всего земного шара. Размер каждого файла в формате GRIB2 с пространственным разрешением 0.25° около 500 Мб. Во многих исследованиях требуются данные на локальные территории гораздо меньшего размера и целесообразно заранее сформировать архив таких данных в автоматическом режиме. Таким образом повысится доступность данных и скорость их обработки. Кроме этого, появится возможность вычислять производные параметры и их временные тренды на основе архива исторических данных.

Для получения данных модели GFS выбрано два источника данных. Актуальные данные за последние 10 дней скачиваются с сервера NCEP по адресу <https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.<YYYYMMDD>/<HH>/atmos/gfs.t<HH>z.pgrb2.0p25.<FD>>, где:

- <YYYYMMDD> – дата расчета,
- <HH> – расчетный час UTC (00, 06, 12, 18),
- <FD> – глубина прогноза (f000 – данные анализа, f001 – прогноз на 1 час вперед, ..., f384 – прогноз на 16 дней вперед).

Архивные данные публикуются на сервере National Center for Atmospheric Research (NCAR) по адресу: <http://rda.ucar.edu/data/ds084.1>. Скачивание доступно после предварительной регистрации на ресурсе.

На текущем этапе обрабатываются только данные анализа (f000) и прогнозные данные на 6 часов вперед (f006). Последние добавлены, поскольку в них есть параметры, связанные с осадками.

Для хранения атрибутивных и пространственных данных выбрана популярная СУБД PostgreSQL 12 с расширением PostGIS 3. Для работы с GRIB файлами использована программа wgrib2 [14]. Это консольная программа с открытым исходным кодом для обработки и преобразования файлов формата GRIB2.

Служба обработки данных построена на основе свободно распространяемых технологий и программного обеспечения с возможностью развертывания под разные операционные системы. Основным языком программирования выбран PHP 7.4 с использованием фреймворка для разработки масштабируемых веб-приложений Yii 2 (<https://www.yiiframework.com>). Фреймворк в основном ориентирован на построение веб-приложений, но также имеет полнофункциональную поддержку для создания консольных приложений и служб. Для удобного управления зависимостями в PHP-приложении использован менеджер пакетов Composer (<https://getcomposer.org>).

Результаты исследования и их обсуждение. Локальный архив результатов расчетов модели GFS решено создавать в файловой системе. Используется следующий формат структуры папок и наименования файлов: «<region>/<YYYY-MM>/gfs.<YYYYMMDDHH>.<RES>.<FD>.grib2», где:

- <region> – уникальное кодовое наименование территории, по границам которой будут обрезаться данные и храниться внутри папки;
- <YYYY-MM> – год и месяц даты расчета (например, 2023-03);
- <YYYYMMDDHH> – дата расчета с точностью до часа (например, «2023030112» – 1 марта 2023 12:00 UTC);
- <RES> – детализация сетки расчета (например, для сетки 0.25° – 0p25);
- <FD> – глубина прогноза (f000 – данные анализа, f006 – прогноз на 6 часов вперед).

Территории и их границы определяются оператором при настройке системы. Файлы разбиваются на подпапки по месяцам для снижения количества файлов в одной папке, а следовательно, и нагрузки на файловую систему. Дополнительно генерируется вспомогательный json-файл с метаданной, в котором перечислены все каналы, их характеристики и статистика. Эти данные рассчитывает утилита wgrib2, при запуске с параметрами «-header» и «-stat». Основные характеристики каналов:

- **n** – индекс/номер канала по порядку в растровом файле;
- **type** – кодовое наименование расчетного параметра;
- **level** – кодовое наименование слоя/уровня (например: «surface», «2 m above ground», «900 mb», «0.995 sigma level»);
- **forecast** – вид прогноза (например: «anl» – данные анализа, «6 hour fcst» – прогноз на 6 часов вперед, «0-6 hour ave» – среднее значение за 6 часов).

В результате структура локального архива получилась достаточно независимой и понятной без использования специализированного программного обеспечения. Интересующие

файлы с данными можно подобрать непосредственно в файловой системе, скопировать на локальный компьютер для обработки или передать другим исследователям.

СУБД PostgreSQL поддерживает хранение и обработку пространственных данных в векторном и растровом виде внутри базы данных, для этого используется широкий набор функций расширения PostGIS. Одной из особенностей является поддержка «out-db» растровых данных, которые размещаются не внутри базы данных, а отдельно в файловой системе. В БД сохраняются только метаданные раstra: ширина, высота, количество каналов, геопривязка и путь к фактическому растровому файлу. Такое решение ограничивает избыточный рост размера базы данных при хранении не реляционных данных. В то же время, доступен весь спектр функций PostGIS для обработки пространственных данных. Для активации поддержки этой функции необходимо выполнить SQL команды:

- ALTER DATABASE <db> SET postgis.enable_outdb_rasters = true;
- ALTER DATABASE <db> SET postgis.gdal_enabled_drivers TO 'ENABLE_ALL';

Но к сожалению, у PostGIS есть особенность при работе с «out-db» растрами – в них будут доступны только первые 256 каналов. Для работы с данными GFS это существенный недостаток, поскольку актуальная версия модели формирует на выходе порядка 700 каналов в GRIB файлах. Для обхода этой проблемы была реализована автоматическая сегментация файлов с растровыми данными на несколько файлов по 256 каналов.

Кроме того, соответствие номеров каналов и параметров, слоев, видов прогноза не фиксировано и зависит от версии модели, которая выполняла обработку. Поэтому в базе данных необходимо фиксировать это соответствие для каждого файла.

Базовый алгоритм загрузки данных состоит из следующих шагов:

- Определение даты и времени файла, который отсутствует в архиве данных.
- Формирование URL адреса файла с данными.
- Загрузка GRIB2 файла с внешнего сервера во временную папку.
- Регистрация файла в базе данных включая структуру каналов.
- Цикл по зарегистрированным регионам.
 - Формирование канонического пути в локальном архиве (<name>).
 - Обрезка загруженного раstra по границам регионам и запись полученного файла в локальный архив (<name>.grib2).
 - Формирование вспомогательного файла с метаинформацией (<name>.json).
 - Сегментация раstra в отдельные файлы по 256 каналов (<name>.t0, ... <name>.t3).
 - Регистрация полученных сегментов в базе данных в виде «out-db» растров, связанных с регионом и основным растром.

Для хранения информации о содержимом локального файлового архива, организации наполнения, а также для дальнейшей обработки разработана база данных. Основные сущности базы данных, связанные с загрузкой данных, показаны на рис. 1.

Справочник регионов (t_regions) содержит все зарегистрированные территории, по которым собираются растровые файлы. Основные атрибуты: region_id – идентификатор, code – кодовое наименование, name – пользовательское наименование, extent – границы территории.

Справочник наборов показателей предназначен для стандартизации используемых наборов каналов в каждом растре. Таблицы t_ind_types, t_ind_levels, t_ind_forecasts являются простыми справочниками величин, выдаваемых моделью. Первичным ключом служит соответствующее кодовое значение. Текстовые наименования (поля name), расшифровывающие кодовые значения, загружены из описания модели GFS. Показателем названа сущность (t_indicators), которая характеризует отдельный канал в растре, это объединение таких величин, как: параметр модели (type), слой (level) и вид прогноза (forecast).

Зарегистрированные наборы показателей хранятся в таблице t_sets. При добавлении нового раstra передается json-метаинформация с упорядоченным списком каналов и их характеристиками. Для каждого канала определяется соответствующий показатель, либо создается новый, если такая комбинация {type, level, forecast} еще не встречалась в справочнике. В ре-

зультате получается упорядоченный массив идентификаторов показателей. Далее выполняется поиск набора показателей (*t_sets*) с аналогичным массивом показателей, либо создается новый, если такой набор еще не был зарегистрирован.

Результаты расчетов (*t_images*) – это все обработанные растровые файлы модели GFS. Каждый растр характеризуется параметрами: *image_date* – дата-время расчета, *resolution* – разрешение сетки, *forecast* – вид прогноза, *set_id* – ссылка на используемый набор показателей.

После обрезки файлов с результатами расчета модели по каждому региону и созданию сегментированных растровых файлов, они регистрируются в таблице *t_image_regions*. Ввиду описанных ограничений, созданы несколько полей для хранения сегментов растрового изображения по 256 канала в каждом (*rast_0*, ..., *rast_3*). Для загрузки либо регистрации «out-db» растра в базе данных используется консольная утилита *raster2pgsql*, которая распространяется в составе PostGIS. Возможности утилиты ограничены, поэтому используется временная таблица *t_image_load*, в которую загружается файл на первом этапе. После загрузки, данные в формате *raster* перемещаются в основную таблицу *t_image_regions* в поле соответствующего сегмента (*rast_0*, ..., *rast_3*).

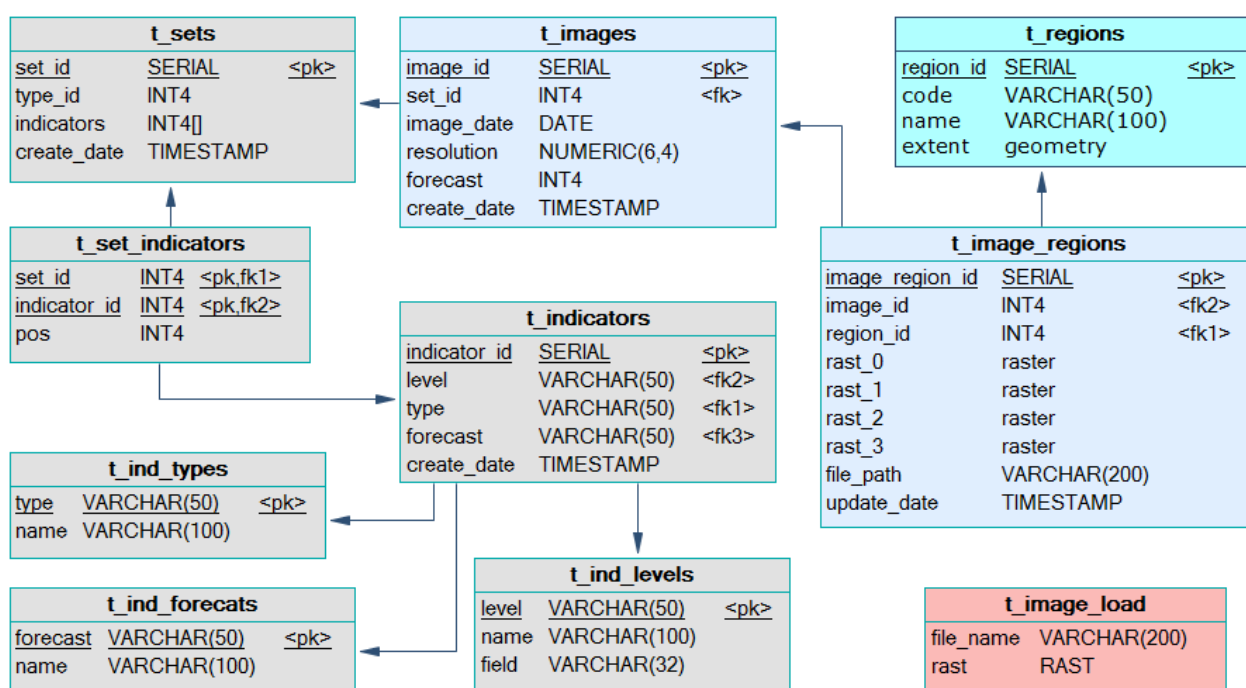


Рис. 1. Фрагмент физической модели базы данных.

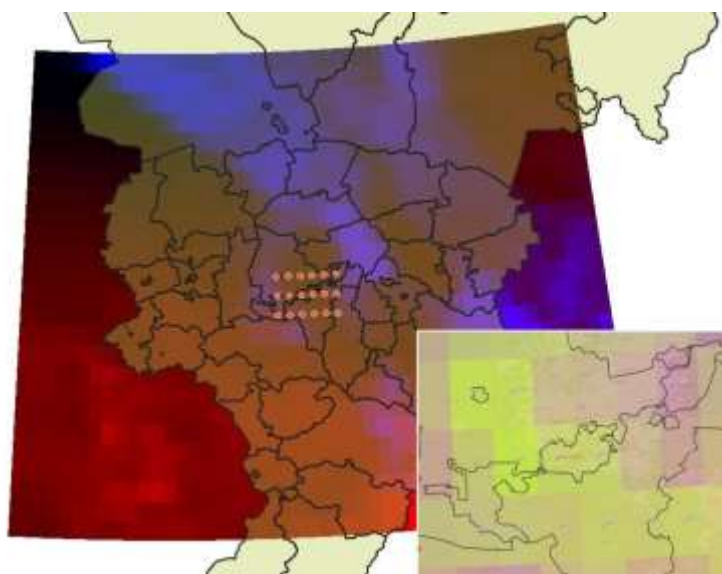


Рис. 2. Пример визуализации данных модели GFS на центральную часть Красноярского края.

В результате в базе данных формируется согласованный архив растровых данных по результатам, выдаваемым моделью GFS, подготовленный для обработки и вычисления производных продуктами средствами PostGIS.

Для тестирования разработанной службы были выбраны две потенциально интересные территории для сбора данных и созданы соответствующие регионы: Россия (широта 41°–82°, долгота 19°–192°) и центральная часть Красноярского края (широта 53°–59°, долгота 87°–99°), последняя показана на рис. 2. Для актуальной версии модели примерный объем одного растра на весь мир составляет 500Мб, на территорию России – 50Мб, на центральную часть Красноярского края – 1 Мб. Видно, что после обработки объем данных существенно уменьшается. Выполнена загрузка доступных архивных данных начиная с 2007 года. До февраля 2015 года модель выдавала данные с пространственным разрешением 0.5°, после – с пространственным разрешением 0.25°. Настроено расписание регулярного запуска службы загрузки для постоянного пополнения архива данных.

Заключение. При решении задач мониторинга состояния окружающей природной среды во многих случаях можно использовать метеорологические данные, генерируемые глобальными моделями циркуляции атмосферы. Применение свободно распространяемых технологий и программных библиотек достаточно для создания службы автоматической загрузки, обработки и формирования локального архива результатов расчетов модели GFS для заданных территорий. Предложенная структура локального архива на основе файловой системы с возможностью доступа по FTP без использования специализированного программного обеспечения оказалась удобна для пользователей. Обработка многоканальных растровых файлов с результатами модели GFS непосредственно в СУБД PostgreSQL позволяет решать широкий спектр задач, несмотря на некоторые ограничения. Сформированная база данных с данными модели GFS, подготовлена для дальнейшей обработки и вычисления производных продуктов средствами PostGIS. В том числе и формирования исторических трендов по отдельным показателям на заданную точку или область в виде CSV таблиц. Разработанное решение подходит для обработки данных и других глобальных моделей атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Светашев А.Г., Дорожко Н.В.* Численный анализ атмосферных процессов: электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 02 «Гидрометеорология». Минск: БГУ, 2021. С. 96.
- [2] *Толстых М.А.* Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 5-33.
- [3] *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P. и др.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. Т. 137, № 656. С. 553-597.
- [4] *Залиханов М.Ч., Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Беккиев К.М.* О возможности использования выходной продукции глобальной модели атмосферы GFS NCEP в экологических исследованиях // Геология и геофизика Юга России. 2021. № 4.
- [5] *Володько О.С., Дергунов А.В.* Дисперсионный анализ зависимости концентрации взвешенных частиц PM_{2.5} в атмосфере г. Красноярска и метеоусловий // Труды VII Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2022. С. 195-198.
- [6] *Дергунов А.В., Якубайлик О.Э.* Влияние метеорологических факторов на экологическое состояние атмосферы в Красноярске // Труды VII Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2022. С. 208-211.
- [7] *Glagolev V.A., Zubareva A.* GFS model-based short-term fire weather forecasting // 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics SPIE, 2018. С. 28.
- [8] *Уваров И.А., Халикова О.А., Балашов И.В., Бурцев М.А. и др.* Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 30-45.

- [9] *Лузян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В. и др.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 9-31.
- [10] Google Trends. <https://trends.google.ru/trends/explore?date=today5-y&q=php,c%23,java,perl&hl=ru> (дата обращения: 01.03.2023 г.).
- [11] The Global Forecast System GFS). https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php (дата обращения: 01.03.2023 г.).
- [12] NCEP Products Inventory. <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs> (дата обращения: 01.03.2023 г.).
- [13] NCEP WMO GRIB2 Documentation, version 29.0.0. https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/docs/grib2/grib2_doc (дата обращения: 01.03.2023 г.).
- [14] wgrib2: Utility to read and write grib2 files. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2> (дата обращения: 01.03.2023 г.).

УЛУЧШЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ СНИМКОВ ДЗЗ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКИХ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Фаворская М.Н., Пахирка А.И.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск

Реконструкция фрагментов снимка ДЗЗ на основе глубоких генеративно-сопоставительных сетей является одним из активно развивающихся направлений исследований. При этом ставится задача реконструкции фрагментов сверхвысокого разрешения с использованием одного снимка. В данной работе предлагается модель генеративно-сопоставительной сети, позволяющая восстанавливать контуры и сохранять текстурные особенности реконструируемого изображения. Для обучения сетей использовались открытые наборы данных. Приведены объективные оценки 4-х кратного увеличения фрагментов снимков ДЗЗ в зависимости от артефактов и сформулированы рекомендации по применению нейросетевых моделей.

Ключевые слова: спутниковые снимки, сверхвысокое разрешение, глубокое обучение.

GAN-BASED REMOTE SENSING SINGLE-IMAGE RESOLUTION IMPROVEMENT

Favorskaya M.N., Pakhirka A.I.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies, Krasnoyarsk

Reconstruction of remote sensing image fragments based on deep generative adversarial networks is one of the actively developing areas of research. In this case, the task is to reconstruct super-resolution fragments using a single image. In this paper, we propose a generative adversarial network model that can reconstruct the contours and preserve the texture features of the reconstructed image. Open datasets were used to train the networks. Objective assessments of a 4-fold increase in fragments of remote sensing images depending on artifacts are given and recommendations are formulated for the use of neural network models.

Keywords: satellite images, super-resolution, deep learning.

Введение. На спутниковых снимках и снимках ДЗЗ объекты интереса зачастую являются малоразмерными. Современные одноэтапные и двухэтапные детекторы такие, как YOLOv8, RetinaNet, SSD, Faster R-CNN и EfficientDet-D5, находят объекты среднего и большого размера, однако не могут обнаружить малоразмерные объекты (например, автомобиль, занимающий площадь 8×3 пикселей). В то же время снимки ДЗЗ высокого разрешения не всегда доступны, поэтому возникает задача алгоритмической реконструкции снимка низкого разрешения (LR, Low Resolution) в снимок так называемого сверхвысокого разрешения (SR, Super Resolution). Снимок SR является синтезированным и не совпадает с реальным снимком высокого разрешения (HR, High Resolution). С математической точки зрения задача реконструкции изображения из LR снимка является некорректной. В последние годы была поставлена задача обнаружения малоразмерных объектов на снимках ДЗЗ сверхвысокого разрешения (RSSOD, Remote Sensing image Super-resolution Object Detection) [1, 2]. Также задача поиска изменений на снимках ДЗЗ через длительные временные интервалы требует повышения разрешения изображений [3].

Обзор существующих решений. Методы создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения достигли определенных успехов в последние годы, и эти успехи связаны с разработкой сложных моделей глубоких нейронных сетей, а именно генеративно-сопоставительных сетей (ГСС). Общеизвестным является тот факт, что для реконструкции снимков ДЗЗ целесообразно применять методы улучшения разрешения на основе одного изображения (так называемые методы SISR, Single Image Super-Resolution), поскольку доступным, как правило, является единственный снимок ДЗЗ в конкретный временной период. Таким образом, методы, использующие

в качестве входных данных несколько снимков ДЗЗ (методы MISR, Multi Image Super-Resolution) в докладе не рассматриваются.

Традиционно методы SISR реализовывались на основе интерполяции (билинейной, бикубической и т.д.) и реконструкции (предварительного профиля градиента, интерактивной обратной проекции, с применением регуляризации и т.д.). В настоящее время активно развиваются методы на основе глубокого обучения, когда интерполяция используется в качестве предварительной обработки, а реконструкция внедряется в саму модель глубокой нейронной сети.

В первых работах использовались сверточные нейронные сети (СНС) [4]. Были разработаны такие модели, как VDSR (Very Deep Super-Resolution) [5], RED-Net (very deep Residual Encoder-Decoder Network) [6] и RCAN (very deep Residual Channel Attention Network) [7]. Перечисленные модели СНС выполняли реконструкцию, используя исключительно технологию обучения с учителем (при наличии парных LR-HR изображений). Обучение ГСС более разнообразно и включает обучение с учителем, обучение без учителя и трансферное обучение. Эффективно ГСС превосходят СНС по результатам реконструкции, поэтому основное направление связано с развитием моделей ГСС. Классической ГСС считается модель SRGAN [8], предложенная в 2017 г. Однако активное применение ГСС для реконструкции снимков ДЗЗ началось с 2019 г.

Отметим, что развитие методов SISR выполняется в двух направлениях. Основным направлением считается разработка методов создания снимков ДЗЗ сверхвысокого разрешения без привязки к дальнейшей практической задаче, иными словами разработка нейросетевых моделей сверхвысокого разрешения. Менее представительным направлением является интерпретация проблемы SISR с точки зрения практической задачи, когда в общей модели объединяются ГСС для реконструкции и соответствующая СНС в виде детектора объектов [2], сиамской сети [9] для поиска изменений во времени, семантической сегментации [10] и т.д. В последнем случае, как правило, используется относительно простая модель ГСС для получения снимка SR.

Анализ моделей ГСС показал, что основными направлениями развития моделей ГСС для решения проблемы SISR являются следующие:

- улучшение контуров;
- улучшение текстуры;
- повышение реалистичности снимков сверхвысокого разрешения;
- реконструкция мультиспектральных и гиперспектральных снимков;
- повышение производительности и стабильности обучения.

Предлагаемая модель. Одним из недавно предложенных направлений повышения реалистичности создаваемых SR снимков является метод последовательной генерации высококачественных снимков на основе каскадной сети. Такое решение позволило получить хорошие результаты при восстановлении изображений лиц [11], распознавании 3D объектов [12], аугментации медицинских микроскопических изображений [13] и т.д. Однако для реконструкции снимков ДЗЗ такие решения не применялись.

Предлагаемая модель глубокой сети включает три основных компонента: состязательное обучение, сохранение контуров и прогрессивное масштабирование. Она содержит несколько идентичных каскадов, повышающих разрешение $\times 2$. Каждый каскад обладает сложной структурой, состоящей из трех модулей: модуля пространственного сверхвысокого разрешения – модуля ПСВР, модуля частотного сверхвысокого разрешения – модуля ЧСВР (с помощью дискретного вейвлет-преобразования) и модуля пост-обработки для объединения результатов работы двух предыдущих модулей. Таким образом, каждый каскад обладает двумя ветвями. Для модуля повышения разрешения изображений в качестве базовой модели используется хорошо зарекомендовавшая себя модель ESRGAN (Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network) [14]. Модель ESRGAN имеет модифицированную структуру генератора, в котором слои пакетной нормализации заменены остаточным плотным блоком (RRDB, Residual-in-

Residual Dense Block), объединяющим многоуровневую остаточную сеть и плотные соединения. Модуль дискретного вейвлет-преобразования построен на модели DWSR (Deep Wavelet SR) [15]. Модель DWSR вначале выполняет дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) входного пространственного изображения, затем повышает разрешение изображения в ДВП-представлении и, наконец, выполняет обратное ДВП. Предлагаемая архитектура модели представлена на рисунке 1.

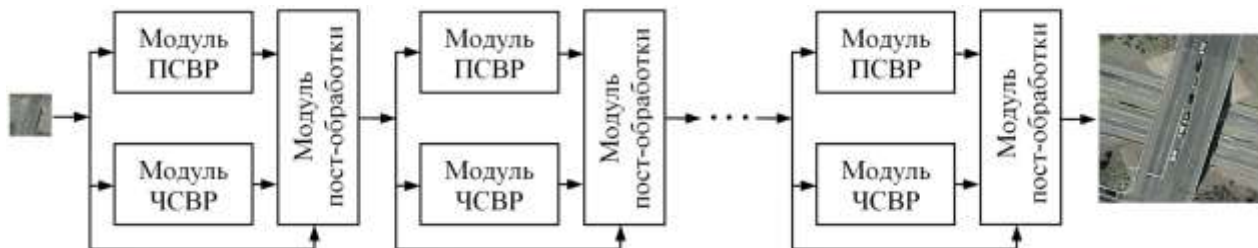


Рис. 1. Предлагаемая архитектура глубокой сети.

В простейшей форме генератор ГСС изучает отображение $z \rightarrow y$, где z – некоторый случайный скрытый вектор, который транслируется в пространство признаков, определяемое выходным вектором y . Если ГСС используется для перевода одного изображения в другое, то задача генератора состоит в том, чтобы изучить отображение $x \rightarrow y$ входного вектора x на выходной вектор y . Это делается путем преобразования x в скрытый вектор z , $x \rightarrow z$, а затем в выходной вектор y , $z \rightarrow y$. В данном случае изучается сопоставление входного LR снимка ДЗЗ реконструированному SR снимку ДЗЗ.

ГСС изучают сопоставления между входными и выходными данными с помощью составительной функции $\min \max L(G, D)$, которую реализуют генератор G и дискриминатор D с функцией потерь $L(G, D)$. Таким образом, целевая функция ГСС имеет вид:

$$\min \max L(G, D) = E_y [\log(D_y)] + E_{x,z} [\log(1 - D(x|G(x|z)))]$$

Для оценки потерь генератора G рассчитывается среднеквадратическая ошибка (потери L2) для предотвращения размытия:

$$L2(G) = E_{x,y,z} [\sqrt{(y - G(x|z))^2}]$$

Экспериментальные исследования. Для обучения и тестирования предложенной модели глубокой сети использовались два открытых набора данных Aerial Image Dataset (AID) [16] и UC-Merced [17]. Набор данных AID содержит 10000 изображений разрешением 600×600 пикселей, принадлежащих 30 классам (аэропорты, стадионы, поля, пляжи, мосты, коммерческая застройка, пустыня, посевные площади, лес, горы, парки, стоянки, детские площадки, порты, железнодорожные станции, реки, школы, жилые массивы, площади, виадуки и т.д.). Набор данных UC-Merced содержит более 2000 изображений разрешением 256×256 пикселей, принадлежащих 21 классу. Для аугментации данных все изображения подвергались только горизонтальному отражению.

Предварительные эксперименты выявили сложности в получении высококачественных SR изображений ДЗЗ (рисунок 2), что требует дальнейших экспериментальных исследований с усовершенствованной архитектурой на основе ГСС, а также улучшения процесса обучения.

Предлагаемая модель была реализована на языке Python с использованием репозитория Pytorch. В экспериментах применялась видеокарта NVIDIA Geforce RTX 2080 Ti (11 ГБ). Операционная система – MS Windows 10.

Для оценки качества полученных SR изображений применялись различные метрики: пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio) и индекс структурного сходства (SSIM, Structure Similarity). Однако высокое значение PSNR полученного изображения не гарантирует высокого визуального качества. Бикубическая интерполяция может иметь более высокое значение PSNR, чем выходные результаты моделей ГСС, несмотря на то, что

выходные изображения ГСС характеризуется лучшим восприятием с точки зрения человека. Поэтому, дополнительно для оценки визуального качества изображений использовалась метрика LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity). Метрика LPIPS [18] активно применяется для измерения сходства восприятия между изображениями, созданными глубокими нейросетевыми моделями. В таблице 1 представлены результаты реконструкции снимков ДЗЗ их тестовых наборов данных. Более высокие значения метрики LPIPS означают большие различия в изображениях, а более низкие значения – большее сходство.

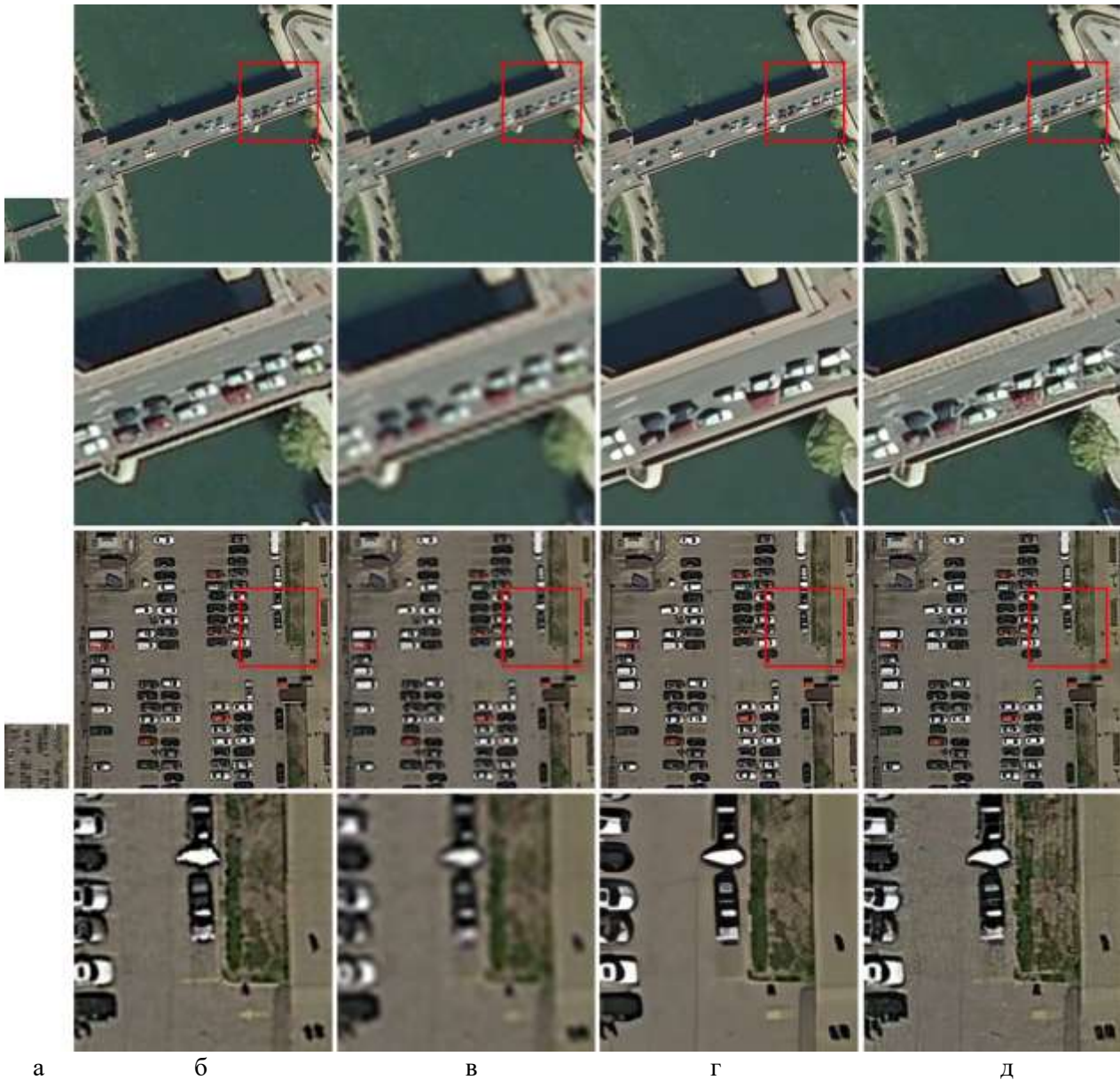


Рис. 2. Примеры SR изображений с увеличенными фрагментами: а) входное изображение с разрешением 150×150 пикселей, б) оригинальное изображение с разрешением 600×600 пикселей, в) четырехкратное увеличение с использованием бикубической интерполяции, г) четырехкратное увеличение моделью ESRGAN, д) четырехкратное увеличение предложенной моделью.

Табл. 1. Средние значения показателей реконструированных снимков ДЗЗ.

Метод	PSNR, дБ	SSIM	LPIPS
Бикубическая интерполяция	28,95	0,89	0,175
ESRGAN	27,76	0,88	0,119
Предложенная модель	28,45	0,88	0,096

Полученные объективные оценки свидетельствуют о том, что разработанная модель способна обеспечить качественную генерацию изображений сверхвысокого разрешения, сохраняя при этом их текстурные особенности. Было выяснено, что небольшая облачность, присутствующая на исходных снимках ДЗЗ, принципиально не влияет на работу предложенной нейросетевой модели.

Заключение. Предложенная нейросетевая модель на основе ГСС может генерировать более реалистичные снимки ДЗЗ. Данный подход характеризуется повышенной чувствительностью к деталям изображения. Этого не могут обеспечить нейросетевые модели на основе СНС, что приводит к чрезмерной размытости и исчезновению текстурных особенностей. Отметим, что потеря текстурных особенностей является общей проблемой любых методов получения снимков сверхвысокого разрешения. Применение вейвлет-преобразования позволяет сохранить контуры и повысить четкость изображения. Будущие модификации разработанной модели направлены на повышение ее производительности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Courtrai L., Pham M. T., Lefevre S. Small object detection in remote sensing images based on super-resolution with auxiliary generative adversarial networks // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. N. 19. P. 3152.1-3152.19.
- [2] Bashir S.M.A., Wang Y. Small object detection in remote sensing images with residual feature aggregation-based super-resolution and object detector network // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. N. 9. P. 1854.1-1854.21.
- [3] Parelius E.J. A review of deep-learning methods for change detection in multispectral remote sensing images // *Remote Sensing*. 2023, V. 15. N. 8. P. 2092.1-2092.30.
- [4] Dong C., Loy C.C., He K., Tang X. Image super-resolution using deep convolutional networks // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2016. V. 38. N. 2. P. 295-307.
- [5] Kim J., Lee J.K., Lee K.M. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. IEEE: Las Vegas, NV, USA. P. 1646-1654.
- [6] Mao X.J., Shen C., Yang Y.B. Image restoration using convolutional auto-encoders with symmetric skip connections // In: Lee D.D., Sugiyama M., Luxburg U.V., Guyon I., Garnett R. (eds) *Advances in Neural Information Processing Systems: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2016*, Barcelona, Spain. 2016. ANIPS, V. 29. P. 2802-2810.
- [7] Zhang Y., Li K., Li K., Wang L., Zhong B., Fu Y. Image super-resolution using very deep residual channel attention networks // In: Ferrari, V., Hebert, M., Sminchisescu, C., Weiss, Y. (eds) *Computer Vision – ECCV 2018*. 2018. Springer: Cham. LNCS, V. 11211. P. 294-310.
- [8] Ledig C., Theis L., Huszar F., Caballero J., Aitken A., Tejani A., Totz J., Wang Z., Shi W. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. IEEE: Honolulu, HI, USA. P. 105-114.
- [9] Hou B., Liu Q., Wang H., Wang Y. From W-Net to CDGAN: Bi-temporal change detection via deep learning techniques // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. V. 58. N. 3. P. 1790-1802.
- [10] Salgueiro L., Marcello J., Vilaplana V. SEG-ESRGAN: A multi-task network for super-resolution and semantic segmentation of remote sensing images // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. N. 22. P. 5862.1-5862.28.
- [11] Zhang Y., Yu X., Lu X., Liu P. Pro-UIGAN: Progressive face hallucination from occluded thumbnails // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2022. V.31. P. 3236-3250.
- [12] Muzahid A.A.M., Wanggen W., Sohel F., Bennamoun M., Hou L., Ullah H. Progressive conditional GAN-based augmentation for 3D object recognition // *Neurocomputing*. 2021. V. 460. P. 20-30.
- [13] Zhou, Q., Yin, H. A U-Net based progressive GAN for microscopic image augmentation // In: Yang, G., Aviles-Rivero, A., Roberts, M., Schönlieb, CB. (eds) *Medical Image Understanding and Analysis*. 2022. Springer: Cham. LNCS, V. 13413. P. 458-468.
- [14] Wang X., Yu K., Wu S., Gu J., Liu Y., Dong C., Qiao Y., Loy C.C. ESRGAN: Enhanced super-resolution generative adversarial networks // In: Leal-Taixé, L., Roth, S. (eds) *Computer Vision – ECCV 2018 Workshops*. 2019. Springer, Cham. LNCS, V. 11133. P. 63-79.

- [15] *Guo T., Mousavi H.S., Vu T.H., Monga V.* Deep wavelet prediction for image super-resolution // 2017 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognit. Workshops (CVPRW). 2017. IEEE: Honolulu, HI, USA. P. 104-113.
- [16] *Xia G.-S., Hu J., Hu F., Shi B., Bai X., Zhong Y., Zhang L.* AID: A benchmark dataset for performance evaluation of aerial scene classification // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. N. 7. P. 3965-3981.
- [17] UC Merced Land Use Dataset. <http://weegeee.vision.ucmerced.edu/datasets/landuse.html> (дата обращения 06.06.2023).
- [18] *Zhang R., Isola P., Efros A.A., Shechtman E., Wang O.* The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018. IEEE: Salt Lake City, UT, USA. P. 586-595.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Чурсин В.В., Косторная А.А., Голомолзин В.В.

Сибирский центр Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Новосибирск

В работе рассмотрена возможность детектирования атмосферных явлений на основе восстановленных по спутниковым измерениям вертикальных профилей температуры и удельного влагосодержания при помощи алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. Представлен алгоритм коррекции спутниковых данных позволяющий уменьшить ошибку восстановления вертикальных профилей метеовеличин не менее чем на 38 %. Выявлена достоверность детектирования атмосферных осадков 82 – %, грозы – 85%.

Ключевые слова: опасные явления, реанализ ERA5, детектирование гроз, конвективная облачность.

THE USE OF MACHINE LEARNING IN THE DETECTION AND MONITORING OF ATMOSPHERIC PHENOMENA

Chursin V.V., Kostornaya A.A., Golomolzin V.V.

Siberian Center of the Federal State Budgetary Institution «Scientific Research Center of Space Hydrometeorology «Planeta», Novosibirsk

The possibility of detecting atmospheric phenomena with satellite-derived vertical profiles of temperature and specific humidity using machine learning and neural network algorithms is discussed. The algorithm of satellite data correction makes it possible to reduce the error of satellite-derived vertical profiles by at least 38 % is presented. The reliability of precipitation detection 82 %, and thunderstorms detection – 85 % was revealed.

Keywords: hazard phenomena, ERA5 reanalysis, thunderstorm detection, convective cloudiness.

Введение. Согласно статистическим данным, в России 40 % всех случаев опасных метеорологических явлений приходится на опасные явления (ОЯ), связанные с зонами образования активной конвекции. Основные трудности своевременного прогнозирования конвективной облачности и связанных с ней опасных метеорологических явлений обусловлены большой пространственной и временной изменчивостью облачности и сложностью усвоения информации о ее физических характеристиках в прогностических региональных мезомасштабных моделях.

На территории Западной Сибири, в настоящее время, отмечается увеличение частоты появления конвективной облачности и сумм осадков за теплый период [1], более того, в последние десятилетие отмечается смещение границ активной конвекции на север [2], а по данным [3], на территории Западной Сибири в целом доминируют осадки ливневого и смешанного характера.

Современные спутниковые измерительные приборы и технологии обработки спутниковых данных позволяют обнаруживать уже сформированные опасные грозовые ячейки. В работе [4] представлена методика автоматизированного распознавания гроз по информации с космических аппаратов (КА) серии NOAA, которая показывала хорошую согласованность с данными наземной сети. Непрерывный мониторинг молний над Северной и Южной Америкой, Тихим и Атлантическим океанами обеспечивается данными с геостационарных спутников программы GOES, которые были запущены в 2016 и 2017 гг. [5]. Himawari-8 расширяет зону мониторинга Тихого и добавляет зону Индийского океана. Использование геостационарных спутников, неоспоримо, имеет ряд преимуществ, но в то же время результаты мониторинга зарождения конвекции и ее раннего предупреждения справедливы только для территорий до 40–45° широты. Севернее 45° широты справедливо использование спутниковых данных с полярно-орбитальных космических аппаратов для мониторинга зон развития конвекции.

В задачу настоящего исследования входила разработка технологии детектирования атмосферных явлений на основе восстановленных вертикальных профилей температуры и удельного влагосодержания, полученных с полярно-орбитальных космических аппаратов (приборов AMSU/MHS КА серий NOAA, MetOp и прибора ATMS КА Suomi-NPP).

Краткое описание технологии детектирования атмосферных явлений. При реализации представляемой технологии был использован метод «обучение с учителем». Процесс обучения с учителем представляет собой предъявление модели выборки эталонных обучающих примеров. За эталонные данные были приняты:

- 1) Данные ERA5 – это новейший реанализ климата, произведенный ECMWF, предоставляющий ежечасные данные по параметрам атмосферы, поверхности суши и состояния моря вместе с оценками неопределенности. Данные ERA5 доступны по 37 уровням давления начиная с 1979 года по настоящее время и имеют периодичность в один час, при пространственном разрешении $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. ERA5 является результатом ассимиляции данных 4D-Var в CY41R2 интегрированной прогнозной системе ECMWF (IFS), которая в свою очередь включает в себя данные наземной наблюдательной сети и данные аэрологического зондирования [6];
- 2) Данные наземной наблюдательной сети. Записи об атмосферных явлениях и времени их начала и окончания на 135 метеорологических станциях Сибири в период май-октябрь 1990-2018 гг. (рисунок 1).

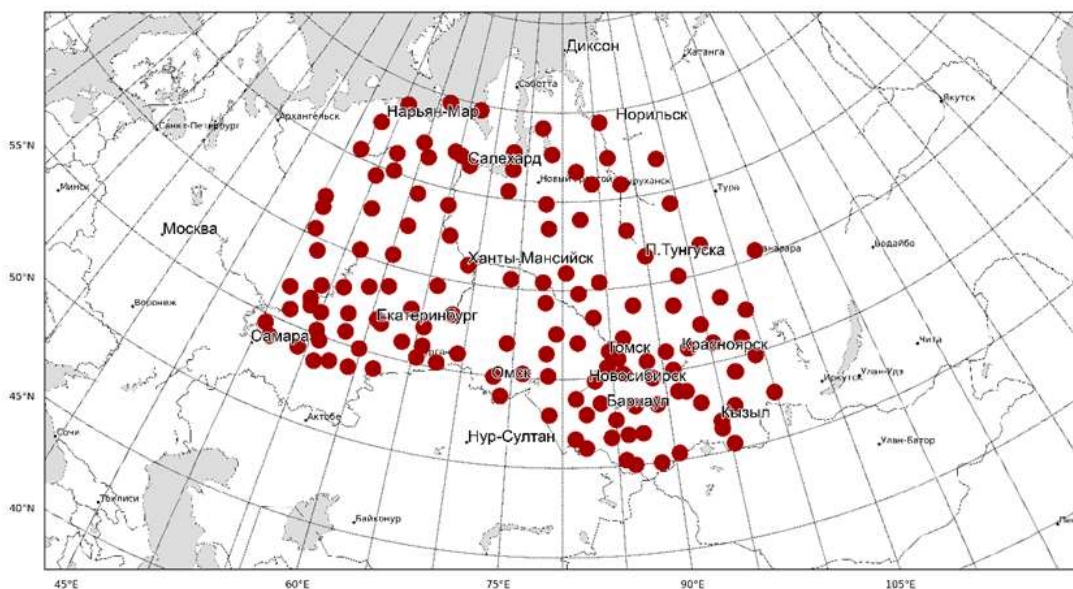


Рис. 1. Пространственное распределение используемых метеорологических станций.

Данные наземных наблюдений и реанализа совмещались в пространстве и времени. Использовалась разница во времени не более 5 минут, а профили метеопараметров строились по ближайшему узлу сетки. Итоговый массив содержал в себе данные о метеорологических явлениях и сопутствующие им значения характеристик атмосферы (вертикальные профили температуры, удельного влагосодержания, относительной влажности, температуры точки росы, дефицита точки росы и индексы неустойчивости Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, K-индекс, а также значения давления на уровне станции и высота нижней границы конвективной облачности). Общий объем массива составляет 1 325 245 записей.

Для реализации обучения и тестирования математических моделей массив данных был случайным образом разделен на обучающий и тестовый в соотношении 70 % на 30 % с сохранением количественного распределения явлений. В работе использовался подход, когда для каждого из атмосферных явлений создается свой бинарный классификатор и результаты его расчета являются дополнительным предиктором для результирующей модели. В качестве бинарных классификаторов выступают обученные при помощи градиентного бустинга XGBoost деревья решений. Обучение бинарных классификаторов проводилось путем подачи на вход

обучающей выборки и итеративного перебора значений гиперпараметров до достижения наилучшего результата на тестовом массиве. Отклонение точностей на тестовой и обучающей выборке не должно превышать 2 %. Таким образом, для каждого из атмосферных явлений была подобрана своя архитектура. В качестве результирующей модели выступает мультиклассификационная полносвязная нейронная сеть. Обучение нейронной сети производилось путем подбора весовых коэффициентов до момента, пока значения точности на тестовой выборке не перестают увеличиваться на протяжении 10 последовательных проходов по всему массиву данных.

Получены следующие значения точности:

- 1) модель бинарной классификации – 72,1 % / 72,3 % (обучающая/тестовая);
- 2) мультиклассификационная нейронная сеть прямого распространения (без использования результатов бинарной классификации) – 72,4 % / 72,3 % (обучающая/тестовая);
- 3) мультиклассификационная нейронная сеть прямого распространения (с использованием результатов бинарной классификации) – 82,1 / 81,8 % (обучающая/тестовая).

Таким образом, предложенный подход использования результатов бинарной классификации в качестве дополнительных предикторов позволяет увеличить точность детектирования атмосферных явлений, в среднем, на 10 %. Результирующая архитектура алгоритма детектирования атмосферных явлений представлена на рисунке 2.

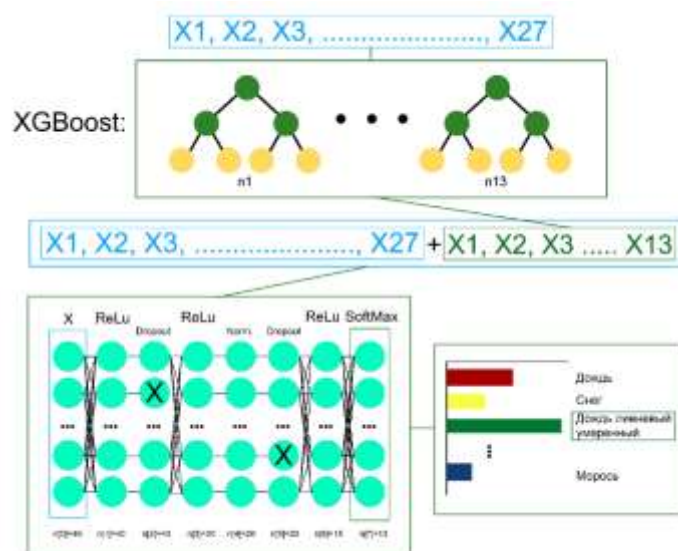


Рис. 2. Схема архитектуры алгоритма детектирования атмосферных явлений.

Для оценки возможности использования разработанной технологии на данных спутникового зондирования были проведены оценки точности восстановления метеорологических параметров по спутниковым данным для территории Сибири. Значения метеорологических параметров, восстановленных по профилям с помощью дистанционного зондирования, сравнивались с данными реанализа ERA5, принятыми за эталон. Сравнение проводилось при временной разнице в наблюдениях не более 5 минут и только в точках полного пространственного соответствия. Расхождение значений метеопараметров, восстановленных по спутниковым данным, с данными реанализа представлены в таблице 1 в графе «до корректировки». Так, метеопараметры были скорректированы на основе эталонных данных. В таблице 1 в графе «после корректировки» представлены оценки точности данных спутникового зондирования относительно эталонных данных для удельного влагосодержания и температуры после корректировки.

Разработанная процедура предварительной коррекции данных позволила уменьшить значения среднеквадратической ошибки для температуры, в среднем, на 42 %, а для удельной влажности – на 38 %. Коррекция всех метеопараметров происходит параллельно, что позволяет в значительной степени увеличить скорость обработки.

Табл. 1. Расхождение значений метеопараметров, восстановленных по спутниковым данным, с данными реанализа до и после корректировки.

Переменная (Т - температура, Q – удельная влажность; стан- дартная изобари- ческая высота, гПа)	До корректировки			После корректировки		
	Средне-квадратиче- ская ошибка	Средняя квадра- тичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка	Средне-квадратиче- ская ошибка	Средняя квадра- тичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка
T 1000 гПа	3,47	12,07	2,65	2,07	4,9	1,68
T 900 гПа	3,78	14,28	3,00	1,89	4,53	1,6
T 850 гПа	2,98	8,86	2,32	1,71	3,77	1,47
T 700 гПа	1,90	3,62	1,45	1,16	1,69	0,98
T 500 гПа	1,62	2,64	1,21	1,06	1,32	0,85
T 300 гПа	2,03	4,13	1,61	1,42	2,14	1,1
Q 1000 гПа	1,70	2,89	1,30	1,03	1,31	0,86
Q 900 гПа	1,43	2,06	1,11	0,95	1,11	0,79
Q 850 гПа	1,31	1,72	1,01	0,93	1,04	0,75
Q 700 гПа	0,97	0,93	0,75	0,75	0,67	0,6
Q 500 гПа	0,36	0,13	0,25	0,27	0,08	0,21
Q 300 гПа	0,048	0,002	0,033	0,03	0,0014	0,026

Для уменьшения ошибок технологии детектирования атмосферных явлений был разработан блок корректировки атмосферных профилей, восстановленных по спутниковым данным, состоящий из 12 обученных нейронных сетей прямого распространения. Блок-схема процедуры составления массива для обучения нейронных сетей представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема процедуры составления массива для обучения нейронных сетей.

Оценки достоверности технологии. В валидационных испытаниях данные наземных наблюдений из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД, содержащей данные о типах атмосферных явлений, их интенсивности и времени начала/окончания использовались как эталонные. Испытания проводились на 135 метеорологических станциях Сибирского региона, ограниченного 50-70° с.ш. и 50-100° в.д., за период май – октябрь 2019-2020 гг. Итоговый массив содержал 52 730 записей, из них 967 случаев с грозой, 18 266 случаев с осадками различной интенсивности / фазового состояния и 33 497 случаев отсутствия явлений. Оценочные характеристики таблицы сопряженности бинарных прогнозов рассчитывались в соответствии с РД 52.27.284-91 [7].

Из 18 266 явлений с осадками, зафиксированных на метеорологических станциях, моделями правильно определены атмосферные явления в 14 969 случаях, что составляет 82 %. Наименьшая общая оправдываемость отмечалась при детектировании мороси и сильных ливневых осадков – 79 % и 78 %, соответственно. Лучшие показатели детектирования у ливневого

умеренного дождя и ливневого мокрого снега – 87 % и 83 %, соответственно. Наибольшая оправдываемость наличия явления (76 %) отмечалась для ливневого умеренного дождя, наименьшая у снежных зерен – 56 %. Максимальное значение предупрежденности факта наличия явления у ливневого умеренного дождя (92 %) и ливневого мокрого снега (84 %), минимальное значение у мороси (75 %), снежных зерен (71 %) и снежной крупы (75 %).

Всего, из содержащихся в массиве 967 случаев с грозой на станции, гроза правильно выделена в 821 случае (85 %). Отсутствие грозы верно определено в 83 % случаев.

Заключение. В работе приводится разработанная архитектура технологии детектирования атмосферных явлений, основанная на технологиях машинного обучения и нейронных сетях. Используются модели бинарной классификации, полученные при помощи градиентного бустинга (XGBoost). Результаты бинарной классификации являются дополнительными предикторами и подаются на вход основной мультиклассификационной полносвязной нейронной сети, где выходной сигнал каждого нейрона подается в качестве входного сигнала всем последующим нейронам. Функция активации на скрытых слоях нейросети выступает – Rectified linear unit (ReLU), функция активации на выходном слое – Softmax. Алгоритм обучен на данных реанализа ERA5 и восстановленных профилях атмосферных параметров по измерениям приборов AMSU/MHS КА серии NOAA, MetOp и прибора ATMS КА Suomi NPP. Оценка достоверности детектирования вероятных зон атмосферных явлений проводилась на основе информации из открытой базы данных ВНИИГМИ МЦД за период с 1990 по 2020 год. В валидационных испытаниях участвовало 135 метеорологических станций Сибирского региона, ограниченного 50-70° с.ш. и 50-100° в.д. Достоверность определения атмосферных явлений составила 82%, грозы – 85%.

Представленный алгоритм динамичен. Процедуру обучения можно инициировать ежегодно, при накоплении достаточного количества данных, что позволит учитывать появление новых экстремумов атмосферных характеристик. Использование представленной технологии и результатов ее расчетов перспективно в качестве консультативного материала при составлении краткосрочного прогноза погоды в оперативной работе синоптических групп.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бардин М.Ю., Егоров В.И., Громов С.А. и др. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Государственный гидрологический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации. Москва. 2021. 104 с.
- [2] Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108-117.
- [3] Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г., Булыгина О.Н., Семенов В.А. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 5-18.
- [4] Алексеева А.А., Бухаров М.В. Диагноз гроз по синхронной информации спутниковых радиометров микроволнового и инфракрасного диапазонов // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 29-37
- [5] Goodman S.J. et al. GLM lightning cluster-filter algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document // NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research. Washington, DC, V. 2012. V. 3. P. 73.
- [6] Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Т. 146. №. 730. С. 1999-2049.
- [7] РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов. Л: Гидрометеоиздат, 1991.

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В ЗАДАЧЕ РУДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Штабель Н.В.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

Задачи рудной геофизики отличаются малой глубиной объектов и небольшими временами записи сигналов. В работе проводится численное моделирование трехмерного электрического поля в среде с рудным телом, находящемся на разном удалении от источника поля. Анализ сигналов ЭДС в приемных катушках показал, что наибольший отклик от рудного тела регистрируется в положении, когда источник находится в точке над объектом.

Ключевые слова: шриффт – электромагнитное поле, сигналы ЭДС, рудная геофизика, математическое моделирование.

ANALYSIS AND PROCESSING OF NEAR FIELD SOUNDING DATA IN ORE GEOPHYSICS

Shtabel N.V.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk

The problems of ore geophysics are characterized by shallow depth of objects and short signal recording times. In this work the numerical simulation of the three-dimensional electric field in the medium with an ore body located at different distances from the field source is carried out. The analysis of EMF signals in the receiver coils showed that the greatest response from the ore body is registered in the position when the source is at a point above the object.

Keywords: electromagnetic field, EMF signals, ore geophysics, mathematical modeling.

Введение. Метод зондирования становлением поля (ЗСБ) основан на регистрации сигналов ЭДС от геологической среды после выключения электрического поля в генераторной петле, возбуждающего электромагнитное поле [1]. Изоповерхности возбужденного в среде тока и электрического поля имеют форму тороида, сформировавшегося под генераторной петлей. На начальных временах сразу после выключения тока размеры тороида сопоставимы с размерами генераторной петли. С течением времени электромагнитное поле распространяется по геологической среде таким образом, что его максимум движется от генераторной петли по лучу под углом 26° к поверхности раздела сред «воздух-земля» [2]. Чем длительнее проводятся измерения ЭДС, тем дальше и глубже распространяется максимум электромагнитного поля и тем сильнее затухает измеряемый сигнал. Степень затухания сигналов ЭДС зависит от электропроводности и строения геологической среды. Как правило измерения методом ЗСБ проводят на соосных установках, т.е. когда центры генераторной и приемных петель совпадают. Это дает одну точку измерения, в которой и проводят интерпретацию измеренных сигналов в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели среды.

Однако такой подход к интерпретации не всегда дает корректный результат для задач рудной геофизики с учетом характера распространения электромагнитного поля. Задачей рудной геофизики является поиск и оконтуривание рудных залежей. Рудное тело, находящееся на некотором удалении от точки измерений, может дать искажение сигнала ЭДС, которое в рамках одномерной интерпретации даст ошибочное представление о геоэлектрическом разрезе. Целью данной работы было с помощью численного моделирования сигналов ЗСБ для среды с рудным телом оценить влияние рудного тела на измеряемые сигналы в зависимости от удаления от точки записи.

Численное моделирование проводилось с помощью вычислительной схемы на базе векторного метода конечных элементов на тетраэдральных сетках [3]. Особенностью численного моделирования электрического поля для метода ЗСБ является учет геометрии источника поля (генераторной петли) на уровне сеточной дискретизации, адаптивная схема аппроксимации по

времени с увеличением шага по времени и необходимость относить границу расчетной области на достаточно большое расстояние от источника, чтобы не исказить измеряемый сигнал.

Постановка задачи. Для решения задачи зондирования среды методом становления поля систему уравнений Максвелла представляют в виде гиперболического уравнения второго порядка относительно напряженности электрического поля:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{J} - ток в генераторной петле, t - время моделирования, μ - магнитная проницаемость среды, ε - диэлектрическая проницаемость среды, σ - электропроводность среды. Для исследуемых сред $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$, поэтому токами смещения $\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ можно пренебречь, т.к. эта величина много меньше токов проводимости $\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. В результате получаем уравнение, описывающее процесс распространения электрического поля в проводящей среде:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t},$$

Для решения уравнения воспользуемся векторным методом конечных элементов. Определим ряд функциональных пространств, в которых будем искать решение [4, 5]:

$$H(\operatorname{rot}, \Omega) = \{\vec{u} \in L^2(\Omega) \mid \nabla \times \vec{u} \in L^2(\Omega)\}$$

$$H_0(\operatorname{rot}, \Omega) = \{\vec{u} \in H(\operatorname{rot}, \Omega) \mid \vec{u} \times \vec{n}|_{\partial\Omega} = 0\}$$

С соответствующим скалярным произведением и нормами:

$$(\vec{u}, \vec{v})_{\Omega} = \int_{\Omega} \vec{u} \cdot \vec{v} dx, \quad \|\vec{u}\| = \sqrt{(\vec{u}, \vec{u})_{\Omega}},$$

$$\|\vec{u}\|_{H(\operatorname{grad}, \Omega)}^2 = \|\vec{u}\|_{\Omega}^2 + \|\nabla \vec{u}\|_{\Omega}^2, \quad \|\vec{u}\|_{H(\operatorname{rot}, \Omega)}^2 = \|\vec{u}\|_{\Omega}^2 + \|\nabla \times \vec{u}\|_{\Omega}^2$$

Для задачи (1) сформулируем вариационную постановку:

Для заданного $\vec{J} \in L^2(\Omega) \times (0, T)$ найти $\vec{E} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ такое, что $\forall \vec{W} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ выполняется

$$(\mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E}, \operatorname{rot} \vec{W})_{\Omega} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} = - \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} - \int_{\partial\Omega} \mu^{-1} (\vec{W} \times \vec{n}) \operatorname{rot} \vec{E} dS \quad (2)$$

Для построения дискретного аналога вариационной задачи (2) будем аппроксимировать функции пространства $H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$ элементами дискретного подпространства $H^h(\operatorname{rot}, \Omega)$, определенного как

$$H^h(\operatorname{rot}, \Omega) = \operatorname{span}\{\vec{W}_1, \vec{W}_2, \dots, \vec{W}_n\} \subset H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$$

Конечномерное решение уравнения E^h можно представить в виде разложения по базису пространства

$$\vec{E}^h(x, t) = \sum_{i=1}^N e_i(t) \vec{W}_i(x), \quad \vec{W}_i \in H^h(\operatorname{rot}, \Omega) \quad (3)$$

Определим условия на границах области моделирования Ω .

$$\vec{E} \times \vec{n}|_{\partial\Omega} = 0 \quad (4)$$

Условия (4) – так называемые условия «большого бака»: требования обращения в ноль тангенциальной компоненты электрического поля на внешней границе среды. Дискретный аналог вариационной задачи (2) принимает вид:

Для $\vec{J} \in L^2(\Omega) \times (0, T)$ найти $\vec{E}^h \in H^h(\text{rot}, \Omega) \times (0, T)$ такое, что $\forall \vec{W}^h \in H^h(\text{rot}, \Omega) \times (0, T)$ выполняется

$$(\mu^{-1} \text{rot} \vec{E}^h, \text{rot} \vec{W}^h)_{\Omega} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}^h}{\partial t}, \vec{W}^h \right)_{\Omega} = - \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \vec{W}^h \right)_{\Omega} \quad (5)$$

С учетом разложения (3) запишем задачу (5) в матричном виде:

$$A\vec{e} + \sigma C \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = - \frac{\partial \vec{F}}{\partial t}$$

где

$$[A]_{ij} = \int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot} \vec{W}_i \cdot \text{rot} \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e$$

$$[C]_{ij} = \int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e$$

$$[F]_i = \int_{\Omega} \vec{J} \cdot \vec{W}_i d\Omega, \quad i = 1, N_e$$

Диапазон времен, для которого необходимо проводить измерения ЭДС, как правило, составляет от микросекунд до сотен миллисекунд. Использование схемы аппроксимации по времени с постоянным шагом для таких задач не целесообразно: большой шаг по времени приведет к неточностям решения в начале диапазона времен, приемлемый шаг в начале измерений потребует слишком большого количества итераций по времени для достижения больших времен измерения. Для аппроксимации задачи (5) по времени использовалась неявная трехслойная схема с изменяющимся шагом по времени [6]:

$$\begin{cases} A\vec{e}^n + C \frac{\vec{e}^n - \vec{e}^{n-1}}{\tau} = - \frac{\vec{F}^n - \vec{F}^{n-1}}{\tau}, & t \in (0, T_1) \\ A\vec{e}^n + C \frac{\vec{e}^n - \vec{e}^{n-1}}{\tau} = 0, & t \in (T_1, T_2) \end{cases}$$

где T_1 - время отключения источника тока, T_2 - время окончания моделирования, τ - шаг аппроксимации по времени. Достаточно малые шаги по времени в начале измерений постепенно увеличиваются и позволяют за небольшое количество итераций достигать больших времен измерений.

Вычислительный эксперимент. Рассмотрим задачу определения влияния рудного объекта на сигналы ЭДС. Возьмем в качестве рудного объекта параллелепипед со сторонами 300x300x200 м. Глубина залегания (до верхней кромки) - 300 м. Сопротивление рудного тела 2 Ом·м, сопротивление окружающей среды 50 Ом·м. Генераторная петля - квадрат со стороной 200 м, приемная петля – квадратная соосная с генераторной со стороной 100м.

Учитывая характер распространения электромагнитного поля, выберем следующие положения зондирующей установки относительно рудного тела:

- 1) установка над объектом: центр рудного тела и генераторной петли совпадают
- 2) установка смещена от центра рудного тела по оси Oх на 300 м
- 3) установка смещена от центра рудного тела оп оси Oх на 600 м
- 4) установка смещена от центра рудного тела оп оси Oх на 900 м

Установка смещается таким образом, что при передвижении на 300м луч распространения максимума электромагнитного поля пройдет над объектом. При смещении установки на 600 м луч распространения поля пересекает верхнюю грань объекта, а при смещении на 900м поле пройдет ниже рудного тела. В положении установки над объектом электромагнитное поле начнет распространяться от установки в сторону от рудного тела. Ожидается, что влияние объекта будет максимальным для установки, смещенной на 600м и минимальной для установки без смещения. Для оценки влияния объекта на сигналы ЭДС проведенные расчеты сравнивались с сигналами ЭДС, полученными для среды без объекта, т.е. полупространством.

На рисунке 1 представлены профили относительной погрешности сигналов ЭДС от времени для различных положений зондирующей установки. На профилях видно, что вопреки предположениям максимальный отклик от рудного тела наблюдается для установки без смещения, а минимальный для наибольшего удаления от объекта. Погрешность измерения в реальных приборах составляет 5% и разница сигналов менее 5% не может быть достоверно измерена. Таким образом объект на удалении 900м не идентифицируется по измерениям. Объект на удалении 600 м может быть идентифицирован в очень узком временном диапазоне (4 мс – 11 мс) с точностью более 5%. Для положения установки смещенного на 300м от объекта отклик от объекта наблюдается в диапазоне от 1 мс до 11 мс с максимальной погрешностью 15%, что значительно меньше, чем для установки без смещения (отклонение до 34%).

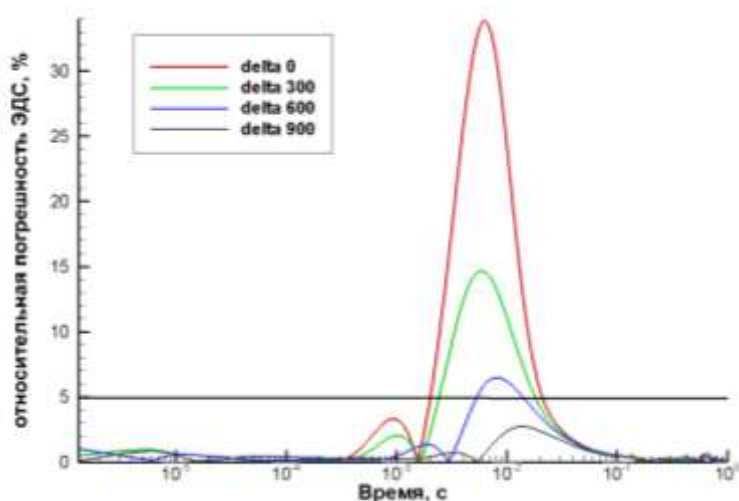


Рис. 1. Относительная погрешность ЭДС для моделей с различным расстоянием между источником поля и рудным телом относительно полупространства. Горизонтальной линией показан 5% порог.

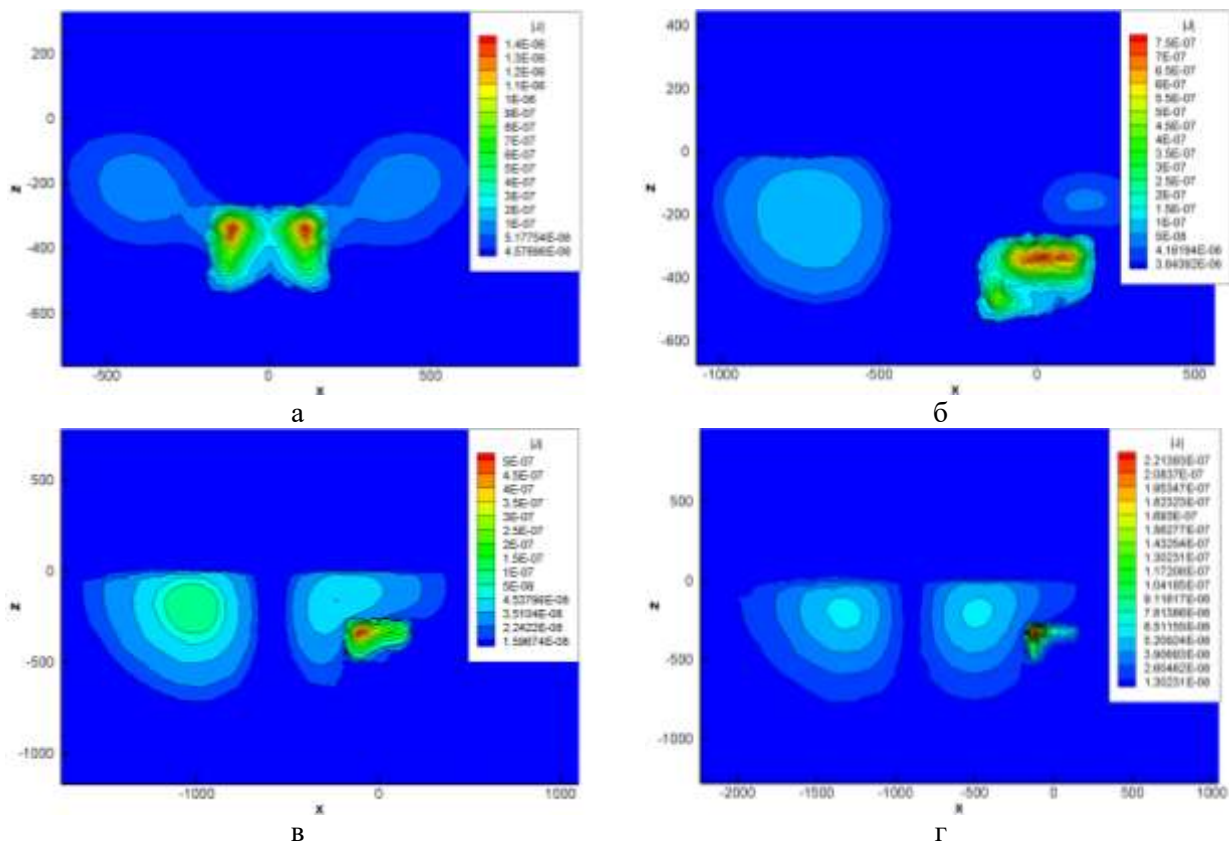


Рис. 2. Распределение модуля тока в сечении $y=0$. а – рудное тело под источником поля, б – рудное тело смещено от источника поля на 300м, в – рудное тело смещено от источника поля на 600м, г – рудное тело смещено от источника поля на 900м.

На рисунке 2 представлено распределение модуля тока в сечении $y=0$, проходящего через объект в момент времени 4 мс, что соответствует времени максимального отклонения сигналов ЭДС для моделей с объектом и без объекта. На рисунке 2а видно, что максимум тока находится внутри рудного тела. Несмотря на предположения о том, что электромагнитное поле будет распространяться вокруг объекта, по результатам расчетов поле и наведенные токи практически полностью заполнили объем рудного тела с сохранением замкнутой формы тороида.

На рисунке 2б показаны линии равного уровня модуля тока в сечении $y=0$ для рудного тела, смещенного на 300м от зондирующей установки. Видно, что максимум тока также находится внутри рудного тела, но значительная часть тока остается вне. Внутри объекта ток сосредоточен в плоскости верхней грани.

На рисунке 2в электрическое поле и ток упираются в ближний угол верхней грани рудного тела и внутри объекта формируется максимум тока вблизи верхней грани. Ток растекается по верхней и боковой грани ближней к источнику. На рисунке 2г показано, что ток частично формируется внутри объекта в ближнем к установке углу, но основная часть токового жгута остается снаружи.

Заключение. Численное моделирование распространения нестационарного электрического поля для задачи определения отклика от рудного тела по сигналам зондирования становлением поля показало, что наибольший отклик от рудного объекта регистрируются в положении зондирующей установки, находящейся прямо над рудным телом. Смещение источника поля от рудного объекта снижает уровень влияния руды на сигнал ЭДС. Рудные объекты на удалении в 600 м и более вносят погрешность в измеряемый сигнал менее 5% практически на всем диапазоне изменений. Для точного определения положения рудного тела недостаточно проводить измерения в одной точке. Рекомендуется проводить профильные измерения с шагом по профилю не более 500-600 м.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ FWZZ-2022-0030.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. Учебник для вузов. Пермь: Перм. ун-т, 2010. 400 с.
- [2] Эпов М.И., Сухорукова К.В., Антонов Е.Ю. Кинематика нестационарного электромагнитного поля в слоистых проводящих средах // Теория и практика магнитотеллурического зондирования (тезисы докладов конференции, Москва, 20-23 декабря 1994 г.). М., 1994, с. 11-12.
- [3] Штабель Н.В., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Корсаков М.А. Аппроксимация субвертикальной границы в задачах импульсных электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 1. С. 108-118.
- [4] Nedelec J.C. Mixed finite elements in R^3 // Numerische Mathematik, 1980, v. 35, № 3, p. 315-341.
- [5] Nedelec J.C. A new family of mixed finite elements in R^3 // Numer. Mathem. 1986, v. 50, p. 57-81.
- [6] Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с

**ОПЕРАТИВНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ВАЛОВОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ И НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Волков Н.В.^{1,2}, Лагутин А.А.^{1,2}, Мордвин Е.Ю.^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Барнаул

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

В работе приводятся количественные оценки первичной валовой продукции для территории Алтайского края и Новосибирской области, полученные в рамках подхода, основанного на использовании методов машинного обучения, в частности, на построении деревьев решений. Для предсказания значений целевой переменной в работе использовалась древовидная регрессионная модель Cubist. Обучающая выборка включает данные продуктов радиометра MODIS/Terra и реанализа ERA5 для 2021 г. Проведена валидация полученной модели. С использованием валидации по методу отложенной выборки для 2021 г. установлены метрики регрессии: коэффициент детерминации $R^2 = 0.95$ и среднеквадратическая ошибка $RMSE = 1.18 \text{ гСО}_2/(\text{м}^2 \text{ день})$. Анализ результатов, полученных с использованием кросс-валидации на тестовом наборе данных для 2022 г., позволяет сделать вывод о высоком качестве обучения модели и о возможности ее применения для моделирования первичной валовой продукции регионов.

Ключевые слова: первичная валовая продукция, машинное обучение, модель Cubist, метрики регрессии, hold-out split валидация, кросс-валидация.

PRACTICE OF MACHINE LEARNING METHODS FOR MODELLING THE PRIMARY GROSS PRODUCTION FOR THE TERRITORY OF ALTAI KRAI AND NOVOSIBIRSK REGION

Volkov N.V.^{1,2}, Lagutin A.A.^{1,2}, Mordvin E.Yu.^{1,2}

¹ Altai State University, Barnaul

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

The paper presents quantitative estimates of the primary gross production for the territory of the Altai krai and the Novosibirsk region, obtained within the framework based on the machine learning methods, in particular, on the construction of a decision trees. To predict the values of the target variable, the rule-based regression model Cubist was used in the work. The training sample includes data from products of MODIS/Terra radiometer and ERA5 reanalysis for 2021. The resulting model was validated. Using hold-out split validation for 2021, regression metrics were established: coefficient of determination $R^2 = 0.95$ and root mean square error $RMSE = 1.18 \text{ gCO}_2/(\text{m}^2 \text{ day})$. An analysis of the results obtained by cross-validation on a test data set for 2022 allows us to conclude about the high quality of training the model and the possibility of its application for modeling the primary gross production of the regions.

Keywords: primary gross production, machine learning, Cubist rule-based model, regression metrics, hold-out split validation, cross-validation.

Введение. Решение проблемы установления глобального углеродного бюджета требует получения достоверных оценок по объемам эмиссии и переработки углекислого газа (CO_2) – основного парникового газа на Земле, а также механизмов его циркуляции в системе «атмосфера-подстилающая поверхность». Актуальность этой проблемы обусловлена тревожными данными, публикуемыми ежегодно в бюллетене Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization, WMO) по содержанию парниковых газов в атмосфере [1], а также в ежегодном отчете о глобальном углеродном бюджете международного проекта Global Carbon Project [2]. Приведенные в [1] оценки показывают, что с начала индустриальной эры в 1750 г. содержание CO_2 в приземном слое атмосферы непрерывно увеличивалось с $\sim 278 \text{ млн}^{-1}$, достигнув в 2021 г. новых исторически максимальных значений $\sim 415.7 \pm 0.2 \text{ млн}^{-1}$ [1].

Скорость роста эмиссии CO₂ в постковидный период вернулась к значениям до 2019 г. и в 2021 г. составила $\sim 36.3 \pm 1.8$ ГтCO₂/год [2]. Рост эмиссии CO₂ в указанный период обуславливает дисбаланс глобального карбонового бюджета, составляющий -0.3 ГтC/год [2].

Одним из ключевых показателей глобального и регионального карбонового бюджета является первичная валовая продукция (Gross Primary Production, GPP). GPP определяет общее количество органического вещества, синтезированного автотрофными организмами (на суше это растения) из простых неорганических компонент. Основной компонентой переработки является атмосферный углекислый газ (CO₂).

Для получения достоверных оценок GPP с высоким пространственным и временным разрешением на глобальном или региональном уровне недостаточно данных, получаемых только наземными методами измерений. Ключевую роль в оценках GPP сегодня играют спутниковые данные (см., например, работы [3-9]).

В последние пятнадцать лет в задачах установления баланса CO₂, активно используются методы машинного обучения. Так, в серии работ [5-9] показан опыт применения регрессионных моделей для установления GPP на региональном уровне с использованием данных наземного и спутникового мониторинга в качестве обучающих параметров моделей.

В работе для получения количественных оценок первичной валовой продукции для территории Алтайского края и Новосибирской области реализуется подход, основанный на использовании методов машинного обучения, в частности, на построении деревьев решений.

Целью работы является обучение древовидной регрессионной модели Cubist [10] для получения количественных оценок первичной валовой продукции регионов. Обучающая и тестовая выборки модели включают данные продуктов радиометра MODIS [11-13], расположенного на борту спутника Terra [14], а также результаты реанализа ERA5 [15] для территории Алтайского края и Новосибирской области за 2021-2022 гг.

Обучающая и тестовая выборки данных. Для формирования обучающей выборки модели Cubist в работе использовались данные следующих продуктов радиометра MODIS/Terra:

- первичная валовая продукция (GPP) [16],
- усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI) [17] (дополнительно использовались среднегодовые значения EVI),
- температура подстилающей поверхности (Land Surface Temperature, LST) [18],
- тип растительности (Land Cover Type, LCT) по классификации UMD университета Мэрилэнда [19].

На рисунке 1 показаны границы Алтайского края и Новосибирской области и тип подстилающей поверхности регионов.

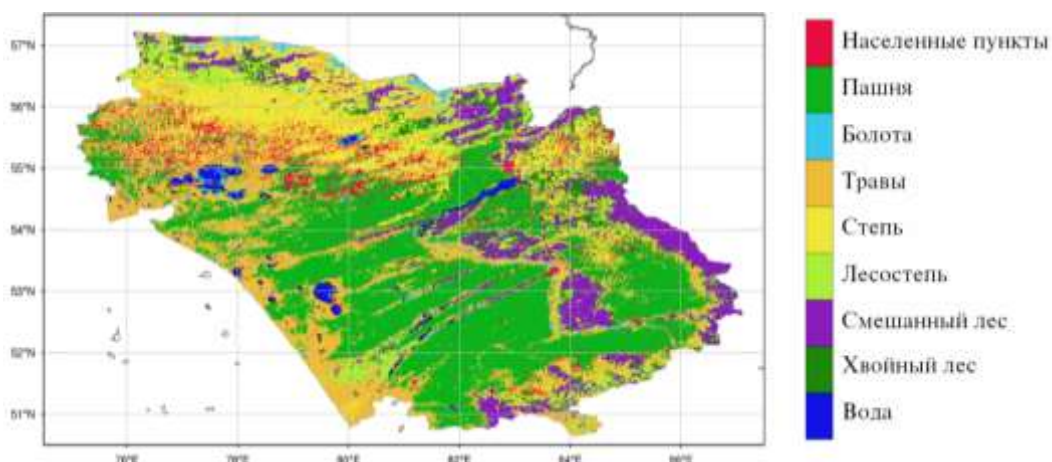


Рис. 1. Тип растительности (продукт MCD12Q1) по классификации UMD университета Мэрилэнда [19], используемый в обучающей и тестовой выборках модели.

Дополнительно использовались результаты реанализа ERA5, подготовленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,

ECMWF): нисходящее коротковолновое излучение (Downward Shortwave Radiation, SW) и дефицит давления водяного пара (Vapor Pressure Deficit, VPD). Продукт VPD не входит в стандартный перечень атмосферных продуктов ERA5. Однако определение VPD позволяет получить эту величину по данным для приземной температуры воздуха (продукт T2M) и температуры точки росы (продукт D2M). По определению

$$VPD = SVP \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right),$$

где SVP (Saturated Vapour Pressure) – давление насыщенного пара, т.е. максимальное количество водяного пара, содержащегося в воздухе при определенной температуре; RH (Relative Humidity) – относительная влажность.

Величина SVP выражается через T2M из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$SVP = 610.78 \times \exp\left(\frac{17.625 T2M}{T2M + 243.04}\right).$$

В данном выражении T2M – температура приземного слоя воздуха, выраженная в градусах Цельсия, размерность [SVP] = кПа.

Относительная влажность RH также может быть выражена через температуру

$$RH = 100 \times \frac{\exp\left(\frac{17.625 D2M}{D2M + 243.04}\right)}{\exp\left(\frac{17.625 T2M}{T2M + 243.04}\right)}.$$

Отметим, что выбор указанных параметров обусловлен их существенным влиянием на биохимические процессы, происходящие в листьях растений, и на темпы переработки CO₂ (подробнее см. в [9]).

Все данные были интерполированы на координатную сетку MODIS с разрешением 500 м и усреднены по времени с периодом 16 дней (кроме данных LCT). На этапе подготовки данных использовались библиотеки и утилиты для работы с данными, сохраненными в файлах специализированных форматов NetCDF [20] и HDF [21].

Характеристики продуктов радиометра MODIS/Terra и реанализа ERA5, включенные в обучающую и тестовую выборки модели Cubist приведены в таблице 1.

Табл. 1. Продукты MODIS/Terra и ERA5, используемые для формирования обучающей и тестовой выборки модели Cubist.

Переменная выборки	Продукт	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Ссылка
GPP	MODIS MOD17A2	500 м	8 дней	[16]
EVI	MODIS MOD13A1	500 м	16 дней	[17]
LST	MODIS MOD11A2	1 км	8 дней	[18]
LCT	MODIS MCD12Q1	500 м	1 год	[19]
SW	ERA5 SW	0.25°	1 час	[15]
VPD	ERA5 T2M и D2M	0.25°	1 час	[15]

Обучающая выборка включает данные для 2021 г. только для пикселей, попадающих в границы Алтайского края и Новосибирской области. Тестовые выборки сформированы аналогично по данным для 2022 г. Объем обучающей выборки составляет 750000 пикселей.

Модель Cubist. Древовидная регрессионная модель Cubist относится к классу нелинейных многопараметрических регрессионных моделей. Модель Cubist впервые предложена в работе [10]. Алгоритм этой модели сочетает в себе сильные стороны линейной регрессии и деревьев решений. Cubist работает путем построения ансамбля моделей, каждая из которых представляет собой простую модель линейной регрессии. Каждая из этих моделей обучается на разных подмножествах данных (случайная выборка с повторениями). Окончательный прогноз делается в результате объединения предсказаний всех моделей. На этапе объединения

решений используется техника, называемая «бэггинг» (Bootstrap AGGREGatING), позволяющая уменьшить дисперсию модели [10].

В работе используется версия 0.4.2.1 модели Cubist, реализованная в качестве библиотеки для языка программирования R и размещенная в официальной репозитории CRAN (Comprehensive R Archive Network) [22]. Примеры использования библиотеки доступны на официальном сайте [23]. Отметим, что модель Cubist применялась в серии исследований [5-9], была верифицирована на данных наземных наблюдений и зарекомендовала себя в качестве одной из лучших регрессионных моделей в классе задач, решаемых в работе.

На вход модели подается вектор значений целевой переменной. В работе это данные GPP MODIS продукт MOD17A2. Далее задаются вектора переменных предикторов (EVI, LST, LCT, SW, VPD). Результатом обучения модели является дерево решений, представленное в виде системы правил, содержащих условия, накладываемые на значения предикторов, и регрессионные соотношения для целевой переменной.

На рисунке 2 показан фрагмент листинга результатов обучения модели Cubist, содержащий нескольких правил. Количество ветвей (правил) в дереве решений зависит от сложности данных, от количества переменных-предикторов и др. Пользователь может устанавливать это значение самостоятельно (максимальное значение равно 100), однако в этом случае требуется проводить дополнительный анализ качества обучения модели. Большое количество ветвей может привести к переобучению и ухудшению предсказательных качеств модели.

```
Rule 1: [128063 cases, mean 1.3183997, range 0.008749999 to 5.11, est err 0.3267918]
  if SW <= 128.4723 then
    GPP = 1.9625043 + 0.0126 SW + 4.3 EVI + 0.59 VPD - 0.012 LST
Rule 2: [25748 cases, mean 1.6294678, range 0.105 to 7.49875, est err 0.4497935]
  if EVI <= 0.3518 LCT > 9 VPD <= 0.6379011 SW > 194.5455 SW <= 220.6714 then
    GPP = -9.9489539 + 6.7 EVI - 0.0085 SW + 0.042 LST - 0.66 VPD - 0.02 LCT
...
Rule 24: [54712 cases, mean 8.1323910, range 0.5599999 to 14.00875, est err 0.8467416]
  if EVI <= 0.5633 LST > 298.9207 LCT > 8 VPD <= 1.244966 SW > 260.9348 then
    GPP = 47.647412 + 12.2 EVI - 0.136 LST - 0.0093 SW - 1.26 VPD + 0.08 LCT
Rule 25: [4716 cases, mean 8.1611423, range 1.0675 to 14.44625, est err 1.4273475]
  if LST <= 302.87 LCT > 9 VPD > 0.8216063 VPD <= 0.9621247 SW > 237.1799 SW <= 245.9033 then
    GPP = -68.3962626 + 0.154 SW - 7.37 VPD + 13.5 EVI + 0.129 LST + 0.07 LCT
```

Рис. 2. Пример правил, формулируемых в результате обучения модели Cubist.

Из листинга видно, что каждая ветвь модели кроме регрессионного соотношения содержит статистическую информацию о количестве пикселей, удовлетворяющих условиям, диапазон значений целевой переменной, для которого построено правило, среднее значение и ошибку целевой переменной.

Результаты верификации модели. Верификация результатов, полученных в ходе обучения модели, проводилась двумя методами: валидация на основе отложенной выборки (hold-out split валидация) и кросс-валидация по типам растительности. В работе анализировались основные метрики регрессионного анализа: среднеквадратичная ошибка (Mean Square Error, MSE), среднеквадратичная ошибка (Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE), средняя абсолютная относительная ошибка (Mean Absolute Percentage Error, MAPE), среднеквадратичная логарифмическая ошибка (Mean Square Logarithmic Error, MSLE) и коэффициент детерминации (Coefficient of Determination, R^2).

Для валидации на основе отложенной выборки исходная обучающая выборка была случайным образом разбита на тренировочную и, собственно, валидационную. Объем валидационной выборки составлял 20% от исходной.

Результаты валидации на основе отложенной выборки показаны на рисунке 3. Установленные метрики регрессии приведены в таблице 2. Полученные значения метрик регрессии свидетельствует о высоком качестве обучения модели.

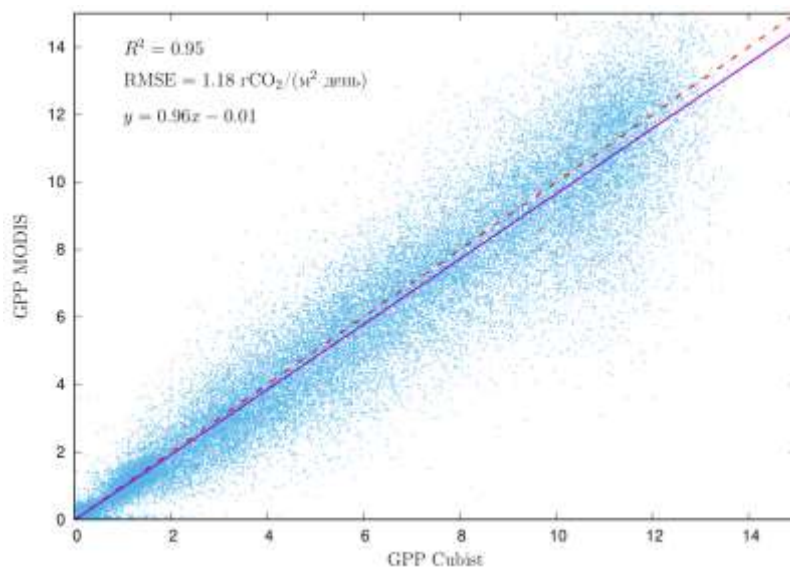


Рис. 3. Диаграмма рассеяния результатов модели Cubist и данных GPP, полученных из продукта MOD17A2 радиометра MODIS/Terra.

Табл. 2. Основные метрики регрессии, используемые для валидации модели методом отложенной выборки (здесь y обозначает значения GPP по данным MODIS, а \hat{y} – предсказания модели).

Метрика	Определение	Значение (без размерностей)
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	1.45
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$	1.18
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $	0.83
MAPE	$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $	0.37
MSLE	$MSLE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{\ln(1 + y_i) - \ln(1 + \hat{y}_i)\}^2$	0.0035
R^2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	0.95

Далее была проведена кросс-валидация модели по типам растительности. Данный метод валидации подразумевает проверку качества модели на данных, не входящих в обучающую выборку. Кросс-валидация проведена с использованием тестового набора данных для 2022 г. Набор был разбит на подмножества по типу растительности. Для территории Алтайского края и Новосибирской области выбрано 6 основных типов, показанных на рисунке 1. Результаты кросс-валидации приведены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты кросс-валидации модели Cubist по основным типам растительности для территории Алтайского края и Новосибирской области.

Тип растительности	R ²	RMSE, гСО ₂ /(м ² день)	Объем выборки (количество пикселей)
Хвойный лес	0.87	1.34	7500
Лиственный лес	0.87	1.73	25500
Смешанный лес	0.90	1.42	81000
Кустарники	0.86	1.58	145000
Травы	0.88	1.18	165000
Сельскохозяйственные культуры	0.89	1.19	255000

Для всех типов растительности полученные значения метрики $R^2 > 0.85$, что в классе задач машинного обучения свидетельствует о высоком качестве обучения модели. Видно, что лучшие результаты обучения модели Cubist достигаются для пикселей с преобладающим типом растительности типа смешанный лес, травы и сельскохозяйственные культуры.

Заключение. Проведено обучение древовидной регрессионной модели Cubist для получения количественных оценок первичной валовой продукции для территории Алтайского края и Новосибирской области за 2021-2022 гг.

В ходе работы получены следующие результаты.

1. С использованием обучающей выборки, включающей данные продуктов радиометра MODIS спутника Terra, а также результаты реанализа ERA5 для территории Алтайского края и Новосибирской области за 2021 г., сформировано дерево решений модели Cubist для получения количественных оценок первичной валовой продукции регионов.
2. Проведена валидация модели двумя методами: валидация на основе отложенной выборки и кросс-валидация по типам растительности. Результаты hold-out split валидации дают значения метрик регрессии $R^2 = 0.95$ и $RMSE = 1.18$ гСО₂/(м² день). Результаты анализа в случае кросс-валидации по типам растительности дают значения коэффициента детерминации $R^2 > 0.85$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высоком качестве обучения модели Cubist и о возможности ее применения для моделирования первичной валовой продукции регионов.

Работа выполнена при поддержке ФИЦ ИВТ (проект «Методы и технологии обработки временных серий спутниковых данных для оценки региональных источников парниковых газов»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Crotwell A., Dlugokencky E., Gerbig C. et al.* WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2022. No. 18.
- [2] *Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W.* Global Carbon Budget 2022 // Earth System Science Data. 2022. V. 14. Pp. 4811-4900.
- [3] *Li X., Xiao J., He B.* Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests // Remote Sens. of Environ. 2018. V. 204. Pp. 659-671.
- [4] *Li X., Xiao J.* TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production // Remote Sens. of Environ. 2022. V. 268. 112748.
- [5] *Xiao J., Zhuang Q., Baldocchi D.D. et al.* Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data // Agricultural and Forest Meteorology. 2008. V. 148. Pp. 1827-1847.
- [6] *Xiao J., Zhuang Q., Law B.E. et al.* A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. Pp. 576-591.

- [7] *Xiao J., Zhuang Q., Law B.E. et al.* Assessing net ecosystem carbon exchange of U.S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2011. V. 151. Pp. 60-69.
- [8] *Li X., Xiao J.* A Global, 0.05-Degree Product of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Derived from OCO-2, MODIS, and Reanalysis Data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Art. No. 517.
- [9] *Li X., Xiao J., Fisher J.B. et al.* ECOSTRESS estimates gross primary production with fine spatial resolution for different times of day from the International Space Station // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 258. Art. No. 112360.
- [10] *Quinlan J.R.* Combining Instance-Based and Model-Based Learning // In *Proceedings ML'93* (San Mateo, CA). 1993.
- [11] *Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al.* MODIS: Advanced Facility Instrument for Studies of the Earth as a System // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 1989. V. 27. No. 2. Pp. 145-153.
- [12] *Justice C.O., Vermote E., Roy D.P. et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 1998. V. 36. No. 4. Pp. 1228-1249.
- [13] *Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др.* Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Часть 1. MODIS // *Вычислительные технологии*. 2007. Т. 12. No. 2. С. 67-89.
- [14] Science writer's guide to Terra: Technical report. NASA's Earth Science Enterprise. NASA Headquarters. Washington, DC 20546: Earth observing system project science office, 1999. https://www.nasa.gov/pdf/156294main_terra_sw_guide.pdf (дата обращения 15.06.2023).
- [15] Copernicus Climate Change Service (C3S). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (дата обращения 15.06.2023).
- [16] *Running S.W., Nemani R., Glassy J.M., Thornton P.E.* MODIS Daily Photosynthesis (PSN) and Annual NET Primary Production (NPP). Product MOD17. Algorithm Theoretical Basis Document 1999. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv006> (дата обращения 15.06.2023).
- [17] *Huete A., Justice C., Wim van Leeuwen.* MODIS Vegetation Index. Product MOD13. Algorithm Theoretical Basis Document. 1999. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a1v006> (дата обращения 15.06.2023).
- [18] *Wan Z.* MODIS Land-Surface Temperature. Product MOD11. Algorithm Theoretical Basis Document. 1999. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006> (дата обращения 15.06.2023).
- [19] *Strahler A., Muchoney D., Borak J. et al.* MODIS Land Cover Product. Product MCD12. Algorithm Theoretical Basis Document. 1999. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006> (дата обращения 15.06.2023).
- [20] Network Common Data Form (NetCDF). <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf> (дата обращения 15.06.2023).
- [21] The HDF Group. <https://www.hdfgroup.org> (дата обращения 15.06.2023).
- [22] *Kuhn M.* Package «Cubist». 2023. <https://cran.r-project.org/web/packages/Cubist/Cubist.pdf> (дата обращения 15.06.2023).
- [23] Data Mining with Cubist. <https://www.rulequest.com/cubist-info.html> (дата обращения 15.06.2023).

ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ TERRA/MODIS

Воронина П.В.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Представлены результаты изучения динамики температур поверхности Новосибирской области в XXI веке по данным дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS для исследования температурного режима, выявления его особенностей. Проведен анализ полученных после обработки спутниковых снимков пространственно-временных рядов поверхностных температур для различных временных интервалов.

Ключевые слова: MODIS, обработка спутниковых данных, температура поверхности, картографическое моделирование почв.

THE LAND SURFACE TEMPERATURE OF THE NOVOSIBIRSK REGION FROM REMOTE SENSING DATA TERRA/MODIS

Voronina P.V.^{1,2}

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

The results of the study of the land surface temperature regime of the Novosibirsk region in the 21st century based on remote sensing data are presented. The analysis of space-time series of surface temperatures obtained after processing satellite images for various time intervals was carried out.

Keywords: MODIS, satellite remote sensing data processing, Land Surface Temperature (LST), statistical deviations, soil cartographic modeling.

В исследованиях региональных и глобальных изменений климата температура поверхности земли имеет важное значение [1], выполняя роль индикатора климатических перемен [2]. Изучая динамику температуры поверхности можно выделить уникальные климатические особенности регионального почвенного климата, определить возможности сельскохозяйственного и промышленного использования территорий региона [3–6]. В проведении мониторинга температуры поверхности одним из источников информации могут выступать данные дистанционного космического зондирования (ДДЗ) среднего пространственного разрешения в тепловом инфракрасном диапазоне [7–9]. Такими данными могут быть, например, снимки, полученные с помощью спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua. Несомненные достоинства использования ДДЗ среднего пространственного разрешения представляют регулярность съёмки, значительный охват порой весьма труднодоступной территории [10, 11]. Однако наряду с указанным преимуществом исследователь неизбежно сталкивается и с трудностями их применения. Это связано с необходимостью проведения пространственно-временного анализа спутниковых измерений для больших территорий и за достаточно продолжительный временной период.

Целью работы является анализ динамики температурных полей поверхности земли в границах Новосибирской области (НСО) по данным дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS для исследования температурного режима и выявления его особенностей. Для выполнения поставленной задачи проведен анализ полученных после обработки спутниковых снимков пространственно-временных рядов температур для различных временных интервалов, в том числе, и их агрегация. Среднегодовая температура поверхности Земли является простейшим метеорологическим индикатором, в котором, как в фокусе, отражены важнейшие физические процессы, происходящие в атмосфере и в почве.

Таким образом, среднегодовая поверхностная температура становится важным показателем особенностей почвенного климата и взаимодействия двух взаимопроникающих сред – почвенной и растительной.

Новосибирская область располагается в глубине обширного евроазиатского континента в центре России на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Площадь территории области 177,76 тыс. км². Протяжённость с запада на восток – 642 км, с севера на юг – 444 км, располагается между 54°44' и 57°12' с. ш. в зонах южной тайги, смешанных лесов и лесостепи (рис. 1, а). Долина р. Обь разделяет область на две неравные части, из которых наибольшая (западная или Левобережная) представляет однородную равнину, ее площадь около 80 % территории, меньшая (восточная или Правобережная) – всхолмлённые возвышения с определённым ростом высот в восточном и особенно в юго-восточном направлениях.

Климат Новосибирской области определяется как суровый с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом. Суровость климата главным образом вызывается особенностями погодного режима в зимний период. Строение рельефа внутренних районов области и подстилающей поверхности формируют местные климато-экологические различия, которые выражаются в характере растительности, снежного и почвенного покровов, густоте водной сети и т. д. [12–16].

В Новосибирской области, как и в целом в Западной Сибири, выражена весьма отчетливо широтная природно-климатическая зональность. По зональному районированию в области формируются ландшафтные типы климатов леса, лесостепи и степи, которые дополнительно еще подразделяются на ряд ступеней ландшафтной классификации (классификация предложена А.П. Слядневым) (рис. 1, б). По данным Гидрометслужбы среднегодовая температура почвы на её поверхности изменяется, придерживаясь упомянутой зональности, на 1–2°C.

В настоящей работе спутниковая информация отбирается и обрабатывается средствами Google Earth Engine (GEE) [19] – облачной платформы для геопространственного анализа больших данных, обеспечивающей доступ к большой базе данных спутниковых изображений и к вычислительным ресурсам, необходимым для их анализа.

Поставленная задача решалась с использованием продуктов, получаемых в результате обработки данных приборов Terra/MODIS. В этих продуктах значения температуры восстанавливаются с помощью алгоритма [20] по измерениям интенсивности инфракрасного излучения, регистрируемого в каналах 31 (10.78-11.28 мкм) и 32 (11.77-12.27 12 мкм) (продукты MOD11A1).

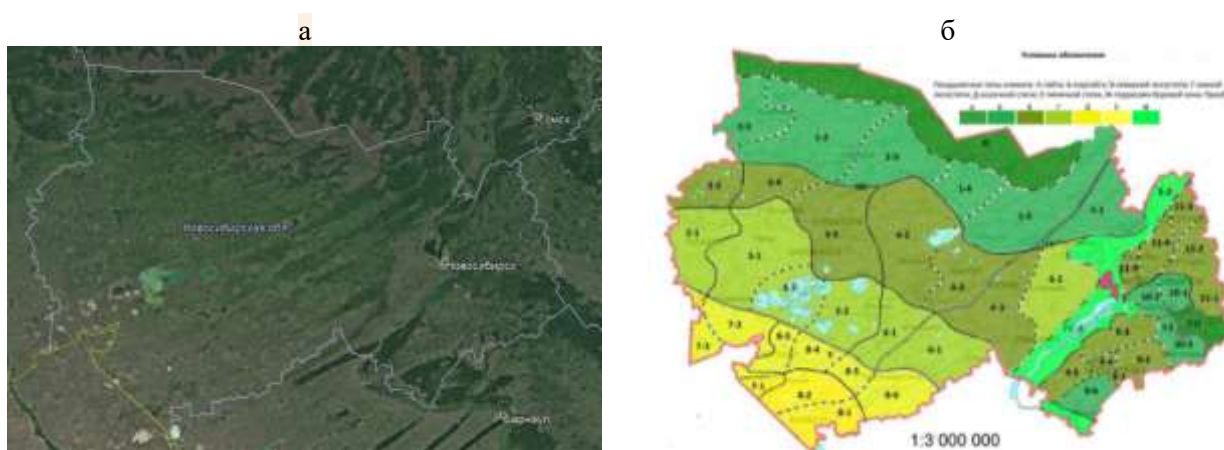


Рис. 1. а) Новосибирская область – территория исследования (Google Earth Pro);
б) Природно-климатическое районирование по А.П. Слядневу [13].

Анализ пространственно-временных рядов температуры поверхности территории Новосибирской области проведен по рассчитанным средним значениям температуры в точке, измеренной в ночное и дневное время, для каждого календарного года с 2000 по 2021 гг.

Среднегодовая температура поверхности Земли является метеорологическим параметром, отражающим особенности теплообмена на протяжении года. Она зависит от интенсивности солнечной радиации, особенностей циркуляции атмосферы и физических характеристик почвенного покрова. Динамика среднегодовой температуры поверхности земли в Новосибирской области с 2000 по 2021 гг. по ночным и дневным данным показана на рис. 2. Отметим, что среднегодовая температура поверхности Новосибирской области изменялась от -1.5°C (2018 г.) до 5.4°C (2020 г.). Среднее значение среднегодовой температуры за 2000–2021 гг. составляет 1.4°C (на рис. 2 отмечено красной линией). Среднеквадратичное отклонение от значений среднегодовых температур равно 1.7. На рис.2 выделена полоса, равная двум среднеквадратичным отклонениям, отложенным от среднего значения. Значения среднегодовых температур, выходящие из выделенной полосы, представляют собой аномальные. Это самые теплые 2000 г. и 2020 г. со среднегодовой температурой 4.4°C и 5.4°C соответственно. Самыми холодными годами были 2009, 2010, 2011 и 2018 гг. со среднегодовыми температурами -0.6°C , -1.8°C , -0.3°C , -1.5°C . Отметим также 2004 и 2006 гг., в которые средняя температура была хоть и положительной, но достаточно низкой 0.2°C , а в 2012 г. даже отрицательной -0.1°C . Отмечается, что самым холодным за последние два десятилетия был 2010 г. Это подтверждается и данными станций Гидрометслужбы [13]. Среднегодовая температура «обычного» года варьируется от 0.7°C до 2.8°C .

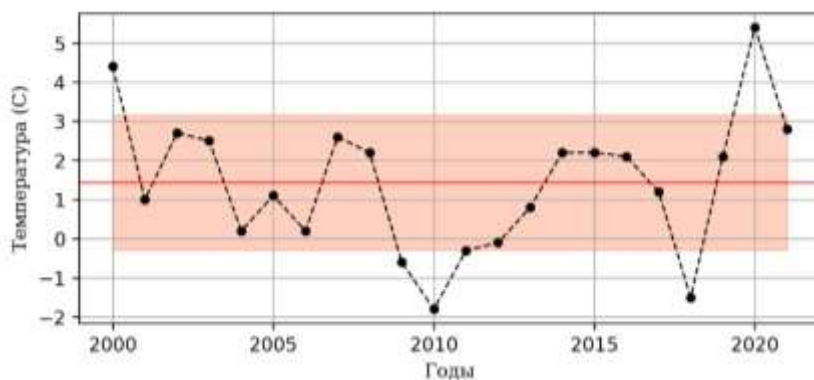


Рис. 2. Среднегодовая температура Новосибирской области, осредненная по данным ночной и дневной съемок.

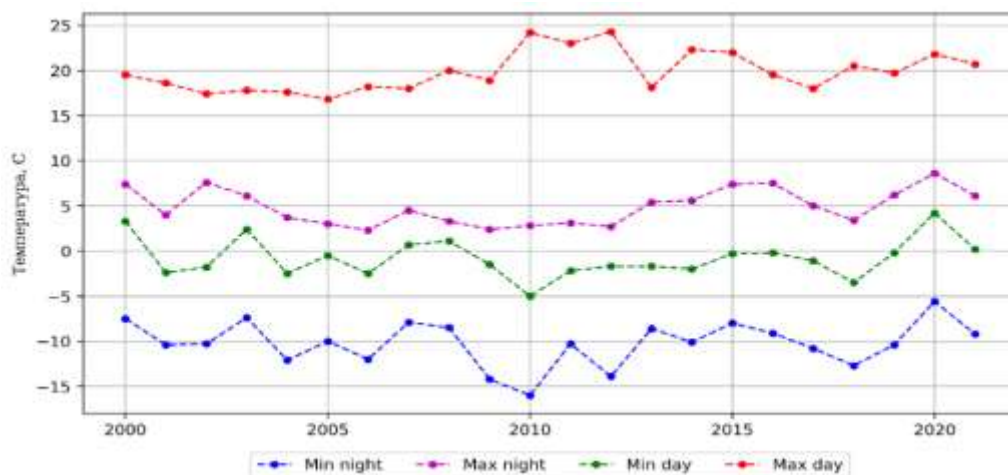


Рис. 3. Минимальные и максимальные значения среднегодовых температур поверхности Новосибирской области по данным ночной и дневной съемок.

Для более информативного понимания разброса значений температур поверхности земли на рис. 3 изображены графики минимальной и максимальной средних температур по данным ночных и дневных измерений, полученные по продуктам Terra/ MODIS с 2000 по 2021 гг. Эти графики показывают, что самая низкая минимальная средняя ночная температура за-

фиксирована в 2009 (-14.2°C), 2010 (-16°C), 2012 (-13.9°C) и 2018 (-12.7°C) гг., а самая высокая максимальная дневная – в 2010 (24.2°C), 2011 (23°C) и 2012 (24.3°C) гг. В целом, годы с 2009 по 2012 были самыми холодными (рис. 2), т.е. несмотря на высокие показатели средней дневной температуры поверхности по области, низкие средние ночные значения обеспечили и низкие средние температуры поверхности по НСО.

Новосибирская область открыта с севера, не защищена с востока, имеет пониженный рельеф, вследствие чего довольно легко происходит свободный заток холодных арктических воздушных масс и их застои на пониженных элементах рельефа, что и обуславливает суровость климата. В отдельные годы этот процесс протекает весьма интенсивно, что приводит к значительным отклонениям от многолетних значений, нарушает общий экологический режим ландшафтов. В результате происходит значительное выхолаживание приземных слоев воздуха и падение температур, в том числе и на поверхности. Таким образом, на территории области формируется длинная и холодная зима, которая сопровождается коротким и не всегда жарким летом. Зима с установлением устойчивого снежного покрова на территории Новосибирской области, как правило, длится с ноября и до конца марта. Случается, что снежный покров устанавливается и в октябре, а сход его происходит только в апреле. На рис. 4 показаны средние температуры поверхности земли в Новосибирской области за период: с 1 ноября по 31 марта. На рисунке зимние сезоны нумеруются с зимы 2000–2001 г. (это первая) и заканчиваются зимой 2021–2022 г. Всего в анализе рассматриваются 22 периода. Усредненное значение средних температур зимнего периода составляет -19.6°C (на рис. 4 изображено красной линией), а среднеквадратичное отклонение значений рассматриваемых периодов равно 2.2. На рис.4 выделена полоса, равная двум среднеквадратичным отклонениям, отложенным от среднего значения. Температура поверхности в зимний период на территории Новосибирской области в «обычные» годы колеблется от -17°C до -21°C , но в рассмотренный период случались и исключения, как в сторону низких температур, так и в сторону более высоких значений. Мягкими можно считать три зимы – это зимы 2001–2002 гг. и 2006–2007 гг. со средней температурой поверхности -16.3°C и зима 2019–2020 гг. со средней температурой поверхности -15.5°C . А вот самыми морозными оказались четыре зимы 2000–2001 гг. (средняя температура поверхности -21.5°C), 2009–2010 гг. (-25.8°C), 2012–2013 гг. (-22.7°C), 2020–2021 гг. (-21.6°C). Причем зима 2009–2010 гг. была аномально холодной за первые два десятилетия XXI века. И еще четыре зимы были довольно холодными, имели средние температуры поверхности чуть ниже -21°C .

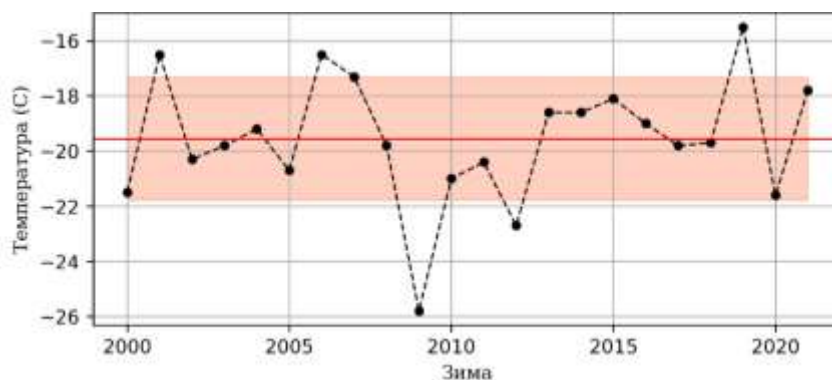


Рис. 4. Средняя температура Новосибирской области по данным ночной и дневной съемок за период с 1 ноября по 31 марта.

Изучение повторяемости холодных зим за долгий ряд лет и выявление погодно-климатической системы в этом процессе помогут с большей долей вероятности предсказывать метеорологические режимы зимних периодов, что, безусловно, будет способствовать своевременной защите населения от негативных природных воздействий.

Аналогично были рассчитаны средние значения температуры поверхности земли в Новосибирской области для условно летнего периода с 1 мая по 30 сентября (рис. 5). Скорее этот период можно классифицировать как период с точно отсутствующим снежным покровом. В

этот сезон средняя температура поверхности в основном меняется от 15.5°C до 17°C. Усредненное значение средних температур лета составляет 16.3°C (на рис. 5 изображено красной линией), а среднеквадратичное отклонение значений рассматриваемых периодов равно 0.9. На рис.5 выделена полоса, равная двум среднеквадратичным отклонениям, отложенным от среднего значения. Исключения составили четыре года: 2003, 2004, 2012 и 2020 со средними летними температурами поверхности 17.5°C, 17.2°C, 18.7°C и 17.7°C, соответственно, и два года с холодными летними периодами: 2009 и 2013, когда средняя летняя температура поверхности равнялась 14.9°C и 14.7°C, соответственно.

Суммируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод. Только зима 2009–2010 гг. и холодное лето 2010 г. дали в целом и низкую среднюю температуру в 2010 г. Обращают на себя внимание два года – 2000 и 2020. В эти годы были относительно холодные зимы (–21.6°C и –21.3°C соответственно), умеренно теплые летние периоды (16.6°C и 17.7°C соответственно), но в итоге средние температуры за год показали значительное превышение средних температур (4.5°C и 5.4°C) по сравнению с другими годами первых двух десятилетий нынешнего века. И еще представляет интерес 2010 г. Это был год с парадоксально холодным летом, которое контрастировало с аномальной летней жарой в Восточной Европе. И то, и другое объясняется меридиональным переносом воздушных масс. А вот средняя температура за 2018 г. была довольно низкой (даже отрицательной) –1.5°C, хотя и зимние, и летние средние температуры не выходили за границы характерных интервалов соответствующих периодов.

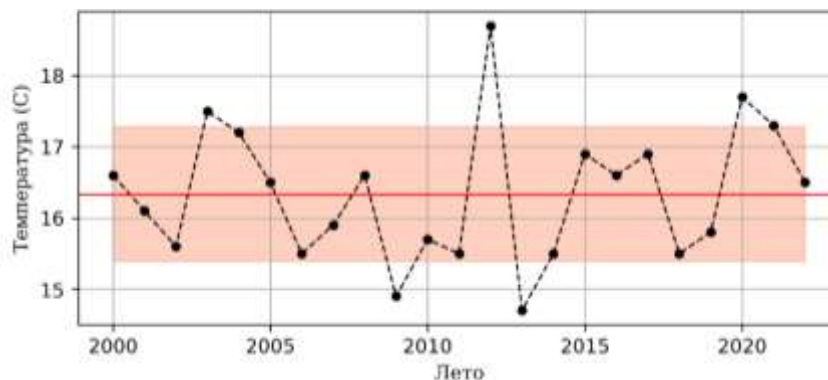


Рис. 5. Средняя температура Новосибирской области по данным ночной и дневной съемки за период с 1 мая по 30 сентября.

На рис. 6 и 7 приводятся распределения среднегодовых температур поверхности по Новосибирской области. На рис. 6 показаны распределения для самых холодных годов (в скобках указаны минимальное и максимальное значение среднегодовой температуры за год) – 2009 (–5.5; 5.4), 2010 (–7; 6.5) и 2018 (–5; 5.5), на рис. 7 – для самых теплых годов 2000 (–0.6; 9.7) и 2020 (1.3; 11), и самого «среднего» года по усредненной температуре поверхности 2017 (–3.4; 6.0). Интервал температур для рис. 6 и 7 выбран (–7; 6.5), что обусловлено самым маленьким и самым высоким значениями среднегодовой температуры рассматриваемых годов.

На рис. 6 хорошо видно, что даже среди «холодных» однотипных годов выделяется 2010 г., как самый холодный (считается аномально холодным в текущем столетии для юго-западной Сибири), более «теплый» 2009 г. То же можно сказать и о «теплых» годах (см. рис. 7). 2020 г. существенно теплее, чем 2000 г. (практически отсутствует желтый цвет на карте и много красного цвета, т.е. температуры близки к максимальным по интервалу). Год 2020-й оказался самым теплым в XXI веке. И «средний» по температуре год 2017 г. действительно показывает однородное распределение средних температур интервала (практически только желтый цвет).

Представленные результаты соответствуют широтной зональности, характерной для юго-востока Западной Сибири. Так, с юга на север, по зонам, наблюдается стабильное понижение среднегодовых температур поверхности. Экологическая нагрузка на человека и живот-

ных увеличивается по мере продвижения с юга на север. В Правобережье нарушается широтная зональность климатов и ландшафтов. Здесь наблюдаются сложные сочетания различных типов климата, связанных с рельефом территории.

Картографические модели термических ресурсов, построенные по результатам анализа пространственно-временных рядов спутниковых данных среднего пространственного разрешения (Terra/MODIS), востребованы в различных сферах деятельности человека, в частности, для оценки теплообеспеченности земельного фонда. Такая оценка дает возможность эффективного использования всех категорий земель. Изучение температуры подстилающей поверхности позволяет выявить особенности почвенного климата, что важно для исследования и прогнозирования экологических процессов и их взаимодействия с двумя взаимопроникающими средами – почвенной и растительной. Полученные в ходе такого исследования результаты могут послужить основой для районирования территории с целью ее хозяйственного освоения.

На фоне стабильного потепления климата происходят нестабильные кратковременные понижения либо повышения температур поверхности, что подчёркивает экстремальность климата НСО во всех её зонах, усиливает процессы экологической нестабильности, усложняет возможность долгосрочного прогнозирования, следовательно, и эколого-экономического планирования.

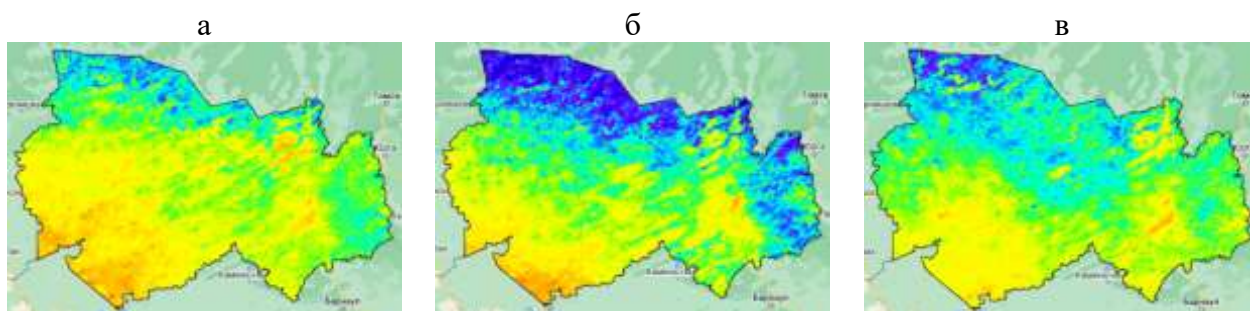


Рис. 6. Распределение средней температуры за 2009 г. (а), 2010 г. (б) и 2018 г. (в). Температура изменяется в границах $(-7; 6.5)$. Цвет изменяется от синего (нижняя граница интервала) до желтого (красного) (верхняя граница интервала).

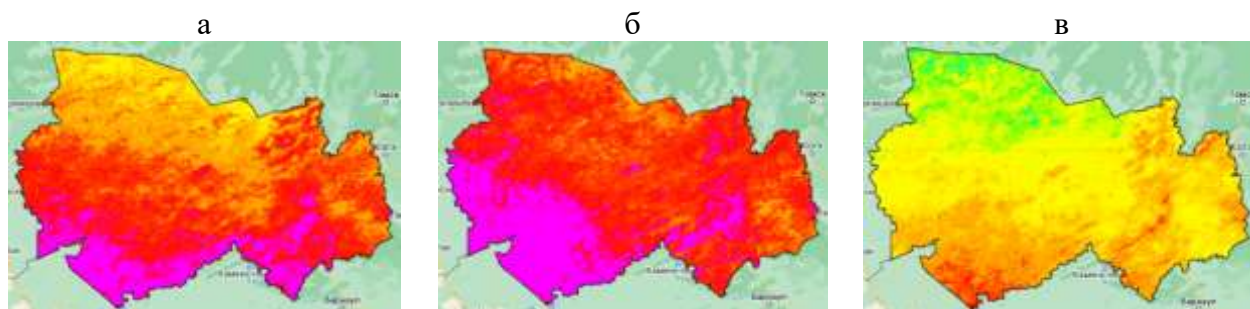


Рис. 7. Распределение средней температуры за 2000 г. (а), и 2020 г. (б), 2017 г. (в). Температура изменяется в границах $(-7; 6.5)$. Цвет т изменяется от синего (нижняя граница интервала) до желтого (красного) (верхняя граница интервала).

ЛИТЕРАТРА

- [1] Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Koennen G.P., Boehm R., Demaree G., Gocheva A., Mileta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C. et al. Daily surface air temperature and precipitation dataset 1901–1999 for European Climate Assessment (ECA) // International Journal of Climatology, 2002. Vol. 22. pp. 1441-1453.
- [2] Kjellstrom E., Boberg F., Castro M., Christensen J.H., Nikulin G., Sanchez E. Daily and monthly temperature and precipitation statistics as performance indicators for regional climate models // Climate Research, 2010. Vol. 44. pp. 121-134.
- [3] Kudryasheva S.Ya., Chumbaev A.S., Pestunov I.A., Sinyavskiy Y.N., Chubarov D.L., Bezborodova A.N., Ermakov N.B. Cartographic Modeling of Soil Temperature Fields for Middle Siberia Transect Based on

- Conjoint Analysis of Automated Ground-based and Satellite Temperature Data // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2534. P. 124-131. http://ceur-ws.org/Vol-2534/21_short_paper.pdf.
- [4] Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Тепловые аномалии Барабинской низменности. Первые результаты // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 4. № 1. С. 28-36.
- [5] Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Анализ временных рядов температуры поверхности Земли // Труды Международной конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика», посвященной 90-летию со дня рождения акад. А.С. Алексеева. 2018. С. 108-114.
- [6] Voronina P.V., Chubarov D.L., Dobretsov N.N. The Study of the Temperature Regime of the Novosibirsk Agglomeration According to the Satellite Sensing Data // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2534. P. 327-333. http://ceur-ws.org/Vol-2534/55_short_paper.pdf.
- [7] Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sensing of Environment. 2003. No. 86. P. 370-384.
- [8] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. No. 64. P. 335-344.
- [9] Weng Q., Quattrochi D.A. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // Remote Sensing of Environment. 2006. No. 104. P. 119-122.
- [10] Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // Theoretical and Applied Climatology. 2009. No. 96. P. 145-153.
- [11] Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval // Remote Sensing of Environment. 2006. No. 104. P. 211-225.
- [12] Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 121 с.
- [13] Воронина Л.В., Гриценко А.Г. Климат и экология Новосибирской области. Новосибирск: СГГА, 2011. 228 с.
- [14] Кравцов В.М., Донукалова Р.П. География Новосибирской области. Новосибирск: Инфолио-пресс, 1999. 205 с.
- [15] Западно-Сибирская низменность. М.: География, 1963. 262 с.
- [16] Кузнецов А.В., Кузнецов Н.А. Охотничьи угодья Новосибирской области. Новосибирск: Новосибирское книжное издательство, 1987. 232 с.
- [17] Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 157-174.
- [18] Shokin Yu.I., Pestunov I.A., Chubarov D.L., Kikhtenko V.A., Mamash E.A., Dobretsov N.N., Voronina P.V., Sinyavsky Yu.N. Information System for Satellite Data Acquisition, Archiving and Analysis as an Instrument for Monitoring of Objects of Artificial and Natural Origin // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2534. P. 229-240. http://ceur-ws.org/Vol-2534/39_short_paper.pdf.
- [19] Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18-27. DOI:10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [20] Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. No. 4. P. 892-905.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СВЧ НАБЛЮДЕНИЙ

Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А., Волков Н.В.
Алтайский государственный университет, Барнаул

Работа посвящена применению современных методов регрессионного анализа для коррекции результатов спутниковых наблюдений температуры приземного слоя воздуха (Т2М) в зимний период времени. В качестве области интереса в работе рассматривается территория юга Западной Сибири. Источниками информации являлись измерения СВЧ-радиометров ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20, климатические данные GFS и ERA5, а также наблюдения 250 наземных метеостанций за период октябрь 2022 – март 2023 гг. Определено, что спутниковые оценки Т2М завышены относительно результатов наземных наблюдений, причем для температур ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ разница может достигать $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Было показано, что параметры качества моделей, основанных на деревьях решений, позволяют достичь полутора-кратного уменьшения дисперсии относительно методов MNK и KNN. Установлено, что лучший результат демонстрирует метод опорных векторов, где $R2 = 0.97$, а $\sigma = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Ключевые слова: СВЧ, MIRS, температура приземного слоя воздуха, спутник, ДЗЗ, коррекция, регрессия, машинное обучение, Западная Сибирь.

MACHINE LEARNING METHODS TO ESTIMATE EXTREMELY LOW TEMPERATURES IN THE SURFACE AIR LAYER IN WINTER BASED ON SATELLITE MICROWAVE OBSERVATION DATA

Mordvin E.Yu., Lagutin A.A., Volkov N.V.
Altai State University, Barnaul

The work is devoted to the application of modern methods of regression analysis to correct the results of satellite observations of the temperature of the surface air layer (T2M) in the winter period. The territory of the south of Western Siberia is considered as an area of interest in the work. The sources of information were measurements from ATMS/Suomi-NPP and ATMS/NOAA-20 microwave radiometers, GFS and ERA5 climate data, and observations from 250 ground-based weather stations for the period October 2022 – March 2023. It was determined that satellite estimates of T2M are overestimated relative to the results of ground-based observations, and for temperatures below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the difference can reach $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. It was shown that the quality parameters of the obtained models based on decision trees make it possible to achieve a 1.5-fold reduction in the variance, relative to the MNK and KNN methods. It was found that the best result was demonstrated by the support vector machine, where $R2 = 0.97$ and $\sigma = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Keywords: Microwave, MIRS, surface air temperature, satellite, remote sensing, correction, regression, machine learning, Western Siberia.

Введение. Одной из важнейших характеристик климатической системы является температура приземного слоя воздуха (Т2М), в частности, ее возможные экстремальные значения [1]. В рамках задач, связанных с мониторингом ЧС, краткосрочным прогнозированием метеоусловий или изучением изменения климата, требуется использование данных с высоким пространственным и временным разрешениями [1]. Однако, в труднодоступных регионах, таких, как например, крайний север, покрытие наземными пунктами наблюдений является редким.

Современные спутниковые системы дистанционного зондирования предоставляют возможность получать информацию о метеоусловиях в произвольной точке на планете. Наиболее распространенным методом в решении задачи измерения Т2М является использование наблюдений радиометров, работающих в СВЧ-диапазоне [2,3]. Одним из преимуществ такого подхода является наличие в микроволновом диапазоне большого числа окон прозрачности, что

позволяет сенсору выполнять измерения даже при наличии облачности [4]. Другим несомненным достоинством является высокая частота наблюдений, так как спутниковая группировка, обладающая такими детекторами, в настоящее время насчитывает порядка 10 единиц.

Однако, наблюдения, полученные с помощью СВЧ-радиометров, имеют большое количество инструментальных шумов [5], а алгоритмы слабо чувствительны к экстремальным значениям температуры приземного слоя воздуха. Это связано в первую очередь с тем, что алгоритм адаптируется для работы с наблюдениями во всех климатических зонах [5]. В угоду умеренной сложности, не учитываются локальные эффекты, которые вносят дополнительные неопределенности в температурный режим атмосферы на региональном уровне.

Очевидным решением, позволяющим повысить точность и чувствительность таких подходов, является адаптация алгоритма с учетом климатических условий исследуемого региона [5] и выполнение дополнительной верификации с использованием наземных наблюдений.

Другим общепринятым подходом является коррекция результатов базового алгоритма на непосредственные измерения искомой величины [6]. В случае задачи измерения температуры приземного слоя воздуха методами дистанционного зондирования, возможно использовать наземные наблюдения сети Всемирной метеорологической организации (ВМО) [7], которые находятся в свободном доступе.

Наиболее простым и распространенным решением для коррекции спутниковых данных является линейная регрессия, которая базируется на методе наименьших квадратов (МНК). Однако, в случаях, когда имеются сложные нелинейные зависимости или требуется учет особенностей распределения данных, лучшие результаты показывают более продвинутое регрессионные методы [6]. Одним из возможных решений поставленной задачи является использование алгоритмов машинного обучения и анализа данных.

Целью исследования является разработка метода коррекции данных о температуре приземного слоя воздуха, полученных в результате работы стандартного алгоритма MIRS v3.0 [5] в зимний период времени с использованием методов машинного обучения. В качестве области интереса в работе рассматривается территория юга Западной Сибири.

Алгоритм MIRS (Microwave Integrated Retrieval System) представляет собой программный комплекс для обработки наблюдений спутниковых СВЧ-сенсоров, таких как AMSU, MHS, SSMI/S, ATMS (спутники серии NOAA, METOP, DMSP, NPP/JPSS). Комплекс разработан в NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) как для внутреннего использования, так и для работы с данными, полученными в режиме прямого вещания (Direct Broadcast, DB).

В основе MIRS лежит метод одномерного вариационного поиска (1DVAR), который представляет собой итеративный физический алгоритм, решающий обратную задачу [5]. Другими словами, он выполняет восстановление геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности (профиль температуры, влажности и т.д.), которые соответствуют уходящему из атмосферы микроволновому излучению, зарегистрированному спутниковым прибором. Поиск выполняется в сокращенном пространстве параметров с использованием декомпозиции эмпирически ортогональной функции EOF (Empirically Orthogonal Function), которая обеспечивает стабильную работу сопряженной модели, быструю сходимость алгоритма и отсутствие нулевого вектора решений.

MIRS сопрягается с моделью переноса излучения CRTM (Community Radiative Transfer Model) объединенного центра по ассимиляции спутниковых данных JCSDA (Joint Center for Satellite Data Assimilation), которая работает как в микроволновом, так и в инфракрасном диапазонах спектра. CRTM воспроизводит как безоблачную атмосферу, так и облачные условия с наличием осадков для всех типов подстилающей поверхности.

Обычно, результат обозначенной обработки называется EDR (Environmental Data Record). Список продуктов, создаваемых MIRS, приведен в таблице 1. К «стандартным» продуктам относятся результаты обработки данных, которые получают на регулярной основе без

сбоев алгоритма и для которых были проведены обширные проверки и испытания. «Экспериментальные» продукты также получаются в процессе работы алгоритма, но они требуют детального тестирования и верификации.

В результате постобработки получают производные продукты MIRS. Они создаются с использованием параметров MIRS 1DVAR. Например, к ним можно отнести полное влагосодержания атмосферы TPW (Total Precipitable Water), интенсивность выпадения дождя RR (Rainfall Rate) и снега (Snowfall Rate). Некоторые из этих продуктов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Некоторые продукты алгоритма MIRS.

MIRS 1DVAR продукт	Производный продукт MIRS	Экспериментальный продукт
Atmospheric temperature profile	Total Precipitable Water	Ice Surface Temperature
Atmospheric humidity profile	Cloud Liquid Water	Snow Surface Temperature
Land Surface Temperature	Land Surface Temperature	Non-precipitating Cloud Profile
Emissivity vector	Rain Rate	Rain Profile
	Ice Water Path	Ice/Graupel Profile
	Snow Water Equivalent	
	Sea Ice Concentration	
	Snow Cover Extent	

Полный перечень спутниковых программ и микроволновых приборов с данными которых в настоящее время работает алгоритм MIRS показан в [5].

Приборы. Микроволновый комплекс AMSU/MHS (Advanced Microwave Sounding Unit/Microwave Humidity Sounder) установлен на спутниках серии NOAA (на орбите с 1998 года) и MetOp (с 2006 года). В свою очередь, комплекс состоит из трех приборов, а именно: AMSU-A, AMSU-B и MHS [8]. В настоящее время на орбите находятся 7 космических аппаратов, оснащенных AMSU/MHS. Сенсор регистрирует уходящее из атмосферы микроволновое излучение в диапазоне 23÷190 ГГц. Так как пространственные разрешения каждого из приборов комплекса не согласуются друг с другом, алгоритм MIRS приводит наблюдения к единому значению. Итоговый размер пикселя полученных данных равен 16 км в надире.

Измерения, получаемые с помощью AMSU/MHS, являются важным источником информации для мониторинга климата и прогнозирования погоды. Также используются для создания карт температуры и влажности в различных слоях атмосферы, которые в свою очередь могут быть использованы для уточнения прогнозирования погодных условий [6,9].

Микроволновый спутниковый радиометр ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) – это прибор, базирующийся на космических платформах Suomi-NPP, NOAA-20 и NOAA-21 [10]. Инструмент был разработан для восстановления вертикального распределения температуры и влажности в атмосфере Земли [11]. Радиометр осуществляет регистрацию уходящего из атмосферы излучения в СВЧ-диапазоне 23÷190 ГГц. Прибор является модернизированной версией AMSU/MHS, о котором было сказано ранее. Пространственное разрешение ATMS схоже с предшественником и равно 17 км в надире.

Обозначенные выше спутники находятся на солнечно-синхронной полярной орбите с периодом обращения порядка 90 минут [11]. Причем пересечение экватора траекторией движения каждого из этих космических аппаратов происходит в разное время. Таким образом, обеспечивается почти непрерывное покрытие наблюдениями всего земного шара.

Сегодня наблюдения AMSU/MHS и ATMS могут быть получены с задержкой 4-6 часов в электронной библиотеке данных NOAA CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System) [12], а также в режиме DB при использовании приёмного оборудования.

Методы. Разрабатываемый подход для коррекции данных о температуре приземного слоя воздуха, полученных в результате работы стандартного алгоритма MIRS v3.0, основан на использовании регрессионной модели, которая связывает искомую величину с другими продуктами MIRS. В работе рассматривались как классические методы, такие, как например

МНК, так и современные модели машинного обучения. В исследовании мы использовали результаты МНК в качестве эталонной меры для оценки эффективности более продвинутых регрессионных моделей.

Алгоритм k -ближайших соседей (KNN) – это метод, который используется для классификации и регрессии. KNN основан на принципе близости объектов в многомерном пространстве признаков. Для классификации нового объекта алгоритм ищет k -ближайших к нему объектов из обучающей выборки и относит его к тому классу, который является наиболее распространенным среди k -соседей [13]. KNN является одним из наиболее простых и распространенных методов машинного обучения.

Наиболее широко используемым подходом обучения с учителем для классификации и регрессии является метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM). В основе SVM лежит поиск гиперплоскости в многомерном пространстве, которая лучше всего разделяет данные на два или более класса. Для этого метод SVM использует опорные векторы, которые являются точками данных, находящимися на границе разделения между классами [14,15].

Беггинг (Bagging, Bag) и случайный лес (Random Forest, RF) – это алгоритмы машинного обучения, используемые для построения ансамблей моделей [16]. Суть Беггинга заключается в создании множества подвыборок из обучающей выборки с помощью процедуры бутстрэпа (Bootstrap Aggregating), после чего каждую из них используют для обучения отдельной модели. В результате получается ансамбль моделей, который усредняет прогнозы всех моделей.

В отличие от метода Беггинг в RF каждая модель ансамбля строится на основе подмножества признаков, выбранных случайным образом. Таким образом увеличивается разнообразие моделей в ансамбле и повышается его качество. Случайный лес также обладает свойствами устойчивости к переобучению и способен работать с большими объемами данных [17].

Другим распространённым алгоритмом, основанным на построении дерева решения, является градиентный бустинг (Gradient Boosting, GB). Также как и в предыдущих подходах, GB строит ансамбль моделей, куда последовательно добавляются короткие деревья, каждый из которых учитывает ошибки предыдущих моделей. Ошибки минимизируются путем поиска оптимальных весов для каждого объекта и комбинации моделей [18].

Выбор регрессоров. Следующий этап исследования посвящен подбору регрессоров для построения корреляционной модели. На данном шаге были рассмотрены продукты MIRS, а также климатические переменные по данным системы краткосрочного прогнозирования GFS (Global Forecast System) [19] и реанализа ERA5 [20]. Итоговый список переменных, используемых для обучения моделей, приведен ниже:

T2M – искомая величина, температура приземного слоя воздуха по данным наблюдений ВМО [7];

TAIR – температура приземного слоя воздуха по данным MIRS;

TSURF – температура подстилающей поверхности по данным MIRS;

TPW – полное влагосодержание атмосферы по данным MIRS;

Δ PSURF – вариация атмосферного давления на уровне поверхности, найденная как разница между климатической нормой (по данным ERA5) и давлением на момент пролета спутника (по данным GFS);

HGT – высота поверхности относительно уровня моря по данным GFS;

T2M_{MIN} – климатический минимум температуры приземного слоя воздуха за последние 20 лет, полученный по данным ERA5;

U10m – зональная компонента скорости ветра по данным GFS;

V10m – меридиональная компонента скорости ветра по данным GFS;

Такой набор предикторов обусловлен следующими причинами: переменные TAIR и TSURF напрямую коррелируют с T2M; TPW и Δ PSURF указывают на наличие облачности, и характеризуют ее плотность; HGT и T2M_{MIN} используются как классификаторы, разделяющие исследуемый регион на субклиматические зоны; U10m и V10m введены как вспомогательные регрессоры.

Результаты. Последний этап исследования включал подготовку, настройку, обучение и верификацию указанных ранее моделей. В качестве исследуемого региона выбрана территория Западной Сибири. На рисунке 1 показано расположение 250 метеостанций, данные которых использовались для поиска оптимального решения. В обучающую выборку были включены измерения за период октябрь 2022 – март 2023, а также наблюдения, сделанные в декабре 2020 г. Такой выбор обусловлен низкими температурами воздуха, которые наблюдались в эти промежутки времени.

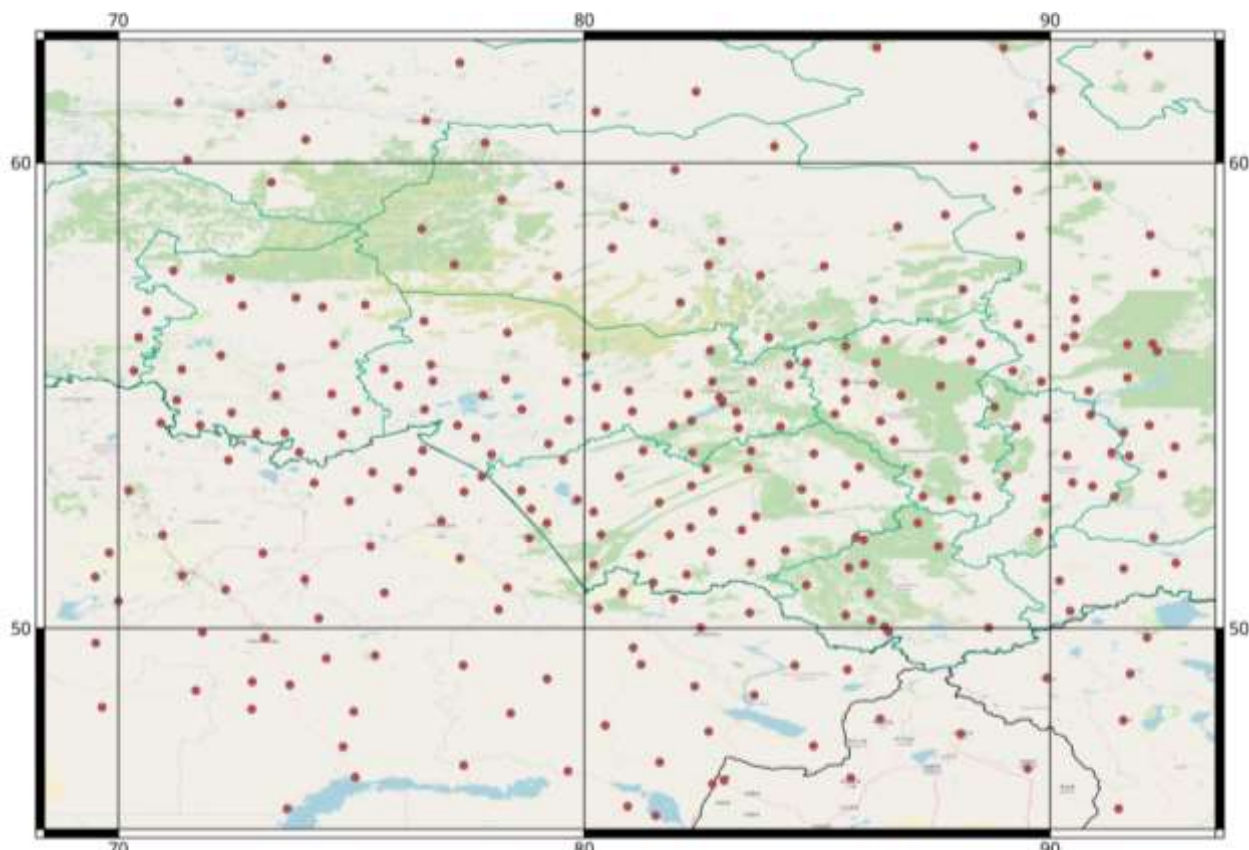


Рис. 1. Пространственное распределение метеостанций, действующих на территории юга Западной Сибири.

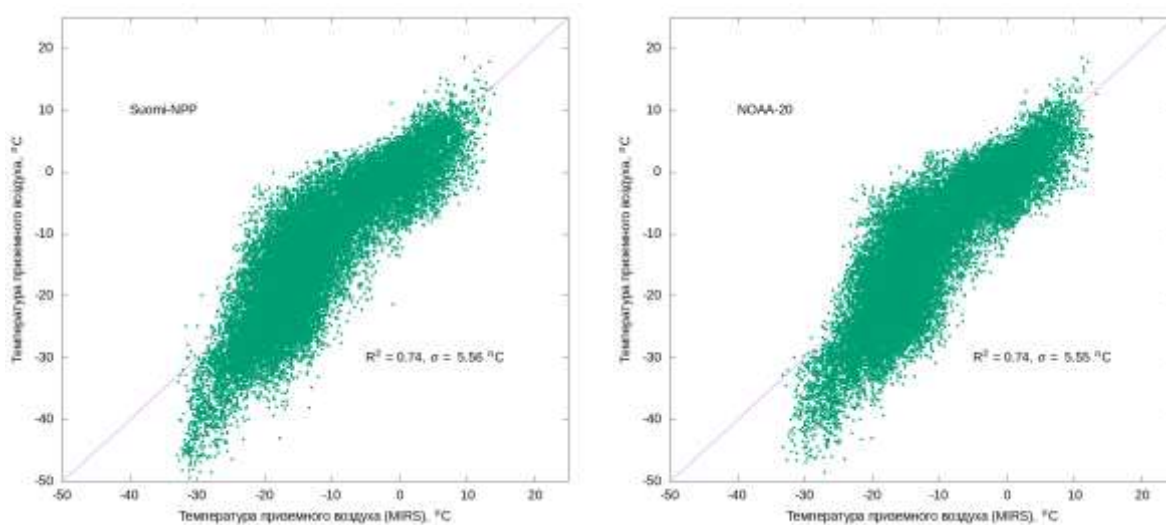


Рис. 2. Диаграммы рассеяния для температуры приземного слоя воздуха по данным MIRS и результатов наземных метеонаблюдений для диапазона высот 0-200 м.

Для обучения регрессионных моделей были выбраны ночные наблюдения ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20. Каждая из полученных выборок содержала порядка 60000 значений. Рисунок 2 демонстрирует диаграмму рассеяния между результатами MIRS и наземными наблюдениями для диапазона высот 0-200 м. Хорошо видно, что спутниковые оценки температуры приземного слоя воздуха завышены, причем для значений ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ разница может достигать $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также следует отметить, что в данных ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20 наблюдается излом.

Перед обучением моделей, полученные ранее выборки были разделены на 4 группы согласно расположению наблюдения над уровнем моря (параметр HGT). В первый набор включались данные на уровнях ниже 200 метров, во вторую на высотах 200-500 м, в третью – 500-800 м, в последнюю – более 800 м. Далее каждая из полученных подвыборок была разделена на обучающую (train) и тестовую (test) в пропорции 75/25. С использованием наборов train были подобраны оптимальные гиперпараметры для каждого из алгоритмов. Здесь использовался метод перекрестной проверки.

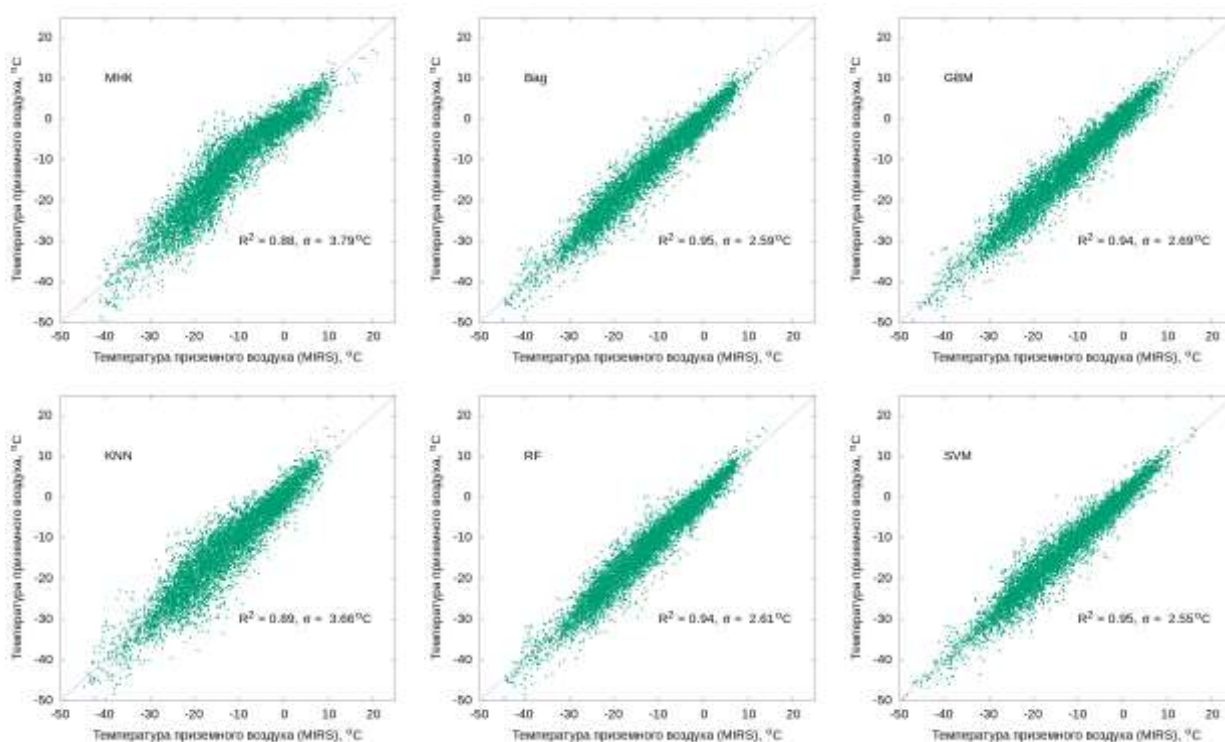


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для температуры приземного слоя воздуха по данным ATMS/Suomi-NPP и результатам наземных метеонаблюдений для диапазона высот 0-200 м.

С использованием выборок test была выполнена оценка эффективности каждого из алгоритмов. Рисунок 3 демонстрирует диаграмму рассеяния восстановленных значений температуры приземного слоя воздуха для радиометра ATMS/Suomi-NPP из набора данных test ниже 200 м. Параметры качества моделей, основанных на деревьях решений, позволяют достичь полуторакратного уменьшения дисперсии относительно методов MNK и KNN. Однако, лучшие результаты показал метод опорных векторов, где $R^2 = 0.95$, а $\sigma = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В частности, SVM имеет меньшую разницу между восстановленными данными и тестовыми значениями в области низких температур (менее $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$). В таблице 2 представлены параметры качества полученных моделей для всех тестовых выборок спутников ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20.

В качестве примера, на рисунке 4 показано пространственное распределение приземной температуры воздуха с коррекцией и без, полученное с использованием наблюдений ATMS/Suomi-NPP 21 января 2023 года. По данным метеостанций в северо-восточной части исследуемого региона были зафиксированы температуры ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Хорошо видно, что скорректированные данные значительно лучше согласуются с наземными наблюдениями.

Табл. 2. Параметры качества полученных моделей.

Группа	МНК		KNN		Bag		RF		GBM		SVM	
	R ²	σ, °C	R ²	σ, °C	R ²	σ, °C	R ²	σ, °C	R ²	σ, °C	R ²	σ, °C
ATMS/Suomi-NPP												
> 200 м	0.88/3.79		0.89/3.66		0.95/2.59		0.94/2.61		0.94/2.69		0.95/2.55	
200-500 м	0.79/4.77		0.80/4.57		0.88/3.61		0.88/3.60		0.89/3.44		0.87/3.78	
500-800 м	0.74/4.96		0.79/4.49		0.83/4.01		0.84/3.97		0.85/3.85		0.85/3.83	
< 800 м	0.73/5.28		0.80/4.52		0.84/4.08		0.84/4.05		0.85/3.85		0.85/3.90	
ATMS/NOAA-20												
> 200 м	0.87/3.75		0.89/3.62		0.94/2.69		0.94/2.60		0.95/2.62		0.95/2.51	
200-500 м	0.79/4.73		0.81/4.51		0.88/3.62		0.87/3.72		0.88/3.51		0.87/3.72	
500-800 м	0.73/4.91		0.79/4.52		0.81/4.12		0.82/3.99		0.84/3.95		0.84/3.91	
< 800 м	0.73/5.21		0.80/4.57		0.83/4.18		0.84/4.08		0.85/3.91		0.85/3.89	

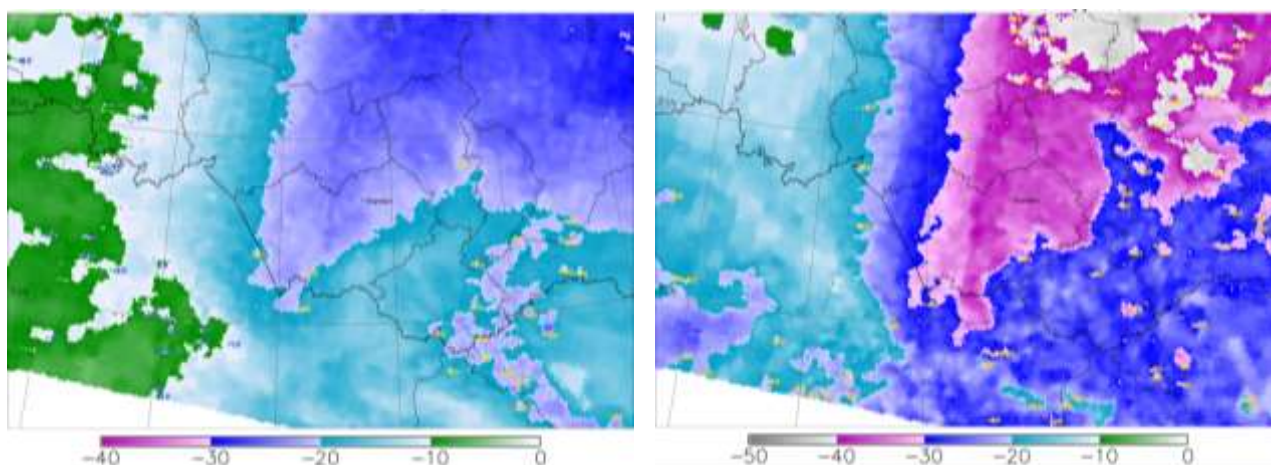


Рис. 4. Температура приземного слоя воздуха по данным ATMS/Suomi-NPP на 21 января 2023 года 20:29 UTC: слева – оригинальные данные; справа – скорректированные данные.

Заключение. Предложен и апробирован метод коррекции измерений температуры приземного слоя воздуха, полученных по данным СВЧ-радиометров и алгоритма MIRS v3.0 с использованием методов машинного обучения. Входными регрессорами послужили результаты алгоритма MIRS, а также открытые климатические данные GFS и ERA5. В качестве области интереса в работе рассматривалась территория юга Западной Сибири. К значимым результатам исследования можно отнести:

1. Показано, что спутниковые оценки температуры приземного слоя воздуха по данным алгоритма MIRS (СВЧ-радиометры ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20) завышены относительно результатов наземных наблюдений, причем для температур ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ разница может достигать до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Создан программный комплекс для коррекции данных MIRS, который внедрен в оперативную цепочку обработки спутниковых данных в лаборатории космического мониторинга и вычислительных технологий АлтГУ (совместно с ФИЦ ИВТ).
3. Показано, что параметры качества полученных моделей, основанных на деревьях решений, позволяют достичь полуторакратного уменьшения дисперсии относительно методов MNK и KNN.
4. Установлено, что лучшие результаты показал метод опорных векторов, где $R^2 = 0.95$, а $\sigma = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В частности SVM имеет меньшую разницу между восстановленными данными и тестовыми значениями в области низких температур (менее $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Shukla P.R., Skea J., Slade R.* IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. DOI:10.1017/9781009157926.
- [2] IPCC, 2007: Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. The Satellite Microwave Sounding Unit Record. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-4-1-2.html (дата обращения 15.06.2023).
- [3] *Uddstrom M.J.* Retrieval of Atmospheric Profiles from Satellite Radiance Data by Typical Shape Function Maximum a Posteriori Simultaneous Retrieval Estimators // *Journal of Applied Meteorology*. 1988. V. 27, № 5. P. 515-49.
- [4] *Kunzi K., Bauer P., Eresmaa R., et al.* Microwave Absorption, Emission and Scattering: Trace Gases and Meteorological Parameters. Publisher: Springer Verlag, Heidelberg, 2011.
- [5] Microwave Integrated Retrieval System User Manual (MIRS) March 2019 Version 1.14. Prepared for: U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS).
- [6] *Auligne T., McNally A. P., Dee D. P.* Adaptive Bias Correction for Satellite Data in a Numerical Weather Prediction System // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133. P. 631-642.
- [7] WMO World Weather Information Service. <https://worldweather.wmo.int> (дата обращения 15.06.2023).
- [8] *Timo H., John V., Roebeling R. et al.* Product User Guide Fundamental Climate Data Record of Microwave Humidity Sounder. Issued by: EUMETSAT Date: 19/10/2020.
- [9] *Aires F., Prigent C., Orlandi E. et al.* Microwave hyperspectral measurements for temperature and humidity atmospheric profiling from satellite: The clear-sky case // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 11,334–11,351. DOI:10.1002/2015JD023331.
- [10] NOAA Satellite Information System. <https://www.noaasis.noaa.gov/POLAR/JPSS/jpss.html> (дата обращения 15.06.2023).
- [11] *Weng F., Zou X., Wang X. et al.* Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for NWP and tropical cyclone applications // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117: D19112, DOI:10.1029/2012JD018144.
- [12] NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS). <http://www.class.noaa.gov> (дата обращения 15.06.2013).
- [13] *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer Series in Statistics, 2009.
- [14] *Schölkopf B., Smola A. J.* Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond. MIT press, 2018.
- [15] *Ванник В.Н., Червоненкис А.Я.* Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения. Москва, Изд. «Наука», 1974.
- [16] *James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R.* An introduction to statistical learning. Springer Texts in Statistics, 2013.
- [17] *Breiman L.* Random forests. // *Machine learning*. 2001. V. 45(1). P.5-32.
- [18] *Friedman, J. H.* (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, Vol. 29, No. 5 (Oct., 2001), pp. 1189-1232.
- [19] National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015, updated daily. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI:10.5065/D65D8PWK.
- [20] *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI:10.24381/cds.adbb2d47.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНА В СТРАТОСФЕРЕ СРЕДНИХ ШИРОТ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В 2003-2021 ГГ. ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Мордвин Е.Ю.^{1,2}, Лагутин А.А.^{1,2}, Волков Н.В.^{1,2}

¹Алтайский государственный университет, Барнаул

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

Работа посвящена изучению поведения метана в нижних слоях стратосферы Северного полушария (50–60 с.ш.) по данным спутниковых наблюдений. Информационной базой послужили наблюдения Фурье-спектрометра ACE–FTS установленного на космической платформе SciSat-1 канадского аэрокосмического агентства (ACE), а также данные лабораторий по исследованию Земли ESRL, входящих в состав NOAA. Было установлено, что средняя скорость роста метана в стратосфере в средних широтах Северного полушария в 2004–2021 гг. может достигать 6 млрд⁻¹/год. Показано, что прирост в концентрации приземного метана, если его выражать в относительных единицах, хорошо согласуется с приростом метана в стратосфере на больших временных интервалах (10 лет и более). Разработан и апробирован новый подход к анализу и прогнозированию поведения метана в стратосфере с использованием байесовских структурных моделей временных рядов BSTS (Bayesian Structural Time Series). Полученные оценки прогноза для 2016–2021 гг. хорошо согласуется с результатами наблюдений спутникового прибора. Средняя скорость роста содержания метана по данным ACE–FTS равна 5.2 млрд⁻¹/год, а по прогнозу BSTS – 5.0 млрд⁻¹/год.

Ключевые слова: метан, стратосфера, ACE–FTS, тренд, временные ряды, BSTS, Северное полушарие.

THE METHANE CONTENT IN THE STRATOSPHERE OF THE MIDDLE LATITUDES OF THE NORTHERN HEMISPHERE IN 2003-2021 ACCORDING TO SATELLITE OBSERVATIONS

Mordvin E.Yu.^{1,2}, Lagutin A.A.^{1,2}, Volkov N.V.^{1,2}

¹Altai State University, Barnaul

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

The work is devoted to the study of the behavior of methane in the lower layers of the stratosphere of the Northern Hemisphere (50–60 N) according to satellite observations. The information base was the observations of the Fourier-spectrometer ACE–FTS installed on the SciSat-1 space platform of the Canadian Space Agency (CSA), as well as data from the Earth System Research Laboratories (ESRL), which are part of NOAA. It was found that the average rate of change of methane in the stratosphere in the middle latitudes of the Northern Hemisphere in 2004–2021 can reach 6 ppb/year. It was shown that the increase in the concentration of surface methane, if expressed in relative units, is in good agreement with the increase in methane in the stratosphere over long time intervals (10 years or more). A new approach to the analysis and prediction of the behavior of methane in the stratosphere using the Bayesian Structural Time Series (BSTS) models has been developed and tested. The obtained estimates of the forecast for 2016–2021 are in good agreement with the results of observations of the satellite instrument. According to the ACE–FTS data, the average rate of change of the methane content is 5.2 ppb/year, while the BSTS forecast is 5.0 ppb/year.

Keywords: Methane, stratosphere, ACE–FTS, trend, time series, BSTS, Northern Hemisphere.

Введение. Метан (CH₄) является сильным парниковым газом, который имеет большую потенциальную способность влияния на изменение климата, чем углекислый газ CO₂ [1]. Также CH₄ имеет значительное воздействие на атмосферную химию нашей планеты. Большая часть метана сконцентрирована в тропосфере (нижняя атмосфера), но некоторое его количество достигает стратосферы.

Озоновый слой, играющий жизненно важную роль в защите Земли от вредного ультрафиолетового (УФ) излучения, расположен преимущественно в стратосфере. Метан способствует разрушению озона, высвобождая реактивные химические вещества, которые в свою очередь химически взаимодействуют с O_3 [2]. Изучение метана в стратосфере позволяет оценить его роль в озоновой химии и потенциальные последствия для стабильности и восстановления озонового слоя.

Также метан взаимодействует с другими химическими компонентами атмосферы, что приводит к образованию вторичных загрязнителей и аэрозолей. В стратосфере CH_4 может участвовать в сложных химических реакциях, влияющих на концентрацию некоторых парниковых газов, таких как водяной пар и азотные соединения [3-4].

Изменения концентрации и распределения CH_4 в атмосфере имеют положительные обратные связи с изменением климата. Например, с повышением температуры воздуха может возрасти выброс метана из природных источников, таких как болота и "вечная" мерзлота. Результаты дополнительной эмиссии будут достигать стратосферы и влиять на климатические изменения и состав атмосферы. В литературе этот процесс называется "метановая бомба" [5]. Исследование поведения метана в стратосфере позволит оценить эти механизмы с большей точностью и усовершенствовать климатические модели.

В настоящее время концентрация метана в атмосфере уже превысила доиндустриальный уровень в 2.5 раза [1]. Только в период с 2000 по 2017 годы выбросы метана увеличились на 9%, то есть более чем на 50 миллионов тонн в год. Даже пандемия коронавируса и последовавшие строгие карантинные меры по всему миру не повлияли на сокращение выбросов, несмотря на оптимистичные прогнозы [6].

Осуществляется достаточное количество экспериментов по наблюдению метана в приземном слое воздуха и свободной тропосфере, однако нет должного внимания к концентрации CH_4 в стратосфере. Причиной отмеченной проблемы является сложная технология прямых измерений, а также относительно низкая концентрация метана по сравнению с тропосферой. Одним из современных методов измерения газа является технология спутникового дистанционного зондирования, позволяющая выполнять непрерывные наблюдения за всей поверхностью планеты.

Полная информация об источниках, транспорте и стоке метана, в том числе в стратосфере, критически важна для точной оценки его вклада в изменение климата и прогнозирование будущих климатических сценариев.

Целью работы является изучение поведения метана в нижних слоях стратосферы Северного полушария (50-60 с.ш.) по данным спутниковых наблюдений ACE-FTS/SciSat-1.

Спектрометр ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment – Fourier Transform Spectrometer) базируется на космическом аппарате SciSat-1 [7], канадского аэрокосмического агентства (ACE), который был выведен на орбиту 12 августа 2003 года. Основная цель программы состояла в получении информации о вертикальном профиле газовых компонентов в атмосфере, включая: метан, озон, окись азота и другие газы. Следует отметить, что спутник движется по солнечно-синхронной полярной орбите на высоте 650 км.

В основе оптической системы ACE-FTS лежит интерферометр Фурье [8]. Прибор измеряет инфракрасное излучение в ИК-диапазоне $750\div 4400\text{ см}^{-1}$ с высоким спектральным разрешением. Наблюдения выполняются таким образом, что оптическая система спектрометра направлена на Солнце, но при этом линия зрения по касательной проходит через верхние слои атмосферы Земли. Такая геометрия наблюдения называется лимбовой. Также прибор способен регистрировать излучение, приходящее от других источников, таких как сама атмосфера, что заложено в конструкцию этого инструмента.

На этапе обработки алгоритм преобразует спектрограмму из временного пространства в спектральное. Полученные данные проходят процесс калибровки, в результате которой исправляются систематические ошибки, вызванные, например, атмосферным рассеянием или инструментальным шумом. Восстановление параметров атмосферы выполняется посредством поиска наиболее подходящего спектра из заранее сформированной базы, называемой LUT

(Look Up Table) [8]. В настоящее время актуальной версией алгоритма является V5.1, однако в исследовании использовались данные V5.0.

В качестве примера точками на рисунке 1 показаны области наблюдения ACE-FTS, сделанные в течение 2005 года. Хорошо видно, что ACE-FTS имеет редкое покрытие наблюдениями на экваторе, тропиках и полярных регионах, а большинство из них сосредоточены в средних широтах Северного и Южного полушарий.

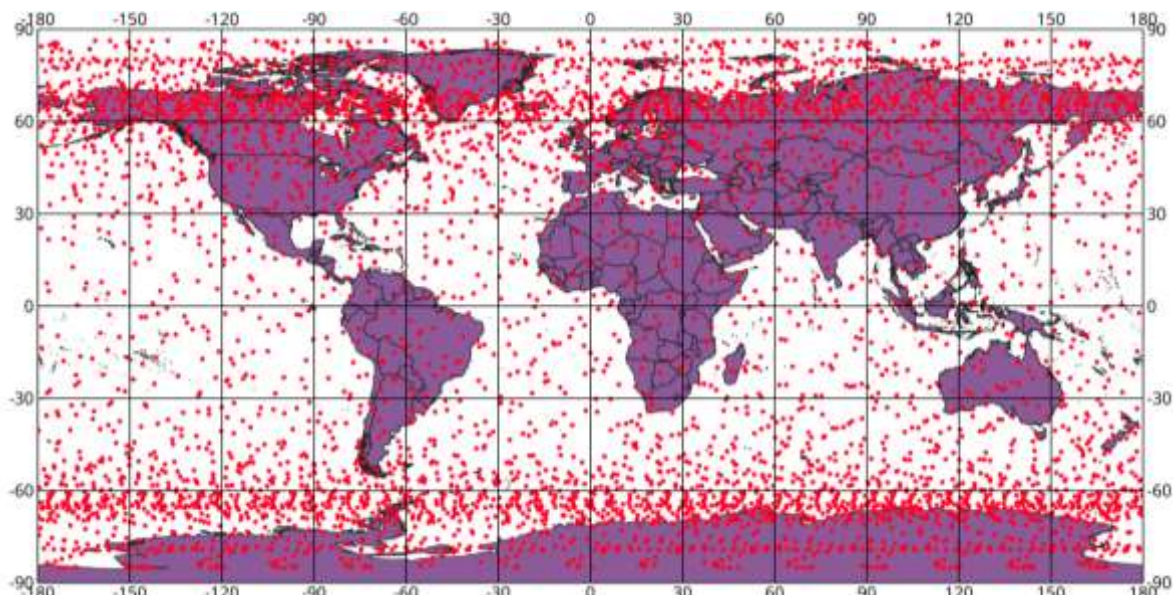


Рис. 1. Пространственное распределение наблюдений ACE-FTS, выполненных в течение 2005 года.

Сеть ESRL. Лаборатории по исследованию Земли ESRL (Earth System Research Laboratory) представляют собой объединение, включающее четыре лабораторий NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [9]. В их основе лежит сеть наблюдательных станций, расположенных на разных континентах и оснащённых специализированными инструментами, такими как сверхточные спектрометры и газоанализаторы для измерения содержания углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и оксида азота (N_2O).

К используемым в ESRL методам измерения относятся также самолетные наблюдения, лидары, стратосферные зонды. Однако, только наземные станции ESRL проводят постоянный мониторинг концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы с высокой частотой наблюдений. Данный подход позволяет получать точные данные о распределении и изменениях концентрации этих газов на местном, региональном и глобальном уровнях.

В рамках программы ESRL разрабатываются методы для поиска источников выбросов парниковых газов. Доступными являются не только результаты этих алгоритмов, но и исходный код модели, который распространяются через электронный сервис ESRL. Эта информация является основой для разработки стратегий сокращения выбросов парниковых газов и принятия мер по уменьшению негативного влияния на климат и окружающую среду.

Кроме наземных наблюдений ESRL также использует данные дистанционного зондирования для мониторинга парниковых газов на глобальном уровне. Спутниковые системы, такие как OCO-2 (NASA's Orbiting Carbon Observatory) и Sentinel-5P, собирают данные о распределении и концентрации парниковых газов на всей планете. Также данные ESRL используются для калибровки и верификации результатов других проектов по мониторингу парниковых газов, в частности, спутниковых наблюдений, о которых упоминалось ранее.

Метан в стратосфере. Важной информацией при прогнозировании поведения метана в стратосфере является его взаимосвязь с метаном в приземном слое воздуха. Известно, что все источники CH_4 находятся на поверхности Земли, а в стратосферу газ попадает за счет механизма интрузии или «прорыва тропопаузы» [10]. Основной сток (разрушение газа) происходит при взаимодействии со свободным радикалом OH [11], который образуется в стратосфере под действием солнечного излучения.

Анализ обозначенной выше взаимосвязи выполнялся с использованием подхода, описанного в работе [12], где представлены результаты изучения долгосрочных трендов изменения содержания метана в стратосфере в период с 1978 по 2003 годы. Суть метода заключается в использовании полинома второй степени для оценки изменения концентрации парниковых газов, а долгосрочное изменение этого параметра выражается в процентах относительно первого значения временного ряда. Также в работе [12] было показано, что выраженный таким образом прирост метана с хорошей точностью воспроизводится на всех высотах стратосферы и согласуется с ростом метана в тропосфере.

Согласно этому подходу была выполнена оценка скорости изменения концентрации метана в стратосфере Северного полушария и в приземном слое воздуха для периода 2004-2021 гг. В качестве входной информации использовались результаты наземной сети наблюдений ESRL и данные ACE-FTS, лежащие в области 50-60 с.ш. Анализ прироста метана выполнялся для данных, описывающих концентрацию газа на высотах 150, 100, 75 и 50 гПа. Рисунок 2 демонстрирует поведение метана на различных уровнях стратосферы, а также результаты аппроксимации полиномом второй степени. Видно, что прирост концентрации метана в период 2004-2022 гг. в среднем был равен 6%.

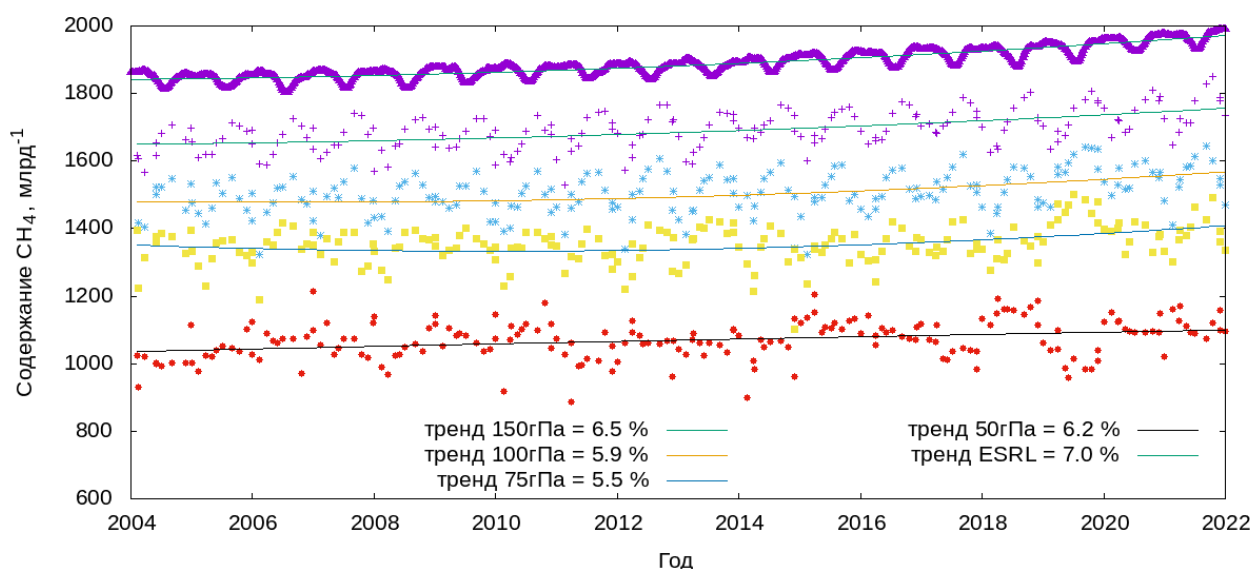


Рис. 2. Скорость изменения метана в стратосфере средних широт Северного полушария и приземном слое воздуха по данным ACEFTS/SciSat-1 и сети ESRL в 2004-2021 гг.

Однако, следует отметить, что прирост на небольших временных интервалах (длительностью 2–3 года) на высотах 150, 100, 75 и 50 гПа будет значительно отличаться. В первую очередь это связано с механизмом проникновения метана в стратосферу, о чем было упомянуто ранее. В стратосфере диффузия метана вверх происходит достаточно медленно, по различным оценкам от 3 до 10 лет [13,14]. Таким образом, оценку скорости роста концентрации газа на высотах более 100 гПа следует выполнять, используя ретроспективные наземные наблюдения с задержкой от 2 до 10 лет.

Полученный результат показывает, что прирост в концентрации приземного метана хорошо согласуется с приростом метана в стратосфере на больших временных интервалах (10 лет и более). Данный эффект можно использовать для оценки газа в стратосфере при отсутствии прямых наблюдений.

Модель BSTS. Следующий этап исследования был посвящен прогнозированию поведения метана в стратосфере. Для этой цели использовались байесовские структурные модели временных рядов BSTS (Bayesian Structural Time Series). BSTS представляет собой пакет для работы с последовательностями данных, использующий байесовские статистические методы для нахождения нелинейных взаимосвязей между исследуемой величиной и обозначенными регрессорами. Пакет BSTS был разработан командой программистов компании Google под руководством Стивена Скотта [15].

Разложение временного ряда на составные компоненты в BSTS может быть представлено следующим образом:

$$y_t = \mu_t + \gamma_t + \sum_{j=1}^J \beta_j x_{jt} + \varepsilon_t,$$

где y_t – значение временного ряда в момент времени t , μ_t – трендовая компонента, γ_t – сезонная компонента, x_{jt} – значение регрессора j в момент времени t , β_j – вклад регрессора j в модель, ε_t – остаточная компонента, которая обычно является случайными шумами в данных.

Процесс прогнозирования с использованием BSTS включает подбор оптимальных параметров модели и получение прогнозов для будущих значений ряда. Благодаря байесовскому подходу, BSTS предоставляет апостериорное распределение вероятностей для каждого прогнозируемого значения, что позволяет оценить не только среднее значение прогноза, но и его дисперсию и доверительные интервалы.

Результаты. Финальный этап исследования включал настройку, обучение и верификацию модели для прогнозирования поведения метана в стратосфере. На данном шаге в качестве основного инструмента анализа данных использовался метод BSTS, реализованный для языка программирования R [16].

Отметим, что основным предиктором в изменении концентрации метана в стратосфере является активность приземных источников. Причем изменение метана в стратосфере запаздывает на некоторое время относительно приземной концентрации. Для согласования этих рядов было выполнено совмещение локальных максимумов, которые наблюдаются каждый год. Для наземных данных ESRL величина этого сдвига вперед приблизительно равна 195 дней.

Мы полагаем, что разумным будет добавить в модель 4 дополнительных предиктора, а именно содержание метана в приземном слое воздуха для периода 1-4 год назад. Предполагается, что таким образом учитывается медленная скорость вертикальной диффузии газа в слоях стратосферы. Также в первом приближении, следует исключить из предикторов сток метана, так как скорость этого процесса практически не меняется год от года.

На первом шаге анализа временных рядов с использованием R и модели BSTS выполнялась подготовка входных данных. Для этой цели были получены среднемесячные значения наблюдений ACE-FTS и ESRL. С одной стороны, такое преобразование позволило получить непрерывный ряд данных, так как оба источника информации предоставляют 3-4 наблюдения в месяц. С другой стороны, значительно сокращает процессорное время, необходимое для обучения прогностической модели.

Следующий шаг включал усвоение данных и преобразование их во временные ряды. Отметим, что данные ACE-FTS и ESRL обрабатывались отдельно друг от друга. Далее временной ряд ACE-FTS был разделен на 2 выборки. Первая включала данные за период 2004-2015 гг., вторая 2016-2022 гг. Аналогично выполнена подготовка наземных данных ESRL.

Далее задавались параметры модели BSTS, которые включали разложение временного ряда на компоненты, которые описывают следующие объекты: `AddLocalLinearTrend`, `AddLocalLevel`, `AddSeasonal` и `AddSemilocalLinearTrend`. После выполнялось обучение модели на данных из первой выборки.

В результате были получены две модели: одна для высоты 100 гПа, вторая для 150 гПа. Количество итераций было подобрано эмпирически, и в итоговой версии было равно 20000. Параметры качества полученной модели согласно диагностической информации BSTS варьировались от 0.95 до 0.98, а значимость выбранных предикторов от 0.25 до 0.4.

На последнем шаге был построен прогноз хода метана в стратосфере для периода 2016-2021 гг. Рисунок 3 демонстрирует вариации содержания метана в стратосфере на высотах 100 и 150 гПа по данным ACE-FTS и прогноз, полученный с использованием обученной ранее модели BSTS. Видно, что полученные кривые хорошо согласуются с результатами наблюдений спутникового прибора. Средняя скорость роста содержания метана в этот период по данным ACE-FTS равна 5.2 млрд⁻¹/год, а прогноз BSTS – 5.0 млрд⁻¹/год.

Таким образом, полученная модель, с опорой только на наземные наблюдения, может быть использована для прогнозирования поведения метана в стратосфере. Несмотря на разумный прогноз, в исследовании не рассматривалась «тонкая» настройка параметров BSTS, а

также влияние других предикторов, что теоретически может улучшить результат моделирования. Также следует отметить, что оценки скорости роста метана в стратосфере по данным аппроксимации полиномом второй степени хорошо согласуются с прогнозом BSTS.

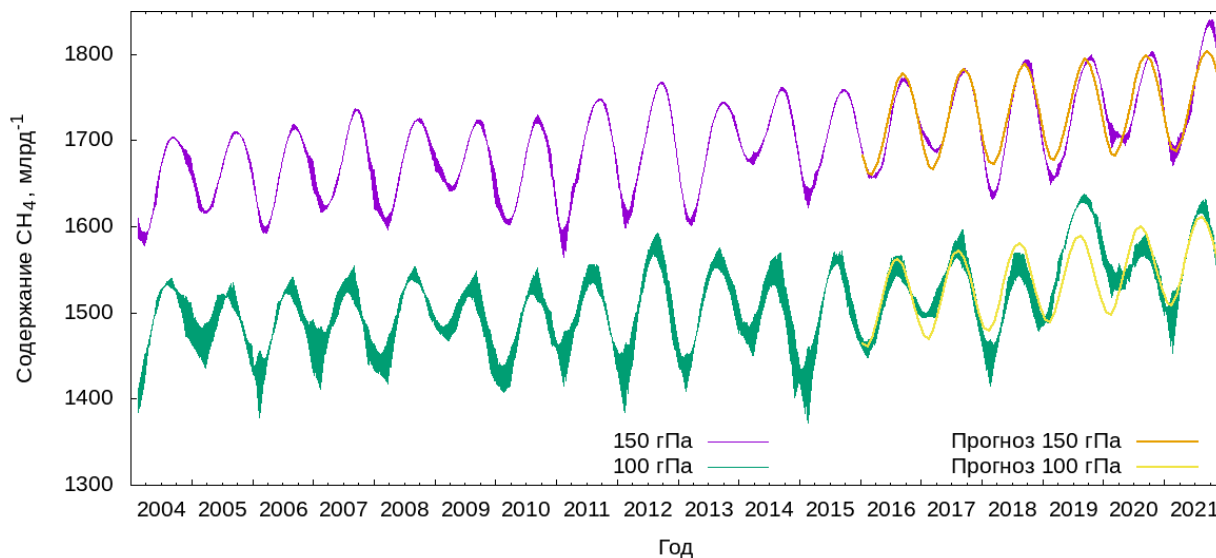


Рис. 3. Концентрация метана в стратосфере средних широт Северного полушария (50-60 с.ш.) на высотах 100 и 150 гПа по данным ACE-FTS на период 2004-2021 гг. и прогноза для 2016-2021 гг., полученного с использованием модели BSTS.

Заключение. Работа посвящена изучению поведения метана в нижних слоях стратосферы Северного полушария (50-60 с.ш.) по данным спутниковых наблюдений ACE-FTS/SciSat-1. К значимым результатам исследования можно отнести:

1. Сформирован архив спутниковых данных ACE-FTS/SciSat-1, содержащий наблюдения концентрации метана в стратосфере для периода 2004-2022 гг.
2. Установлено, что средняя скорость роста метана в стратосфере в средних широтах Северного полушария в исследуемый период может достигать $6 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$.
3. Показано, что прирост в концентрации приземного метана, если его выразить в относительных единицах, хорошо согласуется с приростом метана в стратосфере на больших временных интервалах (10 лет и более). Данный эффект можно использовать для оценки газа в стратосфере при отсутствии прямых наблюдений.
4. Разработан и апробирован новый подход к анализу и прогнозированию поведения метана в стратосфере с использованием байесовских структурных моделей временных рядов BSTS. Полученные оценки прогноза для 2016-2021 гг хорошо согласуется с результатами наблюдений спутникового прибора. Средняя скорость роста содержания метана по данным ACE-FTS равна $5.2 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, а по прогнозу BSTS – $5.0 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$.

Работа выполнена при поддержке ФИЦ ИВТ (проект «Методы и технологии обработки временных серий спутниковых данных для оценки региональных источников парниковых газов»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shukla P.R., Skea J., Slade R. et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. DOI:10.1017/9781009157926.
- [2] Белан Б.Д. Озон в тропосфере / Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2010. С. 487. ISBN 978-5-94458-117-4.
- [3] Frank F., Jöckel P., Gromov S. and Dameris M. Investigating the yield of H₂O and H₂ from methane oxidation in the stratosphere // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. V. 18(13). P. 9955-9973.

- [4] *Le Bodelier P., Steenbergh A. K.* Interactions between methane and the nitrogen cycle in light of climate change // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2014. V. 9-10. P. 26-36.
- [5] *Glikson A.* The methane time bomb // *Energy Procedia*. 2018. V.146. P. 23-29.
- [6] *McNorton J., Bousserez N., Agustí-Panareda et al.* Quantification of methane emissions from hotspots and during COVID-19 using a global atmospheric inversion // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. P.5961-5981, DOI:10.5194/acp-22-5961-2022.
- [7] *Bernath P., Boone C., McLeod S.D. et al.* Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview // *Geophysical research letters*. 2005. № 32(15). DOI:10.1029/2005GL022386.
- [8] *Boone C.D., Nassar R., Walker K.A. et al.* Retrievals for the atmospheric chemistry experiment Fourier-transform spectrometer // *Applied optics*. 2005. № 44(33). P.7218-7231. DOI:10.1364/AO.44.007218.
- [9] Global Monitoring Laboratory. Earth System Research Laboratories <https://gml.noaa.gov> (дата обращения 15.06.2023)
- [10] *Gottelman A., Hoor P., Pan L.L et al.* The extratropical upper troposphere and lower stratosphere // *Reviews of Geophysics*. 2011. V. 49(3). DOI:10.1029/2010RG000351.
- [11] *Ehhalt D.H., Schmidt U.* Sources and sinks of atmospheric methane // *PAGEOPH*. 1978. V. 116. P. 452-464. DOI:10.1007/BF01636899.
- [12] *Keckhut P., Jumelet J., Hauchecorne A. et al.* Long-term changes of methane and hydrogen in the stratosphere in the period 1978–2003 and their impact on the abundance of stratospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005. V. 110(D9). DOI:10.1029/2004JD005083.
- [13] *Mote P.W., Dunkerton T.J., McIntyre M.E. et al.* Vertical velocity, vertical diffusion, and dilution by midlatitude air in the tropical lower stratosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103(D8). P. 8651-8666.
- [14] *Waugh D.W., Randel W.J., Hall T.M. et al.* Three-dimensional simulations of long-lived tracers using winds from MACCM2 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994. V. 99(D7). P.14741-14760. DOI:10.1029/94JD00878
- [15] RAnalytics, Introduction to Bayesian Structural Time Series (BSTS) models. <https://ranalytics.github.io/tsa-with-r/ch-intro-to-bsts.html> (дата обращения 05.06.2023).
- [16] Official documentation to R language. <https://cran.r-project.org> (дата обращения 05.06.2023).

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ МЕТАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И ПРОГНОЗАМ ПО МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ

Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

В статье представлен метод оценки изменений потоков метана в пространстве и по времени, основанный на использовании спутниковых данных и прогнозах с использованием модели переноса-диффузии. Предложенный алгоритм позволяет оптимально оценить области с высокими эмиссиями метана, а также изучить динамику этих оценок в разные сезоны. Эта методика представляет собой эффективный инструмент для идентификации потенциальных источников метана и проведения более детального исследования этих областей.

Ключевые слова: усвоение данных, спутниковые данные, потоки метана.

ESTIMATION OF THE SPATIO-TIME DISTRIBUTION OF METHANE FLOWS ACCORDING TO SATELLITE DATA AND FORECASTS USING THE TRANSPORT AND DIFFUSION MODEL

Platonova M.V., Kotler V.D., Klimova E.G.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

The article presents a method for estimating changes in methane fluxes in space and time, based on the use of satellite data and forecasts using a transport-diffusion model. The proposed algorithm makes it possible to optimally estimate areas with high methane emissions, as well as to study the dynamics of these estimates in different seasons. This technique is an effective tool for identifying potential sources of methane and for more detailed investigation of these areas.

Keywords: data assimilation, satellite data, methane fluxes.

Введение. Глобальное изменение климата является одной из важнейших и широко обсуждаемых тем в научных и практических кругах. Эта проблема оказывает существенное влияние на экономику, социальную сферу и окружающую среду. Исследование потоков парниковых газов, таких как углекислый газ и метан, составляет ключевой аспект для понимания и противодействия глобальному изменению климата. Следовательно, мониторинг и оценка потоков парниковых газов имеют решающее значение для изучения процессов глобального потепления и принятия соответствующих мер по предотвращению негативных последствий.

В данной работе предлагается методика оценки пространственно-временного распределения потоков метана на основе спутниковых данных и прогнозов, с использованием расчётов модели переноса-диффузии. Разработан алгоритм получения оптимальной оценки потоков метана, основанный на методе наименьших квадратов. Алгоритм представляет собой частный случай детерминированного варианта ансамблевого фильтра Калмана.

Методы и материалы. В данной работе применяется динамико-стохастический подход к задаче усвоения данных [1, 2]. Усвоение данных подразумевает совместное использование данных наблюдений и данных расчётов по математической модели для получения оптимальной оценки искомой величины. Для решения задачи усвоения данных требуются значительные вычислительные ресурсы, и в настоящее время широко применяются ансамблевые алгоритмы, которые позволяют снизить вычислительную сложность. Один из таких алгоритмов - алгоритм LETKF, представляет собой вариант детерминированного ансамблевого фильтра Калмана. В ходе работы алгоритма LETKF анализ вычисляется только для среднего значения ансамбля, а затем вычисляется ансамбль анализов. Ниже приведены формулы шага анализа алгоритма LETKF (1)-(2):

$$x_a = \bar{x}_f + Dx_f \tilde{P}^a (HDx_f)^T R^{-1} (y^i - Hx_f^i), \quad (1)$$

$$P^a = [(N - 1)I + (HDx_f)^T R^{-1} HDx_f]^{-1}, \quad (2)$$

где x_a – средняя оценка вектора состояния, I – единичная матрица, N – размер ансамбля, \bar{x}_f – средний прогноз вектора состояния системы, Dx_f – ансамбль ошибок прогноза, H – оператор наблюдений, y^i – среднее наблюдение за состоянием системы в момент i , x_f^i – средний прогноз состояния системы в момент i [3, 4].

В данной работе приведены результаты численных экспериментов с использованием модельных и реальных данных для оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли. Численные эксперименты с модельными и реальными данными можно условно разбить на следующие этапы:

- Определение временного интервала: в алгоритмах обработки больших объемов спутниковых данных для оценки потоков парниковых газов принято определять временной интервал, например, неделю, в предположении, что значения потоков остаются постоянными в течение этого периода.
- Разбиение поверхности Земного шара на подобласти: поверхность Земли разделяется на регионы, для которых производится оценка потоков. Оценка проводится отдельно для каждой подобласти.
- Задание начальных (климатических) значений потоков в регионах: при наличии задаются начальные значения потоков парниковых газов для каждой подобласти.
- Интерполяция данных: производится интерполяция данных в узел сетки для вычисления невязки (разности данных и прогноза).
- Получение оценки потоков парниковых газов для заданной территории в заданный период времени.

Численные эксперименты. Для модельных экспериментов были использованы данные расчётов, полученные с использованием модели MOZART-4. Эти данные были искусственно зашумлены путем добавления случайных величин, кроме того, в одной из подобластей был смоделирован источник.

Для реализации численных экспериментов с модельными данными были заданы случайные величины с нормальным распределением, имеющие нулевое среднее и заданную дисперсию. Эти случайные величины были использованы для добавления случайных ошибок к «истинным» значениям концентрации и потока, чтобы смоделировать наблюдения и прогнозы. Для моделирования наблюдений использовались случайные ошибки, имеющие распределение $N(0, 10)$, а для моделирования первого приближения прогноза – случайные ошибки с распределением $N(0, 15)$. А для моделирования потока были использованы случайные величины имеющие распределение – $N(0, 5)$. Для оценки точности и эффективности разработанного алгоритма проводилось сравнение полученных оценок с задаваемой «истинной». Где $N(a,b)$ – это нормальное распределение с математическим ожиданием a , и дисперсией b .

В ходе численного эксперимента с модельными данными было выполнено моделирование потока метана размером 30 ppb в одной подобласти. В эксперименте были рассмотрены два варианта реализации алгоритма: в первом варианте не использовалась априорная информация о потоке (первое приближение), а во втором варианте алгоритма использовалась информация о первом приближении. В первом варианте алгоритма, где не было предоставлено априорной информации о потоке, была получена ошибка потока в размере 5.2 ppb. Это означает, что модель не смогла точно предсказать реальное значение потока в подобласти. Однако, во втором эксперименте, где было предоставлено первое приближение потока, ошибка потока составила 2.8 ppb. Таким образом, результаты численного эксперимента с модельными данными показывают, что наличие априорной информации о потоке может значительно повлиять на точность получаемой оценки потока.

В рамках численных экспериментов с реальными данными был проведен поиск оценок потоков для подобластей на территории России за 2005 год. Для этого использовались спутниковые данные за указанный период и результаты расчетов модели MOZART-4 с 1 января 2005 года по 31 декабря 2005 года.

В процессе экспериментов производилось вычисление средних значений оценок потоков метана за период 7 дней внутри подобластей приблизительно одинаковой площади, равной 1000 км на 1000 км. Учитывая шаг сетки модели, который составляет примерно 2,8, каждая подобласть содержала 32 узла сетки модели. Затем данные на этой сетке были уплотнены внутри каждой подобласти с использованием алгоритма линейной интерполяции, в результате чего была получена сетка с шагом 1,4 градуса и 105 узлами сетки для каждой подобласти.

Для каждого узла сетки модели в радиусе 50 км использовались спутниковые данные, которые были усреднены, также был проведен этап контроля, во время которого отбрасывались результаты измерений с отклонением от прогноза, превышающим заданное значение. Оценки потоков, полученные в ходе экспериментов с частотой один раз в 12 часов, были усреднены за недельный период, учитывая частоту спутниковых измерений.

В качестве первого приближения потоков было принято нулевое значение, поскольку информация об исходных потоках отсутствовала. Для генерации ансамбля возмущений потоков использовались случайные величины с нормальным распределением, имеющим нулевое математическое ожидание и дисперсию, равную 20 ppb.

Для полученных оценок потоков метана, был вычислен параметр, характеризующий поведение отклонения полученных оценок от среднего по всей области значения. Для набора векторов: $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ – вектора оценок в моменты времени t_1, \dots, t_n соответственно, для каждого момента времени t_i для всех подобластей вычислялось среднее по всей области значение, где L – количество подобластей (3):

$$S_i = \sum_{j=1}^L \varphi_i^j / L \quad (3)$$

Затем для каждой подобласти был вычислен параметр (4)-(5):

$$\lambda_j = \frac{|\varphi_i - S_i|}{\sigma} \quad (4)$$

где

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^L (\varphi_i^j - S_i)^2 / (L - 1) \quad (5)$$

В численных экспериментах с реальными данными рассматривались подобласти России, имеющие примерно равную площадь: примерно 1000 км на 1000 км. На рис. 1 показаны подобласти, для которых проводился расчет средних по подобластям за недельный период потоков в течение 2005 года. Параметр λ был рассчитан для каждой из 16 выбранных подобластей и каждого семидневного временного интервала за 2005 год.



Рис. 1. Подобласти, в которых проводились численные эксперименты.

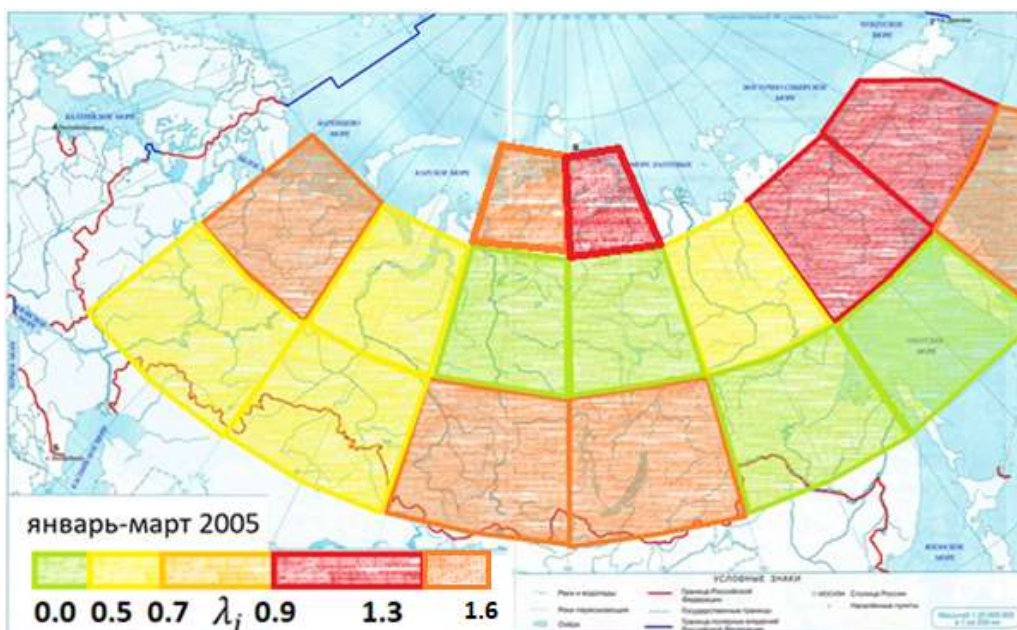


Рис. 2 Динамика поведения параметра λ в зимний период 2005 года.

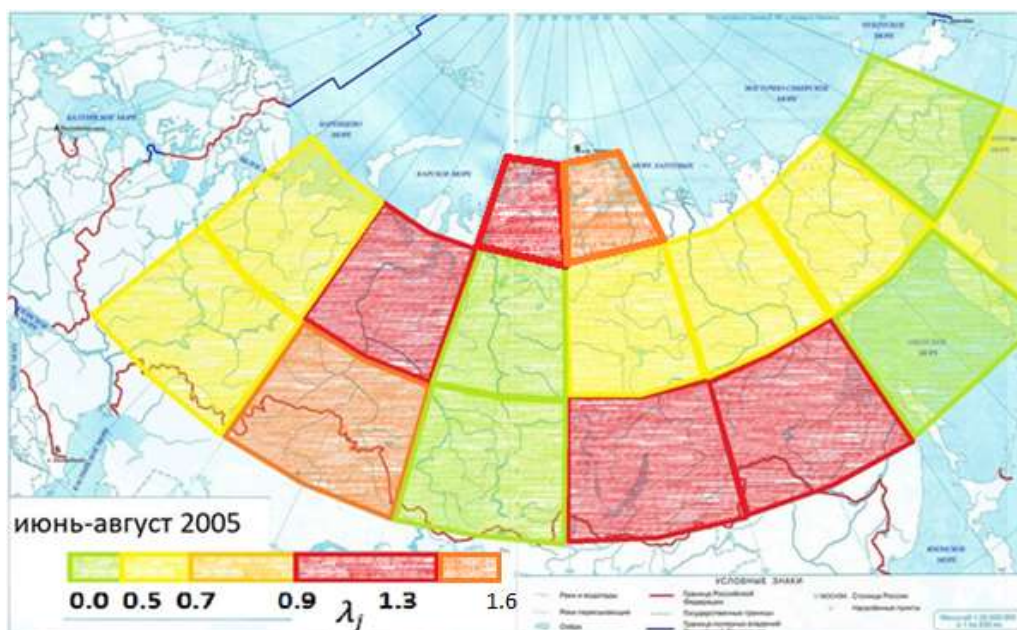


Рис.3 Динамика поведения параметра λ в летний период 2005 года.

На рис. 2 и 3 представлено распределение значения параметра λ для 16 подобластей России в течение зимнего и летнего сезонов 2005 года. Регионы с низкими значениями отклонений от среднего оценок потоков отображаются зеленым цветом, что соответствует мало изменяющимся показателям оценок потоков метана. С другой стороны, красный и оранжевый цвет обозначает повышенное значение отклонений оценок потоков метана от среднего значения.

На рис. 4 представлено изменение среднего значения искомого параметра за каждый месяц в течение 2005 года для двух конкретных подобластей. Подобласть №3 охватывает области с крупными агломерациями и естественными источниками метана, включая Васюганские болота, Новосибирскую область и т.д. (диапазон от 50° с.ш. до 60° с.ш. и от 60° з.д. до 80° з.д.). Подобласть №4 включает регион расположенный западнее (от 50° с.ш. до 60° с.ш. и от 80° з.д. до 100° з.д.), в том числе район озера Байкал. Рисунок позволяет наблюдать динамику и поведение среднего за месяц параметра в указанных подобластях на протяжении всего 2005 года.

На рис. 5 представлено сравнение изменения среднего значения искомого параметра за каждый месяц в течение 2005 года для подобластей Северного региона России. Подобласть номер 15 (60° с.ш. - 70° с.ш., 60° з.д. - 80° з.д.) и подобласть номер 16 (60° с.ш. - 70° с.ш., 80° з.д. - 100° з.д.) представляют из себя регионы - лидеры рейтинга регионов по добыче нефти - Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа с развитой разработкой ископаемых материалов. Рисунок также позволяет наблюдать динамику и сравнивать поведение среднего за месяц параметра в указанных подобластях на протяжении всего 2005 года.

Как видно из рисунка, наблюдается значительная вариативность в уровне активности потоков метана в регионе, который включает крупные агломерации и различные источники метана. Эти изменения могут быть связаны не только с известными природными и антропогенными источниками метана в данной подобласти, но также могут быть обусловлены началом или окончанием отопительного сезона. Влияние сезонных факторов, таких как использование отопительных систем в холодные периоды, может приводить к скачкам в активности потоков метана в данном регионе.

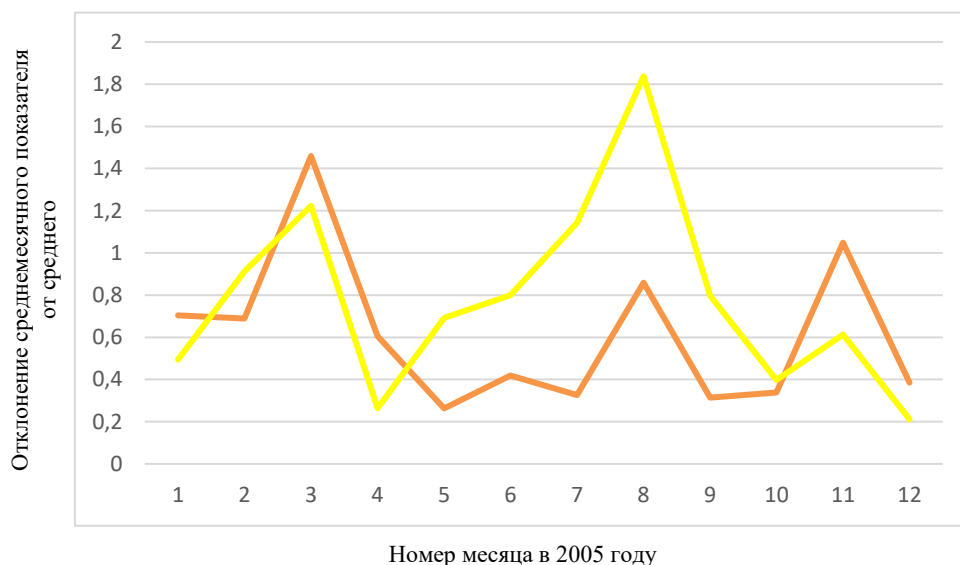


Рис. 4. Поведение по времени среднемесячного значения параметра λ для подобластей Сибири: желтый – для подобласти №3; оранжевый – для подобласти №4.



Рис. 5. Поведение по времени среднемесячного значения параметра λ для регионов Севера России: оранжевый – для подобласти №15; серый – для подобласти №16.

Важно отметить, что при анализе поведения параметра λ в различные периоды и в разные сезоны, наблюдается отсутствие общего тренда в динамике оценки потоков метана для некоторых подобластей. Это явление может быть объяснено неравномерными погодными условиями, такими как скачки температуры от подобласти к подобласти (как следствие, различная продолжительность и масштаб выбросов во время отопительных сезонов). Кроме того, стоит учитывать неравномерное распределение источников метана, таких как промышленные производства, скотоводческие фермы и другие не учтённые в модели источники парниковых газов. Данный вопрос распределения и изучения тренда поведения показателей в различных подобластях вызывает интерес и требует дальнейшего более подробного исследования и изучения.

Заключение. Задача оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений в настоящее время решается с помощью систем усвоения данных. Представлен алгоритм оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли по спутниковым данным и математической модели. Алгоритм представляет собой первый этап разработки системы усвоения данных, полученные результаты можно считать качественной сравнительной оценкой потоков метана для различных регионов.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам – Лагутину Анатолию Алексеевичу и Мордвину Егору Юрьевичу за предоставленные данные и полезные дискуссии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nakamura G., Potthast R. Inverse Modeling: IOP Publishing Ltd., 2015. 484 p.
- [2] Bocquet M. et al. Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2014. V. 14. 322 p.
- [3] Evensen G. Data assimilation. The ensemble Kalman filter: Heideberg: Springer, Verlag, Berlin, 2009. 307 p.
- [4] Feng L., Palmer P.I., Bosch H., Dance S. Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // Atmospheric chemistry and physics. 2009. Vol. 9. 2619 p.
- [5] Feng L., Palmer P.I., Yang Y., Yantosca R.M., Kawa S.R., Paris J.-D., Matsueda H. and Machida T. Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data // Atmospheric chemistry and physics 2011. Vol. 11. 2789 p.
- [6] Feng L., Palmer P.I., Parker R.J., Deutscher N.M., Feist D.G., Kivi R., Morino I. and Sussmann R. Estimates of European uptake of CO₂ inferred from GOSAT XCO₂ retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside // Europe Atmospheric chemistry and physics 2016. Vol. 16. 1289 p.
- [7] Mordvin E.Y., Lagutin A.A. Methane in the atmosphere of Western Siberia Barnaul: Azbuka, 2016. 230p.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЮЖНОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Суторихин И.А.^{1,2}, Донцов А.А.¹, Кириллов В.В.¹, Литвиненко С.А.¹

¹ ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

Для разработки системы оперативного экологического мониторинга Телецкого озера проведены комплексные междисциплинарные исследования пространственного распределения хлорофилла «а» в поверхностном слое воды южной оконечности Телецкого озера, входящей в границы Алтайского биосферного заповедника, в различные периоды годового лимнологического цикла – 29 мая, 31 июля и 21 сентября 2021 года. Исследования включали экспедиционные локальные контактные измерения концентрации хлорофилла и анализ данных дистанционного зондирования из космоса. Показана возможность оценки пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое воды внутриконтинентальных олиготрофных водоемов по данным космических аппаратов Sentinel-2. Малая амплитуда изменения пигментных характеристик фитопланктона в многолетнем аспекте отражает устойчивость функционирования автотрофного звена экосистемы олиготрофного Телецкого озера, входящего в границы Алтайского биосферного заповедника.

Ключевые слова: Телецкое озеро, хлорофилл «а», контактные измерения, дистанционное зондирование, Sentinel-2, атмосферная коррекция.

SEASONAL CHANGES IN THE CONCENTRATION OF CHLOROPHYLL «A» IN THE SURFACE LAYER OF THE UPPER PART OF LAKE TELETSKOYE ACCORDING TO EXPEDITION MEASUREMENTS AND REMOTE SENSING

Sutorikhin I.A.^{1,2}, Dontsov A.A.¹, Kirillov V.V.¹, Litvinenko S.A.¹

¹ FGBUN Institute for Water and Environmental Problem SB RAS, Barnaul

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

To develop a system for operational environmental monitoring of Lake Teletskoye, comprehensive interdisciplinary studies of the spatial distribution of chlorophyll «a» in the surface water layer of the southern tip of Lake Teletskoye, which is part of the boundaries of the Altai Biosphere Reserve, were carried out at various periods of the annual limnological cycle – May 29, July 31 and September 21, 2021 of the year. The studies included expeditionary local contact measurements of chlorophyll concentration and analysis of remote sensing data. In contrast to the previously obtained results, sampling at stations by date and time was associated with the passage of satellite orbits over the lake. The possibility of rapid assessment of the spatial distribution of the concentration of chlorophyll "a" in the surface water layer of inland oligotrophic water bodies according to remote satellite sensing data using a specialized geoinformation system for automated monitoring of rivers and water bodies has been confirmed. Processing of Sentinel-2 satellite data with additional atmospheric correction increases the accuracy of determining the spatial distribution of the concentration of chlorophyll «a». The small amplitude of the change in the pigment characteristics of phytoplankton in the long-term aspect reflects the stability of the functioning of the autotrophic link of the ecosystem of the oligotrophic Lake Teletskoye, included in the boundaries of the Altai Biosphere Reserve.

Keywords: lake Teletskoye, chlorophyll «a», contact measurements, remote sensing, Sentinel-2, atmospheric correction.

Введение. Современный уровень исследования водных объектов предполагает проведение регулярных наблюдений, что затруднительно с учетом необходимости в этом случае выполнения систематических экспедиционных работ для измерения величин, характеризующих

состояние водных объектов и метеорологических параметров, приводящих к их изменению, поэтому актуально в качестве источника информации о состоянии параметров водных объектов использовать данные дистанционного зондирования из космоса. При изучении таких значительных по размерам водоемов, как озера и водохранилища важен пространственный аспект [1,2].

Цель данной работы – исследование пространственной неоднородности и сезонной динамики фотосинтетических пигментов фитопланктона для разработки системы оперативного экологического мониторинга Телецкого озера. Задачи исследования включали экспедиционные локальные контактные измерения концентрации хлорофилла и анализ данных дистанционного зондирования. Отбор проб на станциях по датам и времени был связан с прохождением орбит спутников над озером. Комплексные междисциплинарные исследования пространственного распределения хлорофилла «а» (маркера уровня развития фитопланктона в поверхностном слое воды южной оконечности Телецкого озера, входящей в границы Алтайского биосферного заповедника, были проведены в различные периоды годового лимнологического цикла – 29 мая, 31 июля и 21 сентября 2021 года.

Методы исследований. Для построения картосхем количества хлорофилла на исследуемых участках акватории использовались данные платформы Sentinel-2, и разработанная специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов (ГИС) [3,4].

В целом процедуру обработки спутниковых данных для решения рассматриваемой задачи можно разделить на следующие этапы:

1. атмосферная коррекция с учетом микрофизических параметров приводного аэрозоля, шкалой ветра и волнения водной поверхности, а также функции ремиссии обратной отражательной способности воды Кубелки – Мунка;
2. вычисление концентрации содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое;
3. вычисление спектрального индекса NDCI, данная процедура является опциональным этапом и предназначена для экспресс-оценки, так как не занимает много времени и вычислительных ресурсов;
4. географическая привязка и экспорт, полученных результатов в растровый формат Geotiff.

Дополнительно, для внесения поправок в принятую процедуру атмосферной коррекции по алгоритму Darkspectrumfitting (DSF), был использован созданный вычислительный блок на основе биооптической полуэмперической модели. Входными данными в нем, для вычисления функции Кубелки–Мунка ремиссии обратной отражательной способности воды, являлись микрофизические параметры приводного аэрозоля, шкала ветра и балл волнения водной поверхности.

Для реализации указанных этапов обработки данных дистанционного зондирования были взяты компоненты программного пакета ACOLITE, предназначенный для обработки данных Sentinel-2 и Landsat-8. ACOLITE также содержит набор вычислительных модулей, для определения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое внутриконтинентальных водных объектов [5]. Для верификации спутниковых измерений на основе сравнения с результатами контактных методов, на акватории южной части Телецкого озера отбирали пробы воды батометром Рутнера с борта теплохода-лаборатории ИВЭП СО РАН преимущественно в ясную безоблачную погоду при скоростях ветра не превышающих 2-3 м/с. Концентрацию хлорофилла «а» определяли спектрофотометрированием ацетонового экстракта клеток водорослей фитопланктона, осевших на мембранные фильтры с размером пор 0,8 мкм. Измерения проводили на спектрофотометре ПЭ-5400УФ, концентрацию хлорофилла рассчитывали по общепринятой методике в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90 [6]. На каждой станции комплексом АМК – 03 фиксировали метеопараметры, с использованием аэрозольного спектрометра ИХКиГ СО РАН измеряли микрофизические характеристики (спектр размеров и объемная концентрация) приводного аэрозоля. На основании полученных по приборам данных расчет

ослабления света приземной атмосферой в видимой части спектра проводился по модели приведенной в [7].

Результаты. Результаты обработки контактных данных по распределению концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое воды на акватории Телецкого озера в районе устья реки Чулышмани залива Кыга, и сопряженных спутниковых измерений приведены в таблицах 1-3 и на картосхемах (рисунки 1-3).

Табл. 1. Концентрация хлорофилла «а» (мг/м^3) в поверхностном слое воды в районе устья р. Чулышман и залива Кыга по экспедиционным и спутниковым данным от 29 мая 2021 г.

Участок	Экспедиционные измерения на соответствующих участках акватории по ГОСТ 17.1.4.02-90	Sentinel-2	Sentinel-2 с дополнительной коррекцией
1	0,5±0,1	0,8	0,6
2	0,8±0,1	1,2	1,0
3	1,2±0,1	1,6	1,1

Табл. 2. Концентрация хлорофилла «а» (мг/м^3) в поверхностном слое воды в районе устья р. Чулышман и залива Кыга по экспедиционным и спутниковым данным от 31 июля 2021 г.

Участок	Экспедиционные измерения на соответствующих участках акватории по ГОСТ 17.1.4.02-90	Sentinel-2	Sentinel-2 с дополнительной коррекцией
1	1,5±0,1	0,9	1,3
2	1,8±0,1	0,7	1,5
3	2,1±0,1	1,0	2,0
4	2,9±0,1	2,0	3,0

Табл. 3. Концентрация хлорофилла «а» (мг/м^3) в поверхностном слое воды в районе устья р. Чулышман и залива Кыга по экспедиционным и спутниковым данным от 21 сентября 2021 г.

Участок	Экспедиционные измерения на соответствующих участках акватории по ГОСТ 17.1.4.02-90	Sentinel-2	Sentinel-2 с дополнительной коррекцией
1	0,8±0,1	0,5	1,0
2	1,5±0,1	1,0	1,5
3	2,4±0,1	2,0	2,8

Табл. 4. Интервалы концентрация хлорофилла «а» (мг/м^3) в поверхностном слое воды в районе устья р. Чулышман и залива Кыга по экспедиционным и спутниковым данным в различные периоды исследований в 2021 г.

Дата	Экспедиционные измерения по ГОСТ 17.1.4.02-90	Sentinel-2	Sentinel-2 с дополнительной коррекцией
29 мая	0,5 – 1,2	0,8 – 1,6	0,6 – 1,1
31 июля	1,5 – 2,9	0,7 – 2,0	1,3 – 3,0
21 сентября	0,8 – 2,4	0,5 – 2,0	1,0 – 2,8

Пределы значений концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое воды южной оконечности Телецкого озера, полученные в результате обработки контактных данных и сопряженных спутниковых измерений отличались в различные периоды года (таблица 4). При этом, спутниковые измерения после обработки данных спутников Sentinel-2 с дополнительной атмосферной коррекцией оказались по интервалу ближе к концентрациям хлорофилла «а» для проб воды, проанализированных в соответствии с ГОСТ. Учет микрофизических параметров приводного аэрозоля, метеопараметров, скорости ветра, балла волнения и введенная поправка к принятой атмосферной коррекции по алгоритму Darkspectrumfitting повышают точность определения пространственного распределения концентрации хлорофилла «а».



Рис. 1. Распределение хлорофилла «а» в поверхностном слое воды Телецкого озера в районе устья р. Чулышман и залива Кыга 29 мая 2021 года по результатам спутниковых измерений.



Рис. 2. Распределение хлорофилла «а» в поверхностном слое воды Телецкого озера в районе устья р. Чулышман и залива Кыга, 31 июля 2021 года по результатам спутниковых измерений.



Рис. 3. Распределение хлорофилла «а» в поверхностном слое воды Телецкого озера в районе устья р. Чулышман и залива Кыга 21 сентября 2021 г. по результатам спутниковых измерений.

В целом, все полученные в результате комплексных междисциплинарных исследований 2021 году концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое воды южной оконечности Телецкого озера находятся в пределах, определенных в течение 1993-2009 гг. и соответствуют отмеченным ранее закономерностям сезонной динамики и пространственного распределения пигментных характеристик водорослей фитопланктона озера [8]. Малая амплитуда изменения пигментных характеристик фитопланктона в многолетнем аспекте отражает устойчивость функционирования автотрофного звена экосистемы олиготрофного Телецкого озера.

Выводы.

1. Проведенные исследования показали возможность оперативной оценки пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое воды внутриконтинентальных олиготрофных водоемов по данным дистанционного спутникового зондирования.
2. Полученные результаты обработки данных экспедиций и дистанционного спутникового зондирования показали, что учет микрофизических параметров приводного аэрозоля, метеопараметров, скорости ветра, балла волнения и введенная поправка к принятой атмосферной коррекции по алгоритму Dark spectrum fitting повышают точность определения пространственного распределения концентрации хлорофилла «а».
3. Малая амплитуда изменения пигментных характеристик фитопланктона в многолетнем аспекте отражает устойчивость функционирования автотрофного звена экосистемы олиготрофного Телецкого озера, входящего в границы Алтайского биосферного заповедника.

Исследования проведены в рамках Государственного задания ИВЭП СО РАН при финансовой поддержке Российского Центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сухоруков Б.Л., Ковалева Т.Е., Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. №1. С. 79-90.
- [2] Voronina L., Sadchikov P., Tazhieva S. et al. Effectiveness of the automation selection of water treatment technology in a particular water source // Advanced Materials Research. 2014. Vols. 1073-1076. Pp. 1039-1042.
- [3] Донцов А.А., Суторихин И.А. Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, №5. С. 39-46.
- [4] Донцов А.А. Геоинформационная веб-система сбора и обработки гидрологических и гидробиологических данных о состоянии водоемов: Диссертация на соискание степени к.т.н. по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы. Новосибирск, ФИЦ ИВТ, 2022. 117 с.
- [5] ACOLITE. <http://www.odnature.naturalsciences.be> (дата обращения 23.06.2023).
- [6] ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. ИПК. Издательство стандартов. Москва. 12 с.
- [7] Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л: Гидрометиздат, 1986. 255 с.
- [8] Kirillova T.V., Kirillov V.V., Lovtskaya O.V. The dynamics of phytoplankton pigment characteristics of Lake Teletskoye phytoplankton // Hydrobiologia. 2006. 568. P. 45-55.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ**

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ ВНЕСЕНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ПОЛЯХ ОПХ «КУРАГИНСКОЕ» ФИЦ КНЦ СО РАН

Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П.
Институт биофизики СО РАН, Красноярск

Разработаны технологии построения карт-заданий для дифференцированного внесения основного и листового удобрений на посевах зерновых культур по спутниковым и беспилотным данным. Построены карты-задания для дифференцированного внесения удобрений на полях ОПХ «Курагинское!» Красноярского края по спектральным данным высокого пространственного разрешения (спутниковым данным PlanetScope, беспилотным данным MicaSense RedEdge-MX).

Ключевые слова: точное земледелие, дифференцированное внесение удобрений, карты-задания, MicaSense RedEdge-MX, PlanetScope.

VARIABLE RATE FERTILIZATION ON THE FIELDS OF THE EPF KURAGINSKOE FRC KSC SB RAS

Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Shevyrnogov A.P.
Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk

Task-mapping technologies have been developed for the variable rate fertilization application by basic and leaf fertilizers of grain crops (by satellite and UAV data). Task maps were built for variable rate fertilization on the fields of the experimental production farm Kuraginskoye, Krasnoyarsk Territory, based on spectral data of high spatial resolution. (PlanetScope satellite data, MicaSense RedEdge-MX UAV data).

Keywords: precision farming, variable rate fertilization, task maps, MicaSense RedEdge-MX, PlanetScope.

Введение. Точное земледелие является мировым трендом адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости условий формирования урожая [1-4]. От возможности оценки степени неоднородности сельскохозяйственного поля зависит экономическая и экологическая эффективность применения методик точного земледелия в производстве растениеводческой продукции. Дифференцированное внесение минеральных удобрений снижает риск загрязнения окружающей среды их избыточным количеством. Это позволяет уменьшить негативное влияние на окружающую среду и снизить фитотоксическое воздействие на сельскохозяйственные растения. Цель: развитие методов точного земледелия для дифференцированного внесения удобрений на полях сельскохозяйственных культур.

Объекты и методы исследований. Исследования проводились на землях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН в течение периодов вегетаций 2019, 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. Опытное-производственное хозяйство «Курагинское» расположено в Курагинском районе Красноярского края (рис. 1). Площадь исследуемой территории составила 9775 га. На территории ОПХ имеются поля различного сельскохозяйственного назначения (посевы, многолетние и однолетние травы). Большая часть полей используется для выращивания зерновых культур (пшеница, ячмень, овес).

Проведенные исследования основываются на данных спутниковой (PlanetScope) и беспилотной съемки. Беспилотные съемки выполнены с помощью БВС Геоскан-201 Агро с полезной нагрузкой в виде RGB-камеры Sony RX1RII и мультиспектральной камеры MicaSense RedEdge-MX. Пространственное разрешение данных PlanetScope составило 3 метра, RedEdge-MX 44 см.

По беспилотным и спутниковым данным проводился расчет спектрального вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI наиболее популярный и часто используемый индекс. NDVI впервые описан В.Ж. Рouse в 1973 году и является простым

количественным показателем объема фотосинтетически активной биомассы. Этот индекс использует повышенный контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале (RED) и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR) [5-7]:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (1)$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра.

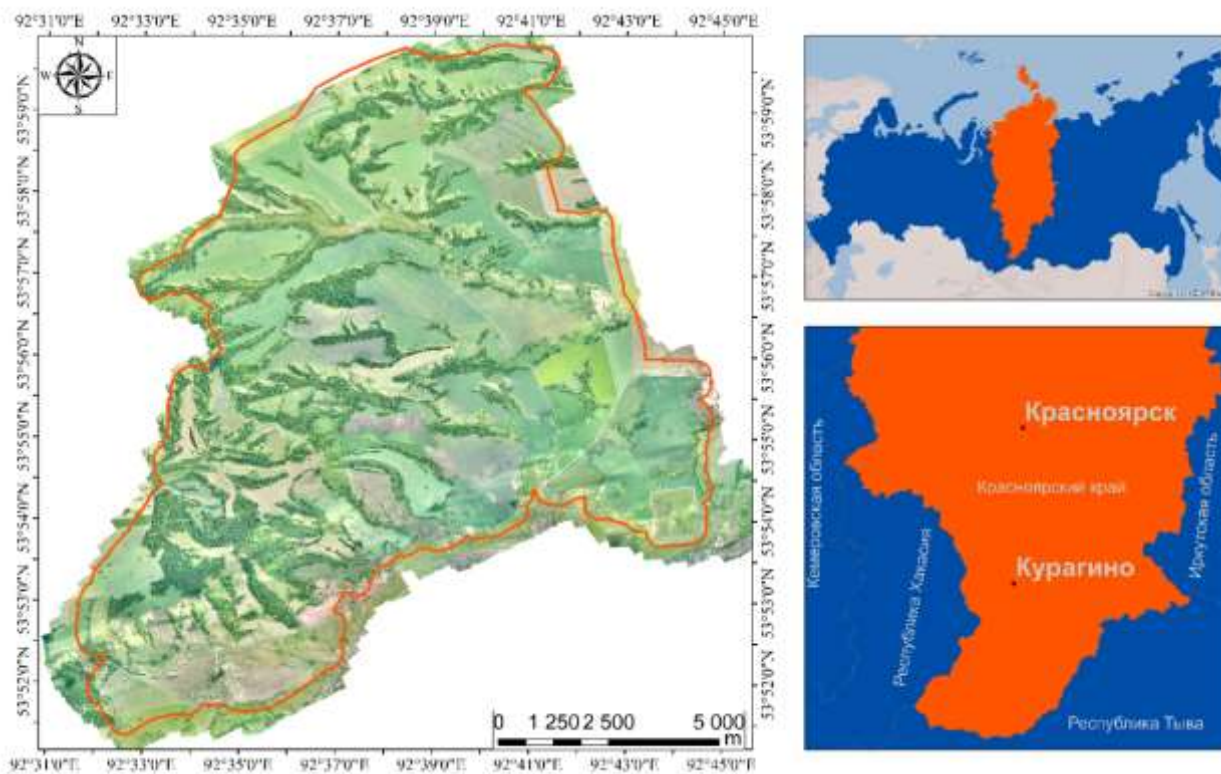


Рис. 1. Месторасположение ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН.

Результаты проведенных исследований. Внесение одинаковой дозы минеральных удобрений по площади всего поля при неоднородном составе питательных веществ в почве приводит к их локальной передозировке или недостаточности. В результате исследований 2020 г. установлено наличие зон полегания в фазе созревания на участках, где были зафиксированы самые высокие значения NDVI в фазу кушения. Для демонстрации данного процесса на рис. 2 представлен – ортофотоплан участка поля № 10 (ячмень) от 18 августа 2020 г. и NDVI от 20 июня 2020 г., на котором зафиксированы участки с полеганием. Уменьшение дозировки азотной подкормки на данных участках позволит уменьшить полегание, и тем самым сохранить урожай.

Разработка и внедрение методики дифференцированного внесения листового азотного удобрения на посевах зерновых культур выполнена по данным беспилотных съемок в фазу кушения и выхода в трубку в 2022 и 2023 г. Для проведения дифференцированного внесения удобрений были выполнены следующие работы:

1. Проведена беспилотная съемка со сверхвысоким пространственным разрешением с помощью Геоскан-201 Агро;
2. Выполнена камеральная обработка полученных мультиспектральных и RGB-данных (Agisoft Metashape);
3. Определены границы контуров полей посевов;
4. Проведено построения векторных карт-заданий для посевов зерновых культур;
5. Произведен экспорт карт-заданий в агронавигатор Trimble самоходного опрыскивателя Туман-3;

6. Проведено дифференцированное внесение азотных удобрений на полях с помощью самоходного опрыскивателя Туман-3.

При построении карт-заданий проводился анализ карт пространственного распределения значений NDVI в фазу кущения (рис. 3). Дифференциация значений NDVI на поле обусловлена наличием неоднородности посевов, что является ключевым фактором при выделении областей для внесения разных доз удобрения. На рисунке 4 представлены сформированные карты-задания для посевов зерновых культур на территории ОПХ «Курагинское».

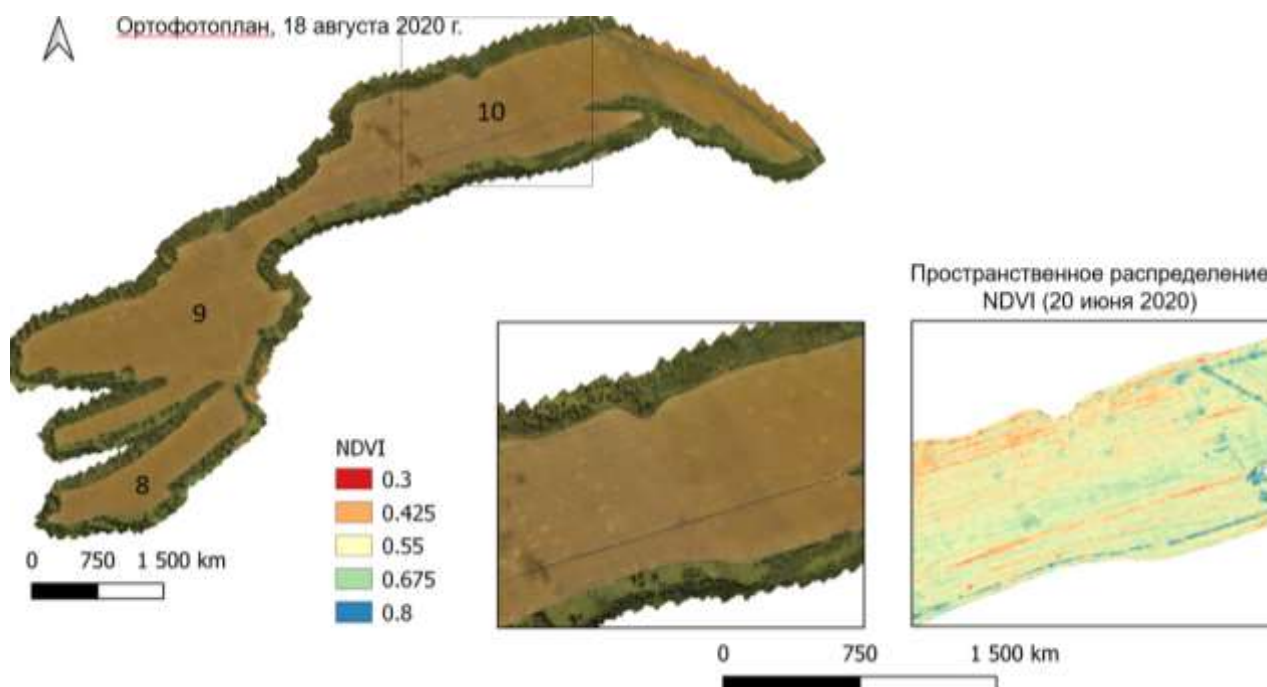


Рис. 2. Ортофотоплан и пространственное распределение NDVI полей № 8, 9, 10, засеянных ячменем в 2020 г.

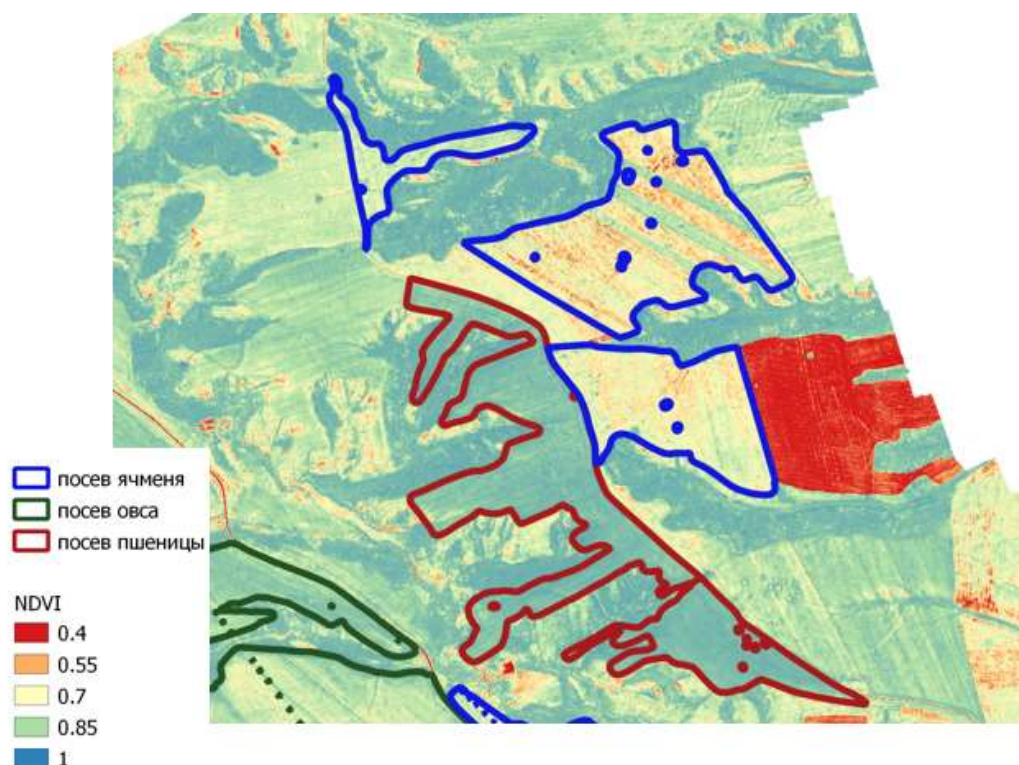


Рис. 3. Пространственное распределение NDVI от 22-23 июня 2022 г. Контура полей ячменя выделены синим цветом, овса - зеленым, пшеницы – красным.

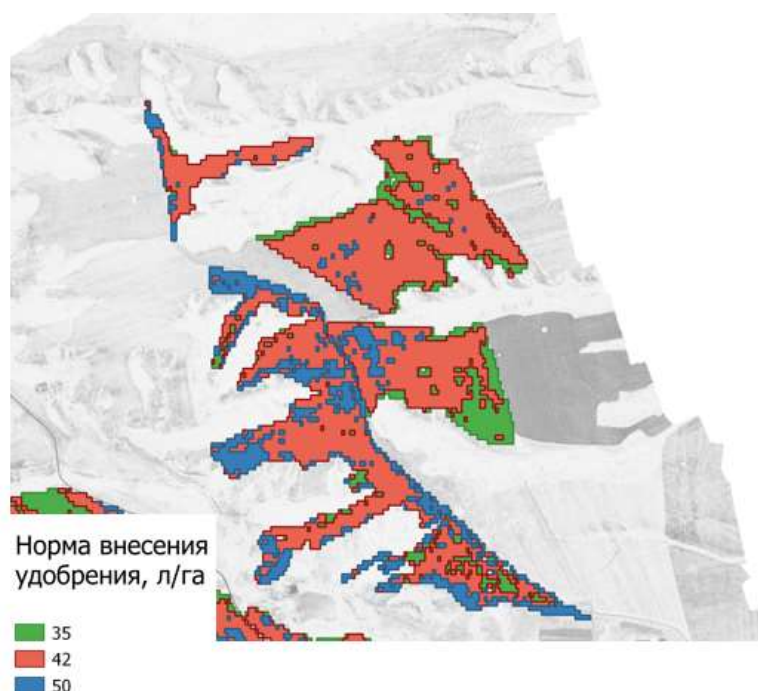


Рис. 4. Карты-задания для дифференцированного внесения азотных удобрений.

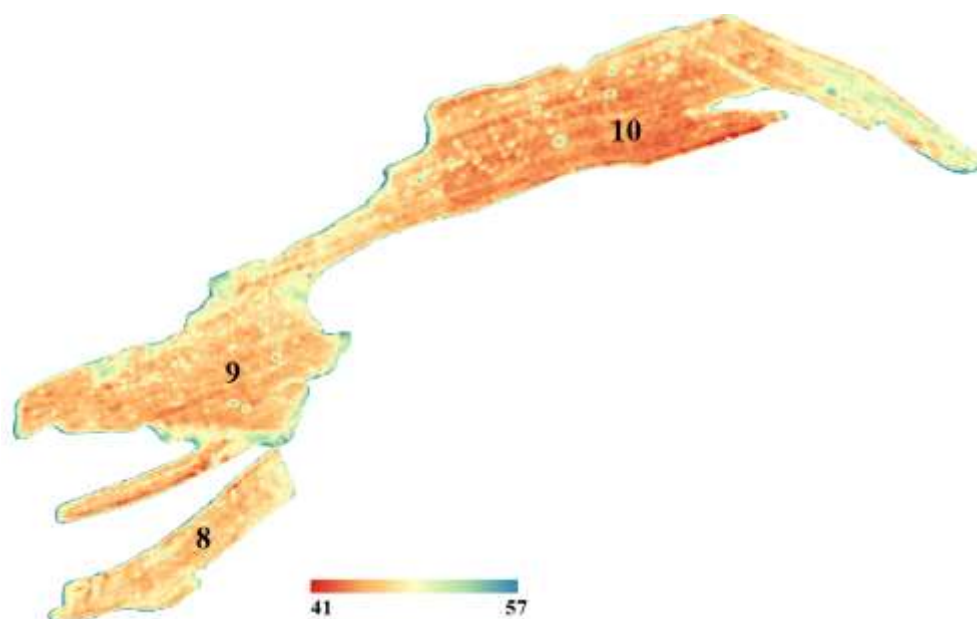


Рис. 5. Пространственное распределение значений интеграла NDVI, расчет величины интеграла произведен за период вегетации 2019 г. (30 мая – 7 сентября).

Методика построения карт-заданий для дифференцированного внесения основного минерального удобрения основана на данных беспилотных и спутниковых измерений, проведенных в течение всего периода вегетации. Комплексный анализ изменений значений вегетационных индексов посевов зерновых культур от всходов до созревания позволяет оценивать внутрипольную неоднородность и производить построение карт плодородия. На рисунке 5 представлены результаты расчета пространственного распределения значений интеграла NDVI в течение всего вегетационного периода. Расчет величины интеграла произведен за период вегетации 2019 г. Области с низким уровнем плодородия обозначены красным цветом и имеют более низкие значения величины интеграла, области синего цвета – наиболее плодородные участки. Многолетний анализ изменчивости внутрипольной неоднородности показал, наличие устойчивых областей с повышенным и пониженным уровнем плодородия. Установлено, что дифференцированное внесение удобрений позволяет нивелировать почвенную неоднородность, повысить качество урожая.

Заключение. В ходе проведенных исследований получены следующие результаты и выводы:

Выполнен анализ изменений спектральных оптических характеристик посевов зерновых культур в течение периодов вегетаций 2019-2023 гг. на территории ОПХ «Курагинское» по спутниковым и беспилотным данным высокого пространственного и временного разрешения.

Построены карты-задания для дифференцированного внесения удобрений на полях ОПХ «Курагинское» по спектральным данным высокого пространственного разрешения (беспилотным данным MicaSense RedEdge-MX).

Проведена апробация и внедрение технологии дифференцированного внесения удобрений в ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН, показавшая результативность предложенного метода.

Установлено, что дифференцированное внесение удобрений позволяет нивелировать почвенную неоднородность, повысить качество урожая на тестовых участках. Учет особенностей высокого и низкого агрофона позволил получить прибавку урожая и высокое качество зерна. Применение описанной технологии в ОПХ «Курагинское» показало в 2022 г. высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Chlingaryan A., Sukkariéh S., Whelan B.* Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018 V. 151. pp. 61-69.
- [2] *Onojeghuo A.O., Blackburn G.A., Huang J., Kindred D., Huang W.* Applications of satellite «hypersensing» in Chinese agriculture: Challenges and opportunities // *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 2018. V. 64. pp. 62-86.
- [3] *Weiss M., Jacob F., Duveiller G.* Remote sensing for agricultural applications: A meta-review // *Remote Sensing of Environment*. 2020. 236. 111402.
- [4] *Lee W.S., Alchanatis V., Yang C., Hirafuji M., Moshou D., Li C.* Sensing technologies for precision specialty crop production // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. V. 74. pp. 2-33.
- [5] *Deering D.W.* Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph. D. Thesis. Texas A & M University. College Station. 1978. TX. 338 p.
- [6] *Письман Т.И., Ерунова М.Г., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Кононова Н.А., Бобровский А.В., Крючков А.А., Шпедт А.А., Шевырногов А.П.* Информативность спектральных вегетационных индексов для оценки засоренности посевов сельскохозяйственных культур по наземным и спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 3. С. 55-66.
- [7] *Вилунов С.Д., Зотиков В.И., Сидоренко В.С., Старикова Ж.В., Мальцев А.А.* Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы // *Научно-производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры»*. 2022. № 3 (43) С.73-83.

МОДЕЛИ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Володько О.С.¹, Буряк Н.А.¹, Полянчикова Д.В.², Дергунов А.В.³

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

В работе представлено сравнение различных моделей регрессии, которые использовались для прогноза загрязнения атмосферного воздуха твердыми взвешенными частицами PM_{2.5} в г. Красноярске на основе метеорологических данных модели реанализа NCEP GFS и уровней концентрации PM_{2.5}, полученных с наземных станций мониторинга. Наилучшие результаты при оценке на тестовой выборке и хорошее качество прогноза показала модель регрессии главных компонент с L2-регуляризацией (Ridge) на восьми признаках.

Ключевые слова: модели регрессии, PM_{2.5}, NCEP GFS, модели прогноза, загрязнение воздуха.

AIR POLLUTION PREDICTION IN KRASNOYARSK USING REGRESSION MODELS

Volodko O.S.¹, Buryak N.A.¹, Polaynchikova D.V.², Dergunov A.V.³

¹ Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk

³ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk

The paper compares various regression models to predict air pollution PM_{2.5} in Krasnoyarsk, Russia. The meteorological data of the NCEP GFS reanalysis model was used. The levels of PM_{2.5} data were obtained from the ground monitoring stations. The principal regression model of L2-regularization (Ridge) with eight features showed good forecast quality.

Keywords: regression models, PM_{2.5}, NCEP GFS, prediction models, air pollution.

Введение. В Красноярске, административном центре Красноярского края, уровень загрязнения атмосферного воздуха, особенно твердыми взвешенными частицами (PM), часто превышает допустимые нормы, рекомендованные как Российским законодательством по охране окружающей среды [1], так и Всемирной организацией здравоохранения [2]. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе обусловлен многочисленными факторами – пространственной структурой и временной динамикой загрязняющих выбросов, особенностями метеорологических условий, которые на территории г. Красноярска также обладают значительной временной и пространственной изменчивостью. Возникает необходимость не только в мониторинге, но и в прогнозировании периодов повышенной концентрации вредных веществ в атмосфере города.

В последние годы исследователи по всему миру широко используют данные атмосферных моделей реанализа для оценки влияния метеорологических характеристик на уровень загрязнения воздуха, в том числе твердыми взвешенными частицами PM [3-5].

Модели множественной регрессии часто применяются для прогноза вследствие точности их интерпретации [6-8]. Использование главных компонент в качестве входных данных, то есть, построение моделей регрессии главных компонент, позволяет улучшить экстраполяционную способность моделей регрессии и тем самым повысить качество прогноза [9-10].

В работе, на основании данных наземного мониторинга и модели реанализа NCEP GFS [11], представлены различные регрессионные модели для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Красноярска.

Материалы и методы. Данные по метеорологическим условиям с 2019-2022 гг. были взяты из модели реанализа NCEP GFS. В модели NCEP GFS определяются несколько десятков слоев и порядка 200 метеорологических параметров атмосферы на различных вертикальных

уровнях, которые вычисляются на регулярной горизонтальной сетке с пространственным разрешением 0.25° (~25 км) с периодичностью 4 раза в сутки. С таким разрешением на г. Красноярск приходится две ячейки рассматриваемой в модели горизонтальной сетки.

Данные по концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ с 2019-2022 гг. были взяты с наземных станций мониторинга [12].

В работе прогнозировались среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ с использованием моделей регрессии главных компонент, которые представляют собой комбинацию метода главных компонент и моделей множественной регрессии. Типичный метод регрессии главных компонент состоит из трех шагов [13]:

- 1) Находим главные компоненты, которые независимы друг от друга, с помощью метода главных компонент.
- 2) Составляем уравнение множественной регрессии с использованием главных компонент.
- 3) Оцениваем параметры уравнения регрессии в соответствии с заранее определенными критериями.

Преимущество моделей регрессии главных компонент в том, что их использование позволяет избавиться от мультиколлинеарности в признаках.

В настоящей работе использовались 6 моделей регрессии главных компонент: линейная, линейная на экспоненцированных данных, линейная с L1-регуляризацией (Lasso) и линейная (гребневая) регрессия с L2-регуляризацией (Ridge), а также полиномиальные регрессии 2-ой и 3-ей степени.

Для оценки качества модели применялись три метрики качества [13]: средняя квадратичная ошибка (MSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2). Также был рассчитан скорректированный коэффициент детерминации ($R_{корр}^2$) для того чтобы оценка качества модели, определяемая по коэффициенту детерминации (R^2), не была улучшена только за счет добавления большего числа признаков.

После построения моделей выявлено, что на данных в каждой из двух ячеек сетки для г. Красноярска качество прогноза ниже, чем на усреднённых данных. Впоследствии исследования проводились именно на усреднённых по двум ячейкам сетки данным.

Выбранные модели обучались на данных за 4 года с 2019-2022 гг. в разные периоды, выбранные на основании проведенного дисперсионного анализа [14] в зависимости от среднего уровня концентрации $PM_{2.5}$.

Результаты. В результате обучения было получено, что в случае линейной модели на экспоненцированных данных, а также для полиномиальных регрессий 2-го и 3-го порядка, ошибки (MSE и MAE) обычно имеют очень высокие значения, а коэффициент детерминации R^2 низкое значение, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения. Можно отметить, что в нашем случае, полиномиальные модели были склонны к переобучению, поэтому хорошо подстраиваясь под тренировочные данные показывали низкое качество на тестовых.

Метрики качества для моделей регрессии в новом пространстве из 8-ми признаков (составляет 80% дисперсии) и 16-ти признаков (составляют 90 % дисперсии) для тестовых выборок представлены в таблицах 1-4 соответственно. Полужирным шрифтом выделены наименьшие значения ошибок и наибольшее значение коэффициентов детерминации.

Как видно из таблиц 1-4, практически для всех рассматриваемых временных периодов модели регрессии для 8-ми признаков имеют меньшие значения ошибок (MSE и MAE) и большие значения коэффициентов детерминации, как R^2 , так и $R_{корр}^2$. Поэтому для прогноза были выбраны модели регрессии на 8-ми признаках. Кроме того, несколько лучшее качество прогноза на тестовой выборке показывает модель регрессии с L2-регуляризацией (Ridge).

Был проведен прогноз уровня концентрации $PM_{2.5}$ на все рассматриваемые временные периоды на последние 3 или 5 дней. В таблицах 5, 6 представлены метрики качества при прогнозе для 3-х дней зимнего периода с 20.02.2022-22.02.2022 и весенне-летнего с 30.07.2022-01.08.2022. Сравнительные графики наблюдаемых и прогнозируемых значений $PM_{2.5}$ представлены на Рис. 1-2.

Табл. 1. Качество прогнозирования на тестовой выборке на данных с декабря по февраль 2019-2022 гг.

Количество признаков	Метрика	Линейная регрессия	Lasso	Ridge
8 признаков	MSE	526,18	528,69	526,18
	MAE	17,10	16,93	17,10
	R^2	0,46	0,45	0,46
	$R^2_{\text{корр}}$	0,40	0,39	0,40
16 признаков	MSE	495,28	510,20	495,07
	MAE	17,38	16,96	17,36
	R^2	0,49	0,47	0,49
	$R^2_{\text{корр}}$	0,35	0,33	0,35

Табл. 2. Качество прогнозирования на тестовой выборке для данных: март, апрель, ноябрь 2019-2022 гг.

Количество признаков	Метрика	Линейная регрессия	Lasso	Ridge
8 признаков	MSE	22,76	23,76	22,75
	MAE	3,51	3,63	3,51
	R^2	0,61	0,59	0,61
	$R^2_{\text{корр}}$	0,56	0,54	0,56
16 признаков	MSE	23,61	23,57	23,60
	MAE	3,52	3,61	3,52
	R^2	0,60	0,60	0,60
	$R^2_{\text{корр}}$	0,48	0,48	0,48

Табл. 3. Качество прогнозирования на тестовой выборке для данных с мая по июль 2019-2022 гг.

Количество признаков	Метрика	Линейная регрессия	Lasso	Ridge
8 признаков	MSE	17,09	17,57	17,09
	MAE	3,30	3,31	3,30
	R^2	0,48	0,47	0,49
	$R^2_{\text{корр}}$	0,42	0,41	0,43
16 признаков	MSE	18,13	16,79	18,11
	MAE	3,25	3,13	3,24
	R^2	0,45	0,49	0,45
	$R^2_{\text{корр}}$	0,30	0,35	0,30

Табл. 4. Качество прогнозирования на тестовой выборке для данных с августа по октябрь 2019-2022 гг.

Количество признаков	Метрика	Линейная регрессия	Lasso	Ridge
8 признаков	MSE	14,23	15,52	14,23
	MAE	2,80	2,80	2,80
	R^2	0,43	0,38	0,43
	$R^2_{\text{корр}}$	0,35	0,29	0,35
16 признаков	MSE	15,57	15,39	15,54
	MAE	2,73	2,77	2,73
	R^2	0,38	0,39	0,38
	$R^2_{\text{корр}}$	0,15	0,17	0,15

Табл. 3. Качество прогнозирования для 3-х дней с 20.02.2022-22.02.2022.

Количество признаков	Метрика	Ridge
8 признаков	MSE	108,07
	MAE	9,96
	R^2	0,78

Табл. 4. Качество прогнозирования для 3-х дней с 30.07.2022-01.08.2022.

Количество признаков	Метрика	Ridge
8 признаков	MSE	0,65
	MAE	0,66
	R^2	0,62

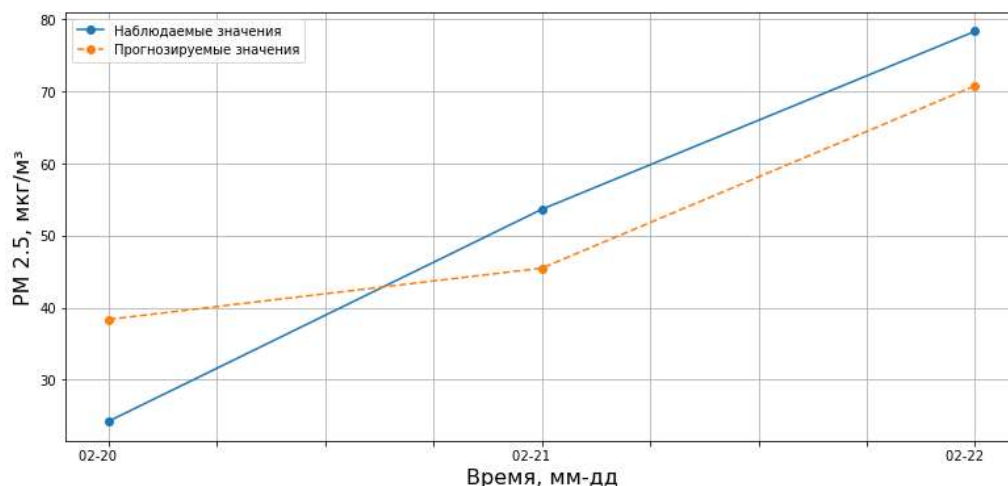


Рис. 1. Сравнение прогнозируемых регрессионной моделью Ridge и наблюдаемых значений концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ за период с 20.02.2023-22.02.2023.

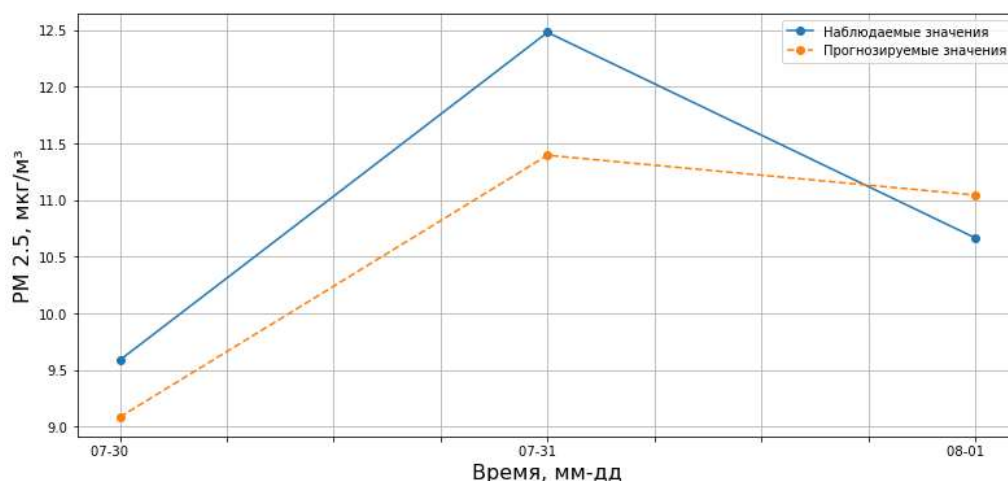


Рис. 2. Сравнение прогнозируемых регрессионной моделью Ridge и наблюдаемых значений концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ за период с 30.07.2022-01.08.2022.

Как видно из таблиц 3, 4 и по графикам на Рис. 1, 2 модель регрессии Ridge показывает также хорошее качество при прогнозе уровня концентрации $PM_{2.5}$ на несколько дней вперед.

Заключение. Модели регрессии главных компонент были обучены на разных временных периодах с 2019-2022 гг. в зависимости от метеоусловий и уровня концентрации $PM_{2.5}$.

Лучшее качество на тестовой выборке показала модель регрессии главных компонент с L2-регуляризацией (Ridge) для 8-ми признаков и с достаточно хорошим уровнем точности может быть использована для прогнозирования периодов повышенного уровня концентрации $PM_{2.5}$, а также для построения гибридных моделей, которые в ряде исследований показывают наиболее высокую точность прогноза [15].

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-21-20117, Красноярского краевого фонда науки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 30.06.2023).
- [2] WHO, 2022. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения 30.06.2023).
- [3] *Shin U., Park S.H., Park J.S., Koo J.H., Yoo C., Kim S., Lee J.B.* Predictability of PM2.5 in Seoul based on atmospheric blocking forecasts using the NCEP global forecast system // *Atmospheric Environment*. 2021. V. 246. P. 118141.
- [4] *Kwok L., Lam Y., Tam C.* Developing a statistical based approach for predicting local air quality in complex terrain area // *Atmospheric Pollution Research*. 2017. V. 8, №1. P. 114-126.
- [5] *Zhong M., Chen F., Saikawa E.* Sensitivity of projected PM2.5-and O3-related health impacts to model inputs: A case study in mainland China // *Environment international*. 2019. V. 123. P. 256-264.
- [6] *Abdullah S., Napi N.N.L.M., Ahmed A.N., Mansor W.N.W., Mansor, A.A., Ismail M., Abdullah, A.M. Ramly Z.T.A.* Development of multiple linear regression for particulate matter (PM10) forecasting during episodic transboundary haze event in Malaysia // *Atmosphere*. 2020. V. 11, № 3. P. 289.
- [7] *Perez P., Menares C., Ramirez C.* PM2.5 forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas // *Urban Climate*. 2020. V. 32. P. 100608.
- [8] *Kumar S., Mishra S., Singh S.K.* A machine learning-based model to estimate PM2.5 concentration levels in Delhi's atmosphere // *Heliyon*. 2020. V. 6, № 11. P. e05618.
- [9] *Abdullah S., Ismail M., Fong S.Y., Ahmed N.* Evaluation for Long Term PM 10 Concentration Forecasting using Multi Linear Regression (MLR) and Principal Component Regression (PCR) Models // *Environment Asia*. 2016. V. 9, № 2. P. 101-110.
- [10] *Alfiandy S., Virgianto R.H., Putri A.S.* Modeling of daily PM2.5 concentration based on the principal components regression in South and Central Jakarta // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1434, №. 1. P. 012012.
- [11] Модель реанализа – The Global Forecast System (GFS): https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.ph (дата обращения 29.06.2023).
- [12] Геопортал – данные оперативного мониторинга: <http://sensor.krasn.ru/sc> (дата обращения 29.06.2023).
- [13] *Дрейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. Книга 2. М.: Финансы и статистика, 1986. 351 с.
- [14] *Volodko O., Yakubailik O., Lapo T., Dergunov A.* Influences of meteorological conditions in PM2.5 levels in Krasnoyarsk city atmosphere // *E3S Web of Conferences 2023*. Vol. 392. P. 02022.
- [15] *Liu H., Yan G., Duan Z., Chen C.* Intelligent modeling strategies for forecasting air quality time series: A review // *Applied Soft Computing*. 2021. V. 102. P. 106957.

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

Гостева А.А.^{1,2}, Матушко А.К.², Якубайлик О.Э.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Изучение городской среды с использованием тепловых космических снимков предоставляет много возможностей. В статье представлены результаты анализа территории города Красноярска по открытым данным дистанционного зондирования проводящих съемку в видимом и дальнем инфракрасном диапазонах различного пространственного и временного разрешения за период с 2000 по 2022 год. В работе используются значения температуры поверхности Земли, полученные по данным Landsat 8-9 за период с 2013 по 2022 гг. и данные MODIS, а именно продукта MOD11A2 начиная с 2000 года. В результате получилось сравнить расположение тепловых аномалий, полученных авторами в предыдущих работах, со значениями температуры поверхности по данным MODIS за двадцатилетний период. Соотношение максимальных температурных значений по коллекции спутниковых данных MODIS с 2000 до 2022 года, соответствует контурам тепловых аномалий с 2013 до 2020 года.

Ключевые слова: Landsat 8-9, MODIS, температура, ДЗЗ, ГИС, LST, тепловые снимки.

THE POSSIBILITIES OF THERMAL SPACE IMAGES IN THE ANALYSIS OF THE URBAN TERRITORY

Gosteva A.A.^{1,2}, Matuzko A.K.², Yakubailik O.E.^{1,2}

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The study of the urban environment using thermal space images provides many opportunities. The article presents the results of the analysis of the territory of the city of Krasnoyarsk according to open remote sensing data surveyed in the visible and far infrared ranges of various spatial and temporal resolutions for the period from 2000 to 2022. The paper uses the values of the Earth's surface temperature obtained from Landsat 8-9 data for the period from 2013 to 2022 and MODIS data, namely the MOD11A2 product since 2000. As a result, it was possible to compare the location of thermal anomalies obtained by the authors in previous works with the surface temperature values according to MODIS data over a twenty-year period. The ratio of maximum temperature values according to the MODIS satellite data collection from 2000 to 2022 corresponds to the contours of thermal anomalies from 2013 to 2020.

Keywords: Landsat 8-9, MODIS, temperature, remote sensing, LST, GIS, thermal images.

Введение. Наблюдаемое увеличение температуры в городской застройке относительно пригородной местности называется «городским островом тепла». Это явление – результат урбанизации территории, связанное с радикальным изменением природного ландшафта, работой промышленных предприятий, высокой плотностью населения и преобладанием искусственных поверхностей из асфальта, бетона, камня. [1]. Внутри города температура поверхности нагревается неравномерно, наблюдаются участки с повышенной температурой в основном это промышленные зоны, торговые центры, большие парковки, спортивные объекты и др. Далее в работе такие участки называются тепловыми аномалиями городской территории.

Данная тематика в последние несколько лет активно обсуждается в работах российских и зарубежных авторов. Последние работы ученых Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий освещали валидацию значений температуры между спутниковыми и наземными данными [2, 3], анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири [4], ученые МГУ уделили

внимание городам Арктики по космическим температурным данным [5] и другие работы. Интересна работа зарубежных авторов по применению новых наборов данных Landsat 8 Level-2 [6]. На территорию города Красноярска на сегодняшний момент нет исследования с комплексным анализом данных MODIS и Landsat 8-9 в тепловом диапазоне. Поэтому было принято решение оценить возможности тепловых космических снимков для анализа городской территории Красноярска, учитывая значительный рост численности населения, площади урбанизированных территорий, большое количество автомобильного транспорта. Была исследована территория города Красноярска по тепловым космическим снимкам с 2000 по 2022 год по данным MODIS, и по данным Landsat 8-9 с 2013 до 2022.

Материалы и методы. Съёмка в тепловом диапазоне ИК-спектра основана на регистрации суммарного эффекта собственного излучения Земли, отраженного солнечного излучения, поглощенного и трансформированного солнечного излучения, а также техногенного излучения. Тепловое излучение, может быть обнаружено приёмниками теплового излучения и преобразовано в видимое изображение, при этом такая съёмка может осуществляться как в дневное, так и в ночное время.

Тепловые характеристики ландшафтных комплексов могут являться индикаторами различных процессов и явлений на территории исследования. Одним из дистанционных методов геотермического картографирования является аэрокосмическая съёмка в инфракрасной (ИК) области спектра. Как правило, съёмка производится в средней (SWIR) и дальней (TIR) частях (ИК) области спектра (1,5-3,0 и более 3,0 мкм, соответственно). Интенсивность излучения обусловлена тепловым состоянием излучающей поверхности.

Исходными данными для изучения тепловых аномалий городской территории были рассмотрены сцены мультиспектральной космической съёмки Landsat 8-9 и Terra MODIS с возможностью съёмки в тепловом диапазоне. Данные были отобраны с условием минимального покрытия облаками именно городской территории, с помощью сервиса EarthExplorer из архива Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Пространственное разрешение Landsat 8-9 в тепловом диапазоне 100 метров, а у MODIS 1000 метров. Анализ городской территории предпочтительнее проводить с использованием данных Landsat, но, к сожалению, частота съёмки у этих данных недостаточная. Ранее по данным Landsat 8-9 авторами были выделены границы постоянных тепловых аномалий на территории города Красноярска. Проведём сравнение полученных данных с данными MODIS.

Данные MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) начали поступать с марта 2000 г. Спектрорадиометр с умеренным разрешением системы наблюдения Земли производит суточные данные о температуре поверхности земли. С помощью семи доступных тепловых инфракрасных диапазонов этот алгоритм может корректировать погрешности в профилях температуры и водяного пара без одновременного извлечения данных о поверхности или профилей переменных атмосфер. Коэффициент излучения также необходим для эксплуатационного продукта, поэтому MODIS оценивает коэффициенты излучения на основе классификации по типам растительного покрова с использованием тепловых инфракрасных двунаправленных функций распределения отражения и моделирования коэффициента излучения [7].

В работе использованы данные продукта MOD11A2 версия 6, которая содержит информацию о 8ми дневной температуре поверхности Земли и его излучательной способности с пространственным разрешением около 1 км, полученные данные предоставляются с точность 1 °К. (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf).

По данным продукта MOD11A2 была собрана коллекция с 16 мая 2000 до 27 декабря 2022 года, состоящая из 8-дневных композитов на территорию города Красноярска. Полученная коллекция насчитывает 1000 спутниковых сцен.

Данные Landsat стали свободно доступными в декабре 2009 года для широкого круга пользователей ГИС-сообщества [8]. Запуск спутника Landsat-8 состоялся в феврале 2013 года. Спутник Landsat 8 получает данные с использованием двух разных датчиков – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Изображения Landsat 8 состоят из 11 спек-

тральных каналов, где 10-й и 11-й являются дальними инфракрасными полосами с пространственным разрешением 100 м, что позволяет анализировать энергию поверхности Земли, а не отражение солнечного света [9].

Landsat 9 является продолжением серии космических аппаратов для наблюдения Земли, растянувшийся почти на 50 лет. Landsat 9 является партнерством Геологической службы США (USGS) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) и продолжает важнейшую роль программы Landsat в повторяющихся глобальных наблюдениях для мониторинга, понимания и управления природными ресурсами Земли. Спутник дистанционного зондирования Landsat 9 был запущен с базы космических сил Ванденберг в Калифорнии 27 сентября 2021 года.

Данные Landsat 8-9 по температуре земной поверхности находятся в наборе данных Collection 2 Level 2, напрямую эти значения хранятся в канале B10. Как описано в работе [10] данные в этом наборе имеют потерю данных, где часть данных имеет значение NULL. Разрешение этой ситуации было найдено авторами и реализовано в виде приложения. Значения температуры земной поверхности в бесснежный период с 2013 до 2022 года по данным Landsat 8-9 были получены авторами.

По технологии, описанной авторами в работе [11] были обновлены тепловые аномалии в городе Красноярске по данным Landsat 8 с 2013 до 2020. Полученные контуры были разделены по причинам формирования тепловых аномалий на антропогенные и природные.

Также для комплексного анализа с использованием разнородных данных создан точечный слой на основе расположения датчиков системы мониторинга воздуха г. Красноярска [12] было определено соотношение выбранных точек по данным MODIS и контуров тепловых аномалий.

Результаты. По наблюдениям за температурой поверхности Земли в течение двадцатилетнего периода по данным MODIS было выявлено изменение формы городского теплового острова, а именно увеличение его площади, что частично может быть объяснено активной застройкой пригородов. Для просмотра динамики были выбраны самые жаркие дни в 2001, 2007, 2017 и 2022 годах. На рисунке 1а представлена температура поверхности на 4 июля 2001 года, в этот день зафиксирована максимальная температура поверхности 35,4 °С. На рисунке 1б данные за 18 июля 2007 года максимальная температура 32,5 °С. На рисунке 1в данные за 12 июля 2017 и максимальная температура 33,4 °С. На рисунке 1г 4 июля 2022, а максимум 32,3 °С.

Наблюдая температуру поверхности земли по рисунку 1а, максимальные значения в 2001 году, можно отметить в районе КраЗа, на правом берегу в районе красноярского машиностроительного завода и цветных металлов. В 2007 (рис. 1б) году максимальные тепловые значения прослеживаются в районе торгового центра Планета и более ярко выделяется комбинат «Волна» на правом берегу. В 2017 (рис. 1в) году максимальные температурные значения на левом берегу смещаются в центральную часть города. В 2022 году (рис. 1г) в районе КраЗа заметны максимальные температуры поверхности, так же промышленная зона с максимальными значениями на правом берегу увеличила свою площадь.

Хочется отметить, что зона высоких температурных значений увеличилась по площади по сравнению с 2001 годом, чтобы лучше продемонстрировать разницу было произведено вычитание из 2022 года значений 2001 года (рисунок 2).

За рассматриваемый период отмечено уменьшение теплового влияния выше территории КраЗа, что может быть частично связано, с усовершенствованием систем очистки, которые появились в течение последнего десятилетия, но для получения более точных результатов необходимо дополнительные исследования этого объекта. В западной части города, наоборот, тепловое влияние увеличилось, это может быть связано с активной жилой застройкой в Октябрьском и Свердловском районе.

Полученные по данным Landsat 8 контуры тепловых аномалий с 2013 до 2020 годы, были совмещены со значениями температуры по данным поверхности по данным MODIS на дату 4 июля 2001 год (рис. 3а), и 4 июля 2022 года, что показано на рисунке 3б.

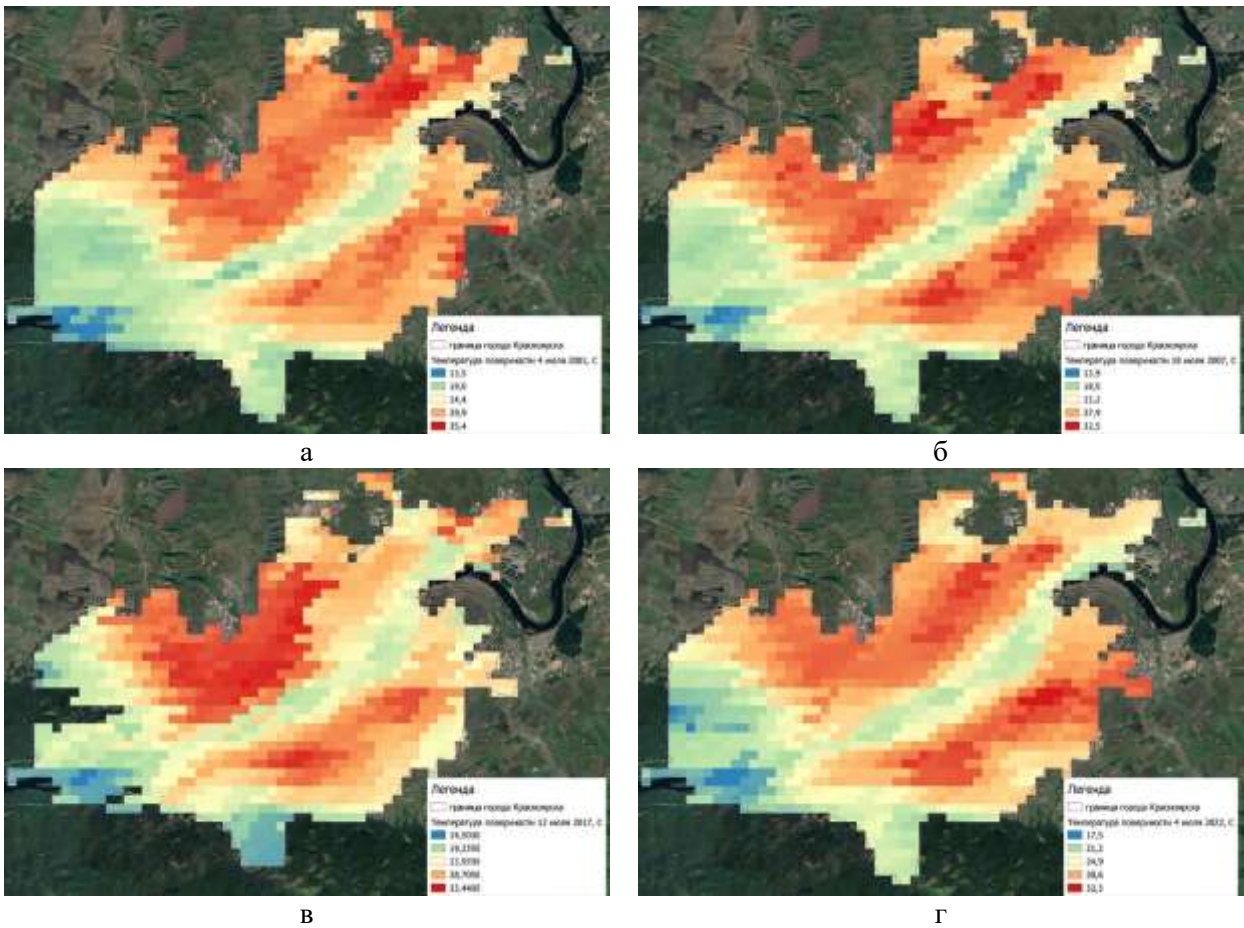


Рис. 1. Температура поверхности на территории города Красноярска на даты: а) 4 июля 2001, б) 18 июля 2007, в) 12 июля 2017, г) 4 июля 2022.

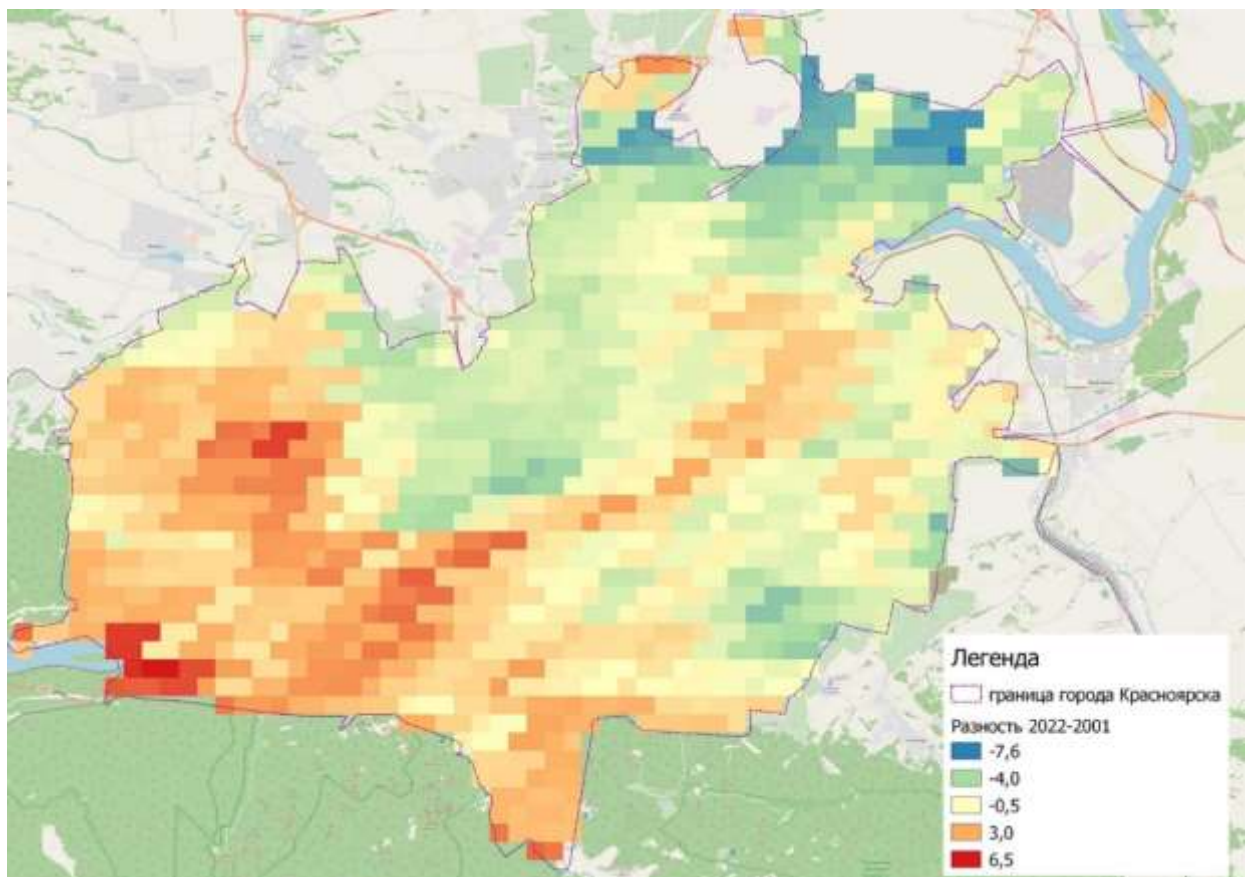


Рис 2. Изменение температуры поверхности с 2001 до 2022 года.

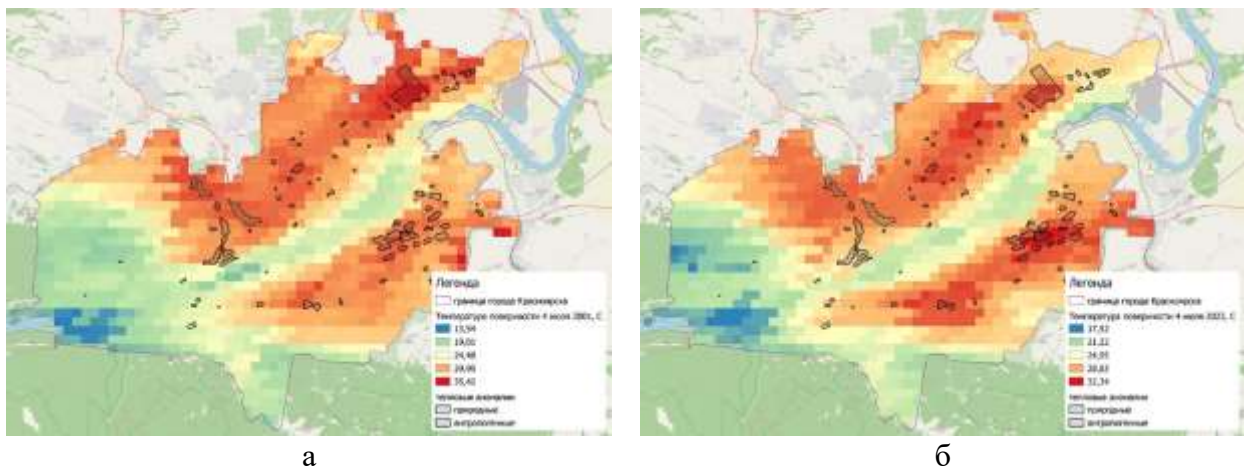


Рис. 3. Сопоставление контуров тепловых аномалий и данных MODIS:
а) 4 июля 2001, б) 4 июля 2022.

Температура воздуха в этот день $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура поверхности, соответствующая тепловым аномалиям – от $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отмечено соответствие того, что максимальные температурные значения по данным MODIS соответствуют контурам тепловых аномалий антропогенного и природного характера.

Соотношение максимальных температурных значений по коллекции спутниковых данных MODIS с 2000 до 2022 года, соответствует контурам тепловых аномалий с 2013 до 2020 года. Тенденция большинства тепловых аномалий сохраняется и в 2022 году, и контуры пока не требуют дополнительных уточнений.

Заключение. По тепловым космическим снимкам можно провести оценку тепловых аномалий, возникающих на городской территории. В работе по тепловым космическим снимкам были рассмотрены тепловые аномалии по данным низкого пространственного разрешения с 2000 до 2022 года по данным MODIS (MOD11A1). В работе совместно рассмотрены тепловые космические снимки по двум источникам с разным пространственным и временным разрешением, по ним были оценены тепловые аномалии городской территории. Учитывая пространственно-временной объем данных, требуется продолжать анализ городской территории, так как возможности тепловых космических снимков достаточно широки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stewart I. D., Mills G. The Urban Heat Island. Elsevier, 2021, 172 с.
- [2] Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Валидация температурного продукта второго уровня Landsat-8 (L2SP) на основе наземных данных // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы (DICR-2022): Сборник трудов XVIII Российской конференции с международным участием, Новосибирск, 05-08 декабря 2022 года / Под редакцией С.А. Рылова, Ю.И. Молородова, А.А. Жирнова, Ю.Н. Синявского. Новосибирск: ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", 2022. С. 146-152.
- [3] Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Валидация температурных продуктов MODIS/(Terra+Aqua) LST с использованием наземных данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13-16 сентября 2022 года / Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. С. 113-117.
- [4] Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8 // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 3. С. 95-111.
- [5] Грищенко М.Ю. Использование наземных и космических температурных данных для изучения климата городов российской Арктики / М. Ю. Грищенко, М. И. Варенцов, П. И. Константинов // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 14-17 сентября 2020 года / Под редакцией Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. Севастополь: Федеральное государственное

автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. С. 139-142.

- [6] *Galve J.M., Sánchez J.M., García-Santos V., González-Piqueras J., Calera A., Villodre J.* Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison // Remote Sensing. 2022. 14, N 8. 1843. DOI:10.3390/rs14081843.
- [7] *Weng Q., Fu P., Gao F.* Generating Daily Land Surface Temperature at Landsat Resolution by Fusing Landsat and MODIS Data, Remote Sensing of Environment, 145 (2014), Apr., pp. 55-67
- [8] Сайт Геологической службы США. USGS. Landsat Missions. Landsat8. <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php> (дата обращения: 08.06.2023).
- [9] *Malakar N.K., Hulley G.C., Hook S.J., Laraby K., Cook M., Schott J. R.* An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. 1-19. DOI:10.1109/tgrs.2018.282482.
- [10] *Гостева А.А., Зайцев Н.Е., Матушко А.К.* Автоматизация вычисления температуры поверхности по данным теплового диапазона Landsat 8-9 на территории Центральной Сибири // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3. с. 56-60.
- [11] *Матушко А.К., Якубайлик О.Э.* Моделирование городского острова тепла по многолетним спутниковым данным // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 4(38). С. 50-55.

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА NCEP GFS И ПРОФИЛЕМЕРА МТП-5 В КРАСНОЯРСКЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Дергунов А.В.¹, Якубайлик О.Э.²

¹ Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Одним из ключевых факторов возникновения высокого загрязнения воздуха зимой в Красноярске является температурные инверсии приземного слоя атмосферы. В работе проводится сравнение вертикальных профилей температуры воздуха от 0 до 1000 м по данным реанализа NCEP GFS и температурного профилемера МТП-5 зимой 2022-2023 гг. Получены гистограммы повторяемости градиентов температур в слоях 0-100, 0-300 и 0-500 м. Результаты показывают высокую применимость данных реанализа NCEP GFS в задачах исследования приземного слоя атмосферы в периоды повышенного загрязнения воздуха.
Ключевые слова: температурные инверсии; НМУ; GFS; МТП-5; PM2.5; загрязнение воздуха.

COMPARISON OF THE TEMPERATURE OF THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE ACCORDING TO THE DATA OF THE NCEP GFS REANALYSIS AND THE MTP-5 PROFILEMETER IN KRASNOYARSK IN THE WINTER PERIOD

Dergunov A.V.¹, Yakubailik O.E.²

¹ Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

One of the key factors in the occurrence of high air pollution in winter in Krasnoyarsk is the temperature inversion of the surface layer of the atmosphere. The paper compares the vertical air temperature profiles from 0 to 1000 m according to the NCEP GFS reanalysis data and the MTP-5 temperature profiler in the winter of 2022-2023. Recurrence histograms of temperature gradients in the layers 0-100, 0-300 and 0-500 m are obtained. The results show the high applicability of the NCEP GFS reanalysis data in the problems of studying the surface layer of the atmosphere during periods of increased air pollution.

Ключевые слова на английском языке: temperature inversions; unfavorable weather conditions; GFS; MTP-5; PM2.5; air pollution.

Введение. Как и все крупные города Красноярск подвержен негативному влиянию на экологическую обстановку, особенно в холодное время года. Можно выделить такие временные периоды, когда происходит резкое увеличение концентрации загрязняющих веществ в нижнем слое атмосферы, к которым относят промышленные и автомобильные выбросы и печное отопление [1]. Повышение загрязнения воздуха напрямую влияет на состояние здоровья населения, увеличение количества респираторных заболеваний, снижение продолжительности жизни [2-4].

Одним из главных факторов возникновения повышенного загрязнения воздуха в Красноярске является метеорология. Периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ) характеризуются низкой скоростью ветра и наличием приземных или приподнятых температурных инверсий в атмосфере, что в совокупности препятствует вертикальному и горизонтальному рассеянию загрязняющих частиц [5].

Возникает необходимость в анализе различных метеорологических параметров нижнего слоя атмосферы для решения задач, связанных с изучением периодов неблагоприятной экологической обстановки в городе.

Для изучения вертикального распределения температуры воздуха применяют различные методы и технологии. Одним из самых распространенных и традиционных методов является –

радиозондирование атмосферы (аэростаты). Он относится к контактным методам зондирования. Также выделяют оптические и акустические методы зондирования и микроволновое зондирование. К последним относятся метеорологические температурные профиломеры. Данное устройство устанавливается стационарно, либо на подвижную платформу, и осуществляет зондирование атмосферы на высоты до 1 км по принципу приема собственного теплового излучения атмосферы на частоте около 60 Гц [6, 7].

Из альтернатив на сегодняшний день следует отметить различные наборы данных реанализа и глобальных моделей прогноза погоды, которые обладают достаточно высоким пространственным и временным разрешением и могут предоставить как архивные метеоданные, так и прогнозы вплоть до двух недель вперед и больше. В предыдущей работе [8] была установлена связь повышенного загрязнения воздуха и различных метеопараметров модели NCEP GFS, таких как, скорость ветра, высота пограничного слоя атмосферы и наличие температурных инверсий.

Целью работы является сравнение данных о температуре воздуха приземного слоя атмосферы для холодного периода 2022-2023 года во время действия режимов НМУ по двум наборам данных: температурного профиломера МТП-5 и метеорологической модели NCEP GFS.

Районом исследования в данной работе является город Красноярск и часть прилегающих территорий (рисунок 1).

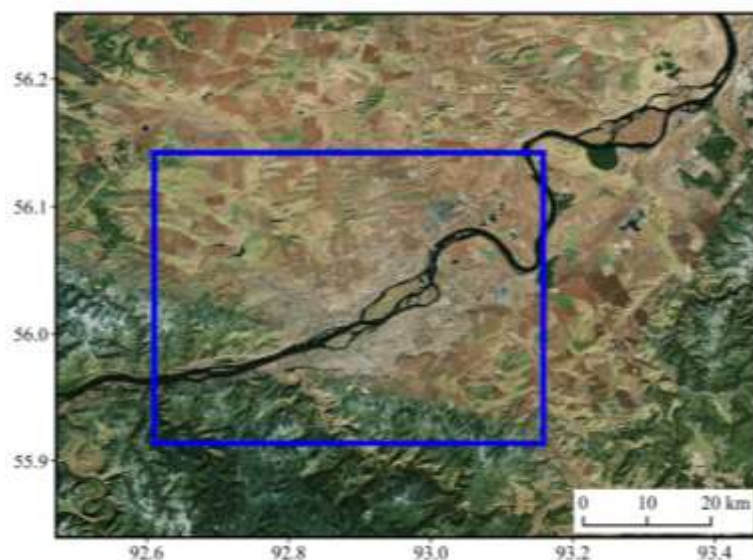


Рис. 1. Район исследования – город Красноярск.

Он является региональным центром Красноярского края с населением более 1 миллиона человек. Площадь около 350 км². Координаты центра города 56°00' с.ш. и 92°52' в.д. Город и окрестные территории имеют уникальный рельеф. С юга и запада от города – леса и холмистая местность, с севера и востока рельеф преимущественно равнинный, незамерзающая в зимний период река Енисей делит город примерно пополам. Такая география местности формирует низкую рассеивающую способность атмосферы. В [9] показано, что концентрация PM_{2.5} в Красноярске на 64% выше, чем в среднем по России.

За период времени с 1 ноября 2022 года по 31 марта 2023 года службой Среднесибирского УГМС было объявлено о 8-ми периодах НМУ в городе Красноярске [10]. Продолжительность составила 41 день. Во время периодов НМУ происходит накопление вредных примесей в воздухе.

Материалы и методы. В работе используется метеоинформация из набора данных модели Global Forecast System (GFS). Модель GFS – одна из самых известных и популярных моделей прогноза погоды, содержащая глобальную компьютерную модель и вариационный анализ, разработанная Национальным Центром Экологического Прогнозирования США (NCEP). Данная модель включает модели атмосферы, океана, суши/почвы и морского льда. Модель

атмосферы насчитывает 127 вертикальных уровней. Глобальный анализ данных и прогнозирование осуществляется 4 раза в сутки вплоть до 384 часов. С января 2015 года горизонтальное разрешение составляет 0.25 градуса, что составляет примерно 25 км на широте города Красноярска [11]. Метеоданные модели GFS распространяются свободно, то есть доступны бесплатно на портале National Center for Atmospheric Research (NCAR) (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1>).

Исходные данные модели NCEP GFS представляют собой файлы формата *.grib2 и содержат более 600 слоев метеоинформации, из них около 90 являются уникальными метеопараметрами (температура, влажность воздуха, скорость ветра и т.д.), многие из которых приведены на десятках вертикальных уровней. Например, параметр «TMP» (температура) приведен для 73 уровней, в слое от поверхности земли до 1,5 километров насчитывается 10 таких уровней [11].

В работе мы использовали фактические данные анализа о температуре воздуха на десяти вертикальных уровнях: поверхность, 2 метра, 80 метров, 100 метров, 1000 мбар – 850 мбар, а также информацию о геопотенциальной высоте выбранных изобарических поверхностей. Исследуемым периодом был выбран холодный период времени с ноября 2022 по март 2023 года.

Для обеспечения анализа временной динамики изменения выбранных метеорологических параметров, получения трендов и интегральных показателей были написаны программные скрипты на языке программирования Python с использованием продукта «wgrib2» (NCEP) [12], с помощью которых осуществлялась предварительная обработка исходных данных.

Поскольку высоты изобарических поверхностей, для которых приведены температуры воздуха, изменяются с течением времени на десятки и сотни метров в зависимости от метеоусловий, времени суток и т.д. их высоты определялись геопотенциальными метрами, которые также приведены в наборе данных. Для каждого выбранного момента времени методом линейной интерполяции вычислялись температуры на интересующих высотах. Таким образом были получены подробные профили температуры атмосферы от поверхности до высоты 1000 метров.

За основу для сравнения были выбраны два измерения температуры приземной атмосферы – ночное и дневное, которым соответствует местное время 00ч и 12ч, соответственно.

В данной работе за эталонную информацию о температуре воздуха в приземном слое атмосферы были выбраны данные метеорологического температурного профилемера МТП-5. Данное устройство является сканирующим приемником СВЧ излучения на частоте 60 Гц, принимающим собственное тепловое излучение атмосферы в максимуме полосы поглощения молекулярного кислорода на разных углах места. Прибор МТП-5 установлен в центре Красноярска на высоте 150 метров от уровня моря.

В настоящей работе использовались архивные данные о загрязнении воздуха Красноярска сети мониторинга Красноярского научного центра СО РАН. На данный момент сеть насчитывает 24 наземных станций мониторинга, расположенных во всех районах города. Данные о концентрациях PM_{2.5} усреднялись за сутки по всем доступным постам наблюдения в городе. Таким образом были получены среднесуточные значения концентрации PM_{2.5} для всего города Красноярска.

Результаты и обсуждение. Получены данные об изменении среднесуточной концентрации PM_{2.5} в Красноярске в период с 1 ноября 2022 года по 31 марта 2023 года (рисунок 2).

Всего за исследуемый период зафиксирован 41 день с превышением среднесуточных концентраций PM_{2.5} среднесуточной ПДК, равной 0,035 мг/м³, из них 30 дней приходятся на официальные периоды НМУ (рисунок 2). Максимальное загрязнение атмосферы твердыми частицами фиксировалось 13 февраля 2023 года и составило 0,145 мг/м³, что превышает среднесуточную ПДК более, чем в 4 раза.

Проведено сравнение профилей температуры по двум источникам данных: метеорологический температурный профилемер (МТП-5) и модель реанализа NCEP GFS. Для примера,

на рисунке 3 приведены ночные и дневные профили температуры от поверхности до 1000 метров для 13 февраля 2023 года.

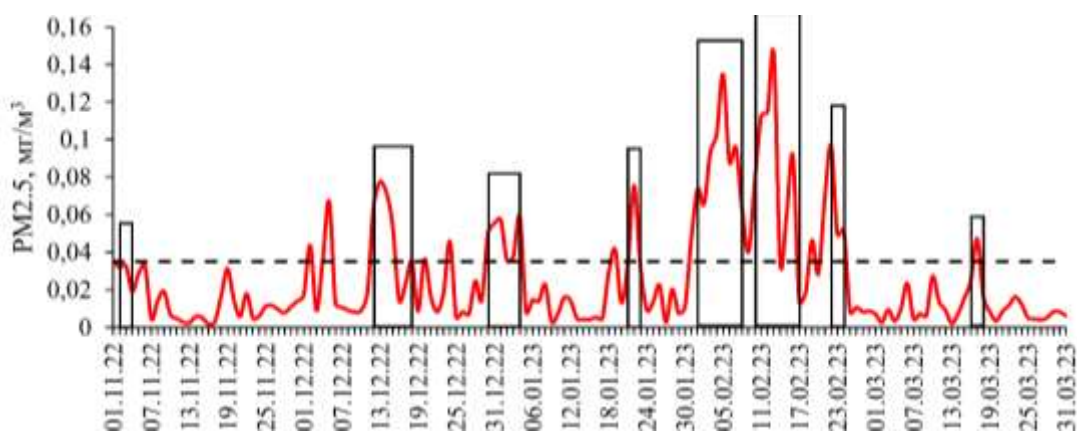


Рис. 2. Изменение содержания PM2.5 в атмосфере Красноярска зимой 2022-2023 гг. Красной линией указана среднесуточная концентрация PM2.5, пунктирной линией – среднесуточное ПДК PM2.5, черными рамками обозначены периоды НМУ.

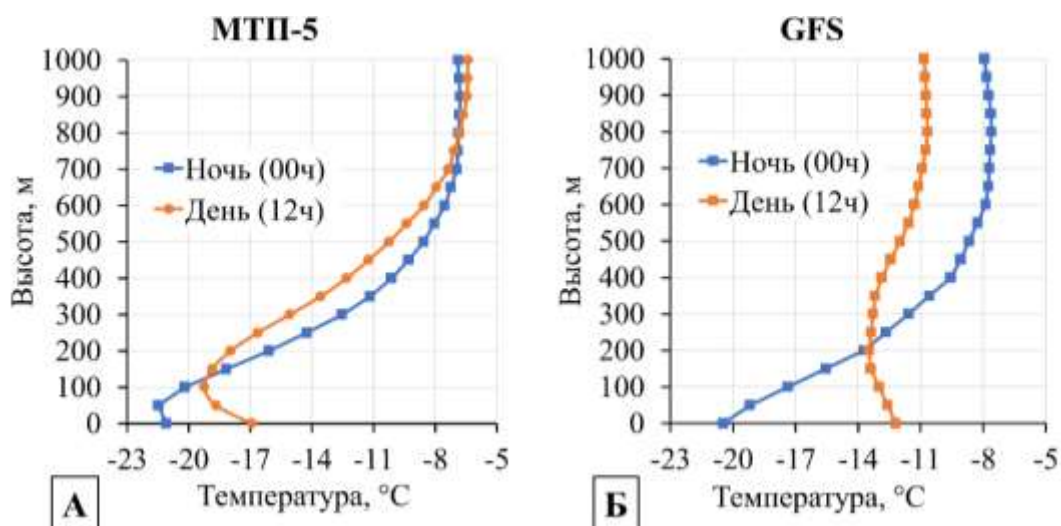


Рис. 3. Сравнение ночных и дневных профилей температуры атмосферы 13.02.2023.

Как видно на рисунке 3 ночные профили температуры воздуха имеют достаточно высокое совпадение (температуры на поверхности и 1000 метрах, а также профиль изменения температуры). По данным МТП-5 в 00ч 13.02.23 была зафиксирована приподнятая инверсия, мощность которой составила 850 метров, а интенсивность – 14,68 градусов Цельсия (рисунок 3,А). По данным модели GFS в этот момент измерений фиксировалась приземная инверсия с мощностью 800 метров и интенсивностью 12,85 градусов Цельсия (рисунок 3,Б). Однако дневные профили по двум наборам данных довольно сильно расходятся, как по температуре на поверхности, так и по температуре на 1000 метрах, профиль температуры по данным МТП-5 более крутой (рисунок 3,А). Интенсивность инверсии по данным МТП-5 составила 12,8 градусов Цельсия, по данным модели GFS – 2.8 градуса Цельсия.

В результате проведенного анализа было выявлено, что наибольшая сходимость профилей температуры, полученных по данным МТП-5 и модели GFS, в ночное время. Это утверждение соответствует подавляющему большинству дней из исследуемого периода времени.

Был произведен расчет средних отклонений ночной и дневной температуры воздуха по данным модели GFS от данных МТП-5 на высотах от 0 до 1000 метров с шагом в 50 метров за исследуемый период времени (рисунок 4).

Анализ показал, что ночные значения температуры воздуха (00ч) по данным GFS, в среднем, больше сходятся с данными МТП-5, в отличие от дневных значений (12ч). Однако отме-

чается общий тренд на снижение среднего отклонения значений от поверхности к 1000 метрам, то есть, модель GFS хуже соответствует значениям температуры МТП-5 на низких высотах, при этом, среднее минимальное отклонение составляет 1,5 градуса. Максимальное среднее отклонение температуры для измерений в 00ч составило 2,9 градуса на 50 метрах, для измерений в 12ч – 3,4 градуса, также, на 50 метрах.

Сравнение интенсивности ночных и дневных инверсий за 41 день из исследуемых периодов НМУ показало, что модель GFS, в целом, занижает значения (рисунок 5). Также выявлено, что ночные показатели интенсивности инверсий температуры по данным GFS намного больше соответствуют показателям МТП-5 (рисунок 5,А), чем дневные (рисунок 5,Б). Коэффициент корреляции между интенсивностью ночных инверсий по двум наборам данных составил 0,64, между интенсивностью дневных инверсий – 0,57.

Построены гистограммы повторяемости градиентов температур в трех слоях: 0-100 метров, 0-300 метров и 0-500 метров по данным МТП-5 и модели GFS за исследуемый период времени (рисунок 6). Данные слои были выбраны в связи с тем, что именно в нижнем пятисотметровом слое накапливаются основное загрязнение в атмосфере.

Судя по гистограммам повторяемости градиентов температур наиболее часто встречающиеся значения градиентов – от 1 до 3-х градусов. Это соответствует для всех трех выбранных слоёв и обоим наборам данных (рисунок 6). Как уже говорилось выше, модель GFS занижает данные об интенсивности инверсий, профили температуры по данным GFS, как правило, более пологие, что и отражается на значениях частоты встречающихся градиентов на рисунке 6,Б, в сравнении с рисунком 6,А. В слое до 100 метров градиенты температур до 1 градуса встречаются в 53 случаях по данным модели GFS, по данным МТП-5 – в 26 случаях. Данные GFS и МТП-5 наиболее похожи по тренду изменения частоты появления градиентов температур для слоя от 0 до 300 метров.

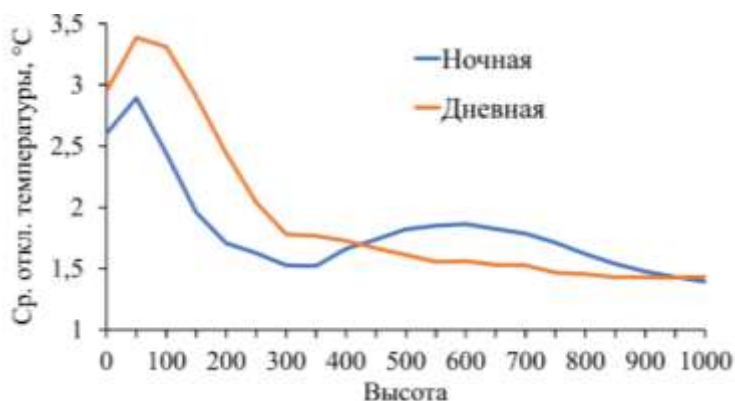


Рис. 4. Среднее отклонение температуры воздуха МТП-5 – GFS в приземном слое атмосферы.

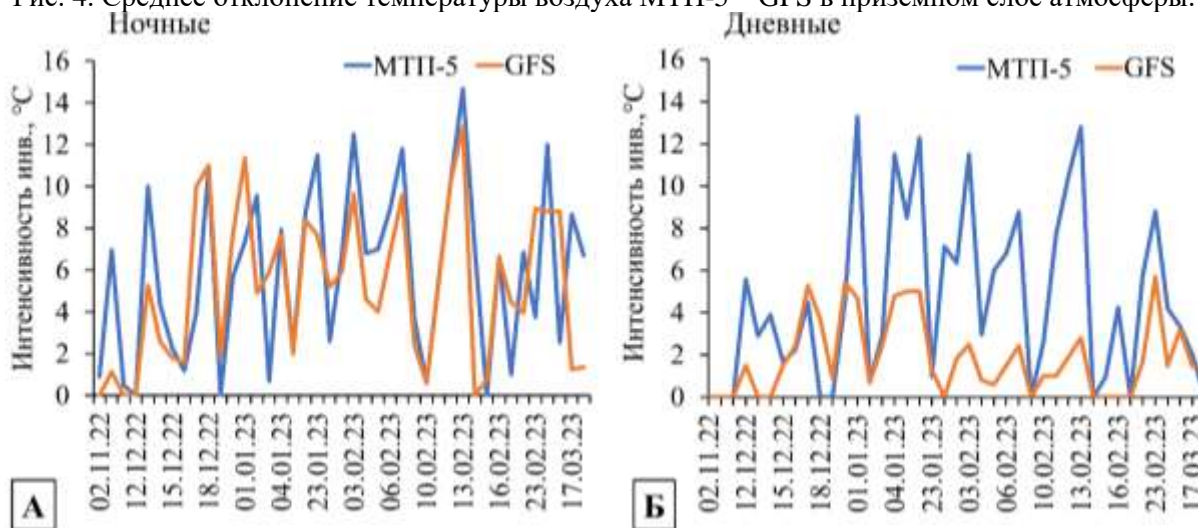


Рис. 5. Сравнение интенсивности температурных инверсий.

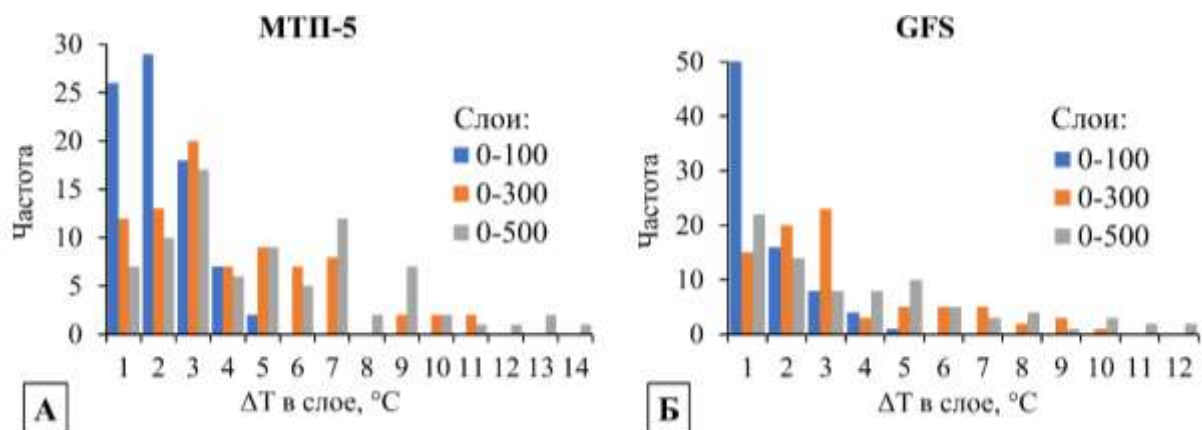


Рис. 6. Гистограммы повторяемости градиентов температуры в трех слоях: 0-100м, 0-300м и 0-500м.

Заключение. В результате данной работы было проведено сравнение ночных и дневных вертикальных профилей температуры воздуха от 0 до 1000 метров во время периодов НМУ с ноября 2022 года март 2023 года по двум наборам данных: прибора МТП-5 и модели NCEP GFS. Анализ показал, что лучше всего сходятся ночные профили температуры воздуха.

Построены гистограммы повторяемости градиентов температур в трех слоях от поверхности до 100 метров, 300 метров и 500 метров. Модель GFS занижает данные об интенсивности инверсий. Профили температуры по данным GFS, как правило, более пологие, что и отражается на значениях частоты встречающихся градиентов в выбранных слоях. Данные GFS и МТП-5 наиболее похожи по тренду изменения частоты появления градиентов температур для слоя от 0 до 300 метров.

Произведено сравнение интенсивности температурных инверсий по двум наборам данных. Выявлено, что ночные показатели интенсивности инверсий температуры по данным GFS намного больше соответствуют показателям МТП-5, с коэффициентом корреляции 0,64. Интенсивность дневных инверсий по данным GFS хуже совпадает с данными прибора МТП-5, коэффициент корреляции составил 0,57.

Рассчитано среднее отклонение температуры воздуха по данным модели GFS от данных МТП-5 для высот от 0 до 1000 метров с шагом 50 метров за период исследования. Отмечается общий тренд на снижение среднего отклонения значений от поверхности к 1000 метрам, модель GFS хуже соответствует значениям температуры МТП-5 на низких высотах, максимальное среднее отклонение температуры достигает 3,4 градусов на высоте 50 метров.

Результаты работы показывают достаточно высокую применимость данных реанализа NCEP GFS в задачах исследования приземного слоя атмосферы. В связи с этим метеоданные модели GFS могут быть основой для анализа суточного хода температуры в приземном слое атмосферы, периодов температурных инверсий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Гигиена города М.: Медицина. 1986. С. 3-6.
- [2] Orru H. et al. Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences // Air quality, atmosphere & health. 2011. Т. 4. №. 3. С. 247-258.
- [3] Zanobetti A. et al. Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions // Environmental Health. 2009. Т. 8. №. 1. С. 1-12.
- [4] Dominici F. et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases // Jama. 2006. Т. 295. №. 10. С. 1127-1134.
- [5] Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. №. 40. С. 150-159.
- [6] Юшков В.П. Что может измерять температурный профилемер? // Метеорология и гидрология. 2014. №. 12. С. 76-88.
- [7] Ilyin G.N., Troitsky A.V. Determining the Tropospheric Delay of a Radio Signal by the Radiometric Method // Radiophys. Quantum Electron. 2017. Т. 60. С. 291-299.

- [8] *Dergunov A., Yakubailic O.* Influence of temperature inversions on air pollution in Krasnoyarsk // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2021. Т. 333. С. 02002.
- [9] *Lin C. et al.* Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // Atmospheric Environment. 2020. Т. 227. С. 117410.
- [10] ФГБУ «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». <https://meteo.krasnoyarsk.ru> (дата обращения 23.01.2023).
- [11] The Global Forecast System (GFS) Documentation. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php (дата обращения 23.01.2023).
- [12] Wgrib2 Utility to read and write grib2 files. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2> (дата обращения 23.01.2023).

АНАЛИЗ КОСМОСНИМКОВ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ШИАРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Кабанов А.А.^{1,2,3}, Зотин А.Г.⁴, Симонов К.В.⁵, Кругляков А.С.^{1,5}

¹ НП «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов», Красноярск

² Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Красноярск

³ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл

⁴ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск

⁵ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В работе предложена методика обработки и анализа космоснимков территории с повышенной сейсмической активностью для выделения геологических неоднородностей (геологических разломов, блоков) на поверхности Земли. Основу методики составляют адаптированные алгоритмы дискретного шиарлет-преобразования (Shearlet toolbox и FFST). Решаются задачи фильтрации шума и выделения контура с контрастированием и цветовым кодированием для исследуемых визуальных данных наблюдений.

Ключевые слова: Шиарлет-преобразование, анализ космоснимков, эпицентр землетрясения, спутниковый мониторинг, инфракрасный диапазон.

ANALYSIS OF SPACE IMAGES OF THE FAULT SYSTEM OF THE ALTAI-SAYAN SEISMIC ACTIVE REGION BASED ON SHIARLETT TRANSFORM ALGORITHMS

Kabanov A.A.^{1,2,3}, Zotin A.G.⁴, Simonov K.V.⁵, Kruglyakov A.S.^{1,5}

¹ NP «Environmental Center for the Rational Development of Natural Resources», Krasnoyarsk

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk

³ Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kizil

⁴ Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

⁵ Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The paper proposes a method for processing and analyzing satellite images of a territory with increased seismic activity to identify geological inhomogeneities (geological faults, blocks) on the Earth's surface. The methodology is based on adapted algorithms for discrete shearlet transform (Shearlet toolbox and FFST). The problems of noise filtering and contour extraction with contrasting and color coding for the studied visual observational data are solved.

Key words: Shearlet transform, satellite imagery analysis, earthquake epicenter, satellite monitoring, infrared range.

Работа посвящена оценке напряженного состояния различных сейсмоактивных зон Алтае-Саянской сейсмоактивной области на основе сейсмогеологических исследований и данных региональной сети сейсмических станций. В частности, сейсмогеологические работы проводились на территории Республики Тыва.

Выполнена апробация метода инфракрасного космического мониторинга территории с целью разработки подхода (метода) выявления признаков-предвестников подготовки сильных землетрясений на исследуемой территории

На основе анализа космических снимков со спутника Landsat 8 предпринята попытка выделения температурных предвестниковых (эпицентральных) аномалий на поверхности Земли перед сильными ($K \geq 11,0$) землетрясениями для территории Республики Тыва в 2021 году. Рассмотрено несколько подходов к обработке и интерпретации снимков, а также анализу результатов.

В качестве анализируемых сейсмических событий исследованы 5 землетрясений 2021 года $K \geq 11$ (таблица 1). Анализ выполнялся по выделенным зонам повышенной сейсмической активности (3 зоны, рисунки 1-6).

Табл. 1. Землетрясения $K \geq 11$, зарегистрированные на территории Республики Тыва в 2021 году.

DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4
05.09.2021 07:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 07:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

ЗОНА 1 (фрагмент таблицы 1).

DATE	LAT	LON	H	MS	K
05.09.2021 7:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 7:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

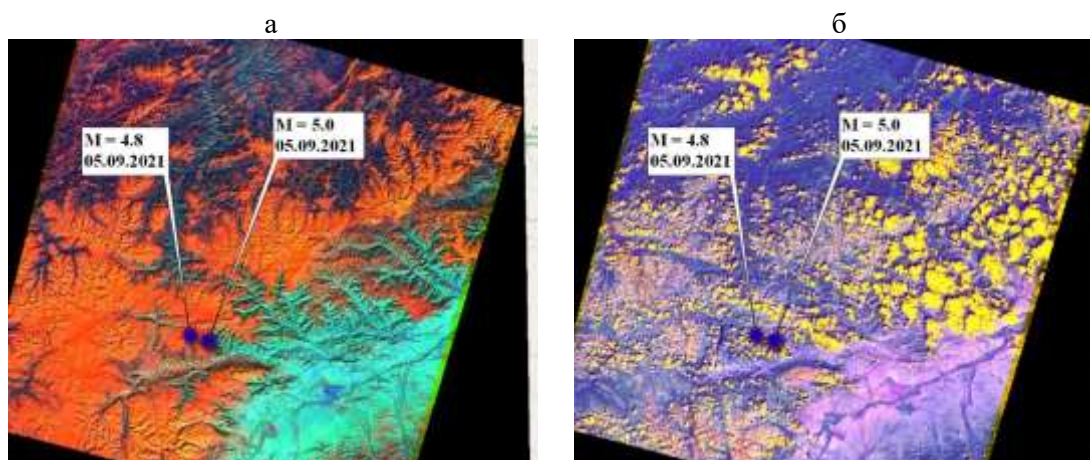


Рис. 1. Космоснимки перед землетрясениями: а – 27.03.2021; б – 02.08.2021.

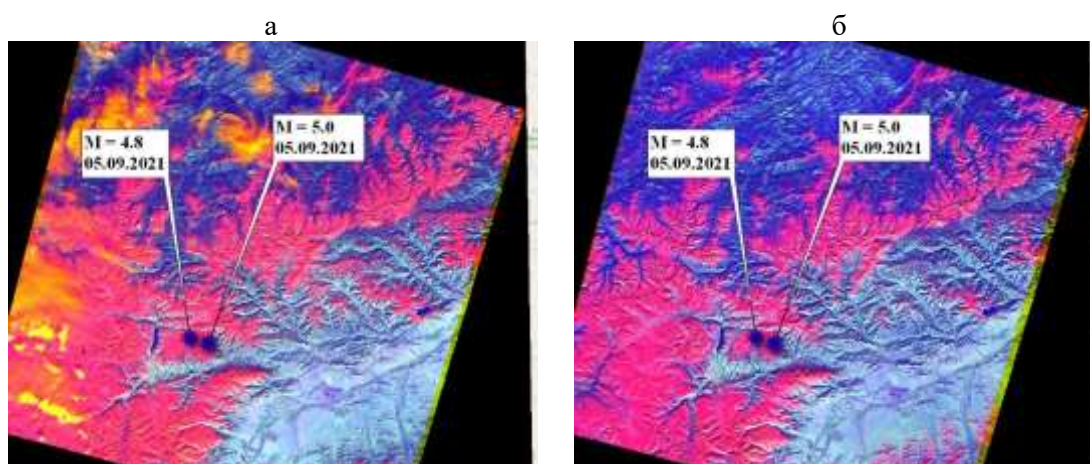


Рис. 2. Космоснимки после землетрясений: а – 05.10.2021; б – 23.10.2021.

ЗОНА 2 (фрагмент таблицы 1).

DATE	LAT	LON	H	MS	K
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4

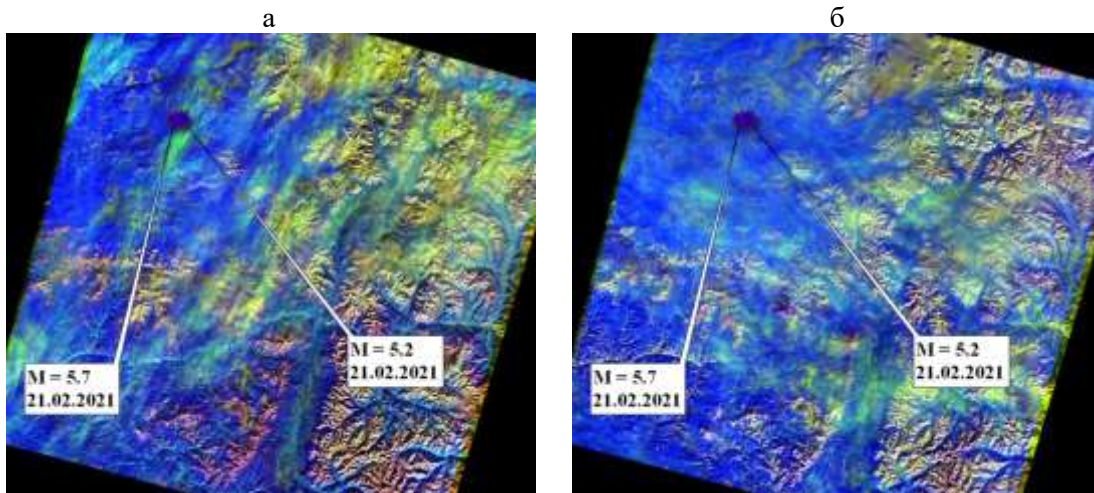


Рис. 3. Космоснимки перед землетрясениями: а – 02.12.2020; б – 03.01.2021.

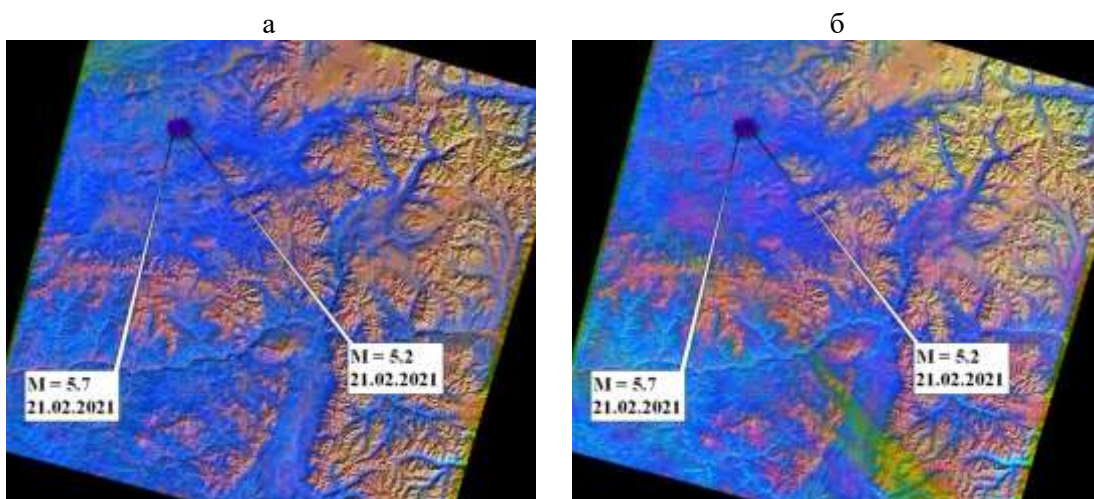


Рис. 4. Космоснимки после землетрясений: а – 08.03.2021; б – 24.03.2021.

ЗОНА 3 (фрагмент таблицы 1).

DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2

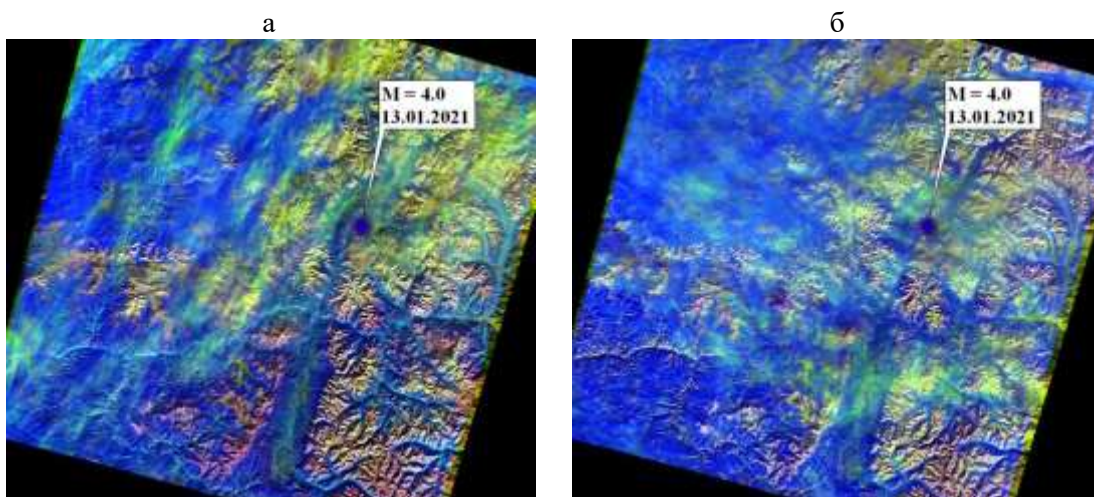


Рис. 5. Космоснимки перед землетрясениями: а – 02.12.2020; б – 03.01.2021.

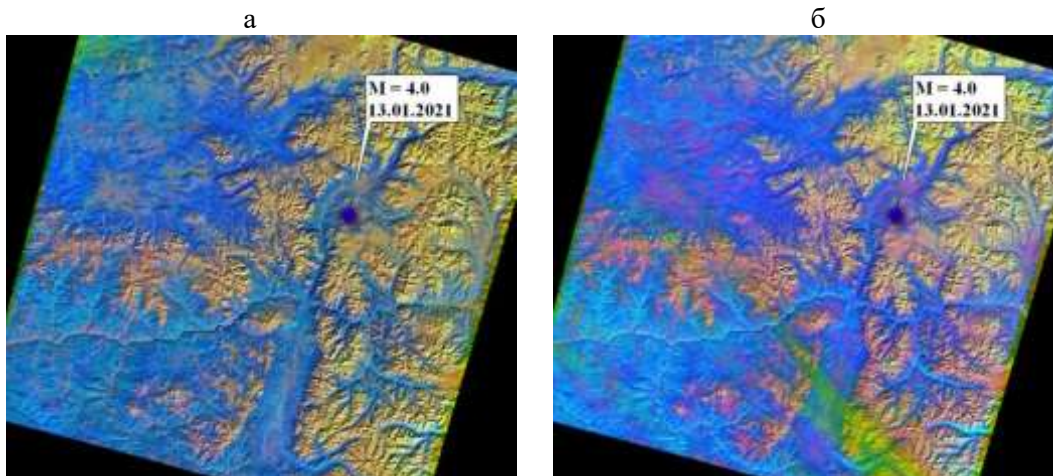


Рис. 6. Космоснимки после землетрясений: а – 08.03.2021; б – 24.03.2021

Отметим, что при сопоставлении космоснимков в красном и ИК диапазонах в период до и после землетрясений четких корреляций с локальными изменениями температуры поверхности Земли в исследуемых зонах не наблюдалось. Аномалии температур присутствуют, однако, количественных оценок, что они связаны с подготовкой относительно сильных землетрясений, в настоящее время нет. Наиболее глобальные (на больших территориях) изменения температурного режима (аномалии) также присутствуют, но они, скорее всего, связаны именно с климатическими изменениями температуры приповерхностного слоя атмосферы, включая поверхность Земли.

В ходе изучения научной литературы по теме исследования выделены алгоритмы компенсации/исключения климатических (погодных) аномалий на космоснимках, что позволит далее учитывать указанный параметр и более надежно определять локальные аномалии температурных изменений на космоснимках. Также отметим, что сильное влияние при обработке оказывала облачность. Практически все снимки были с существенной облачностью, что затрудняло подборку материала, его анализ и интерпретацию.

В настоящей работе для выделения неоднородностей на космоснимках ИК диапазона выполнено контрастирование исходных изображений посредством шиарлет-преобразования [1-3]. В рамках решения поставленной задачи использован алгоритм быстрого дискретного шиарлет-преобразования (FFST) [4,5] для выделения значимой частоты (Гц), соответствующей выделенной геометрической особенности изучаемого геообъекта. Предложенный способ применения алгоритма FFST позволил повысить точность выделения контуров и визуальное качество изображений изучаемых объектов.

На рисунках 7-12 после обработки космоснимков быстрым дискретным шиарлет-преобразованием (FFST) выделены особенности спектров, которые могут быть предвестниками подготовки изучаемых ощутимых землетрясений.

Анализ выделенных особенностей (рисунки 7-8), показал, что в районе эпицентров землетрясений за месяц до возникновения землетрясений (рисунок 7.б) исчезает температурная аномалия в диапазоне частот 150-200 Гц, а месяц спустя снова появляется.

Анализ рисунков 9-10 показал, что в районе эпицентров землетрясений до возникновения землетрясений (рисунок 9) диапазон частот менее 50 Гц, тогда как после реализации этих землетрясений (рисунок 10) в очаговой зоне появляется окрас диапазона частот 50-100 Гц.

ЗОНА 1 (фрагмент таблицы 1).

DATE	LAT	LON	H	MS	K
05.09.2021 07:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 07:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

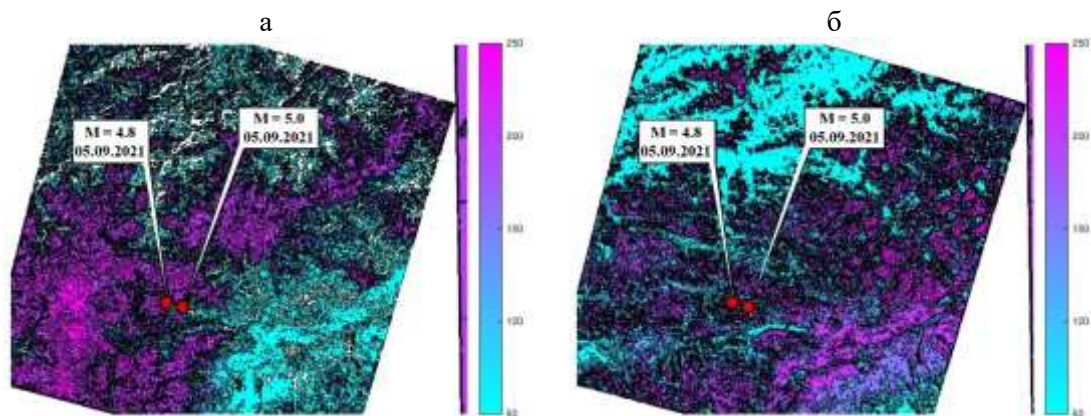


Рис. 7. Космоснимки перед землетрясениями: а – 27.03.2021; б – 02.08.2021.

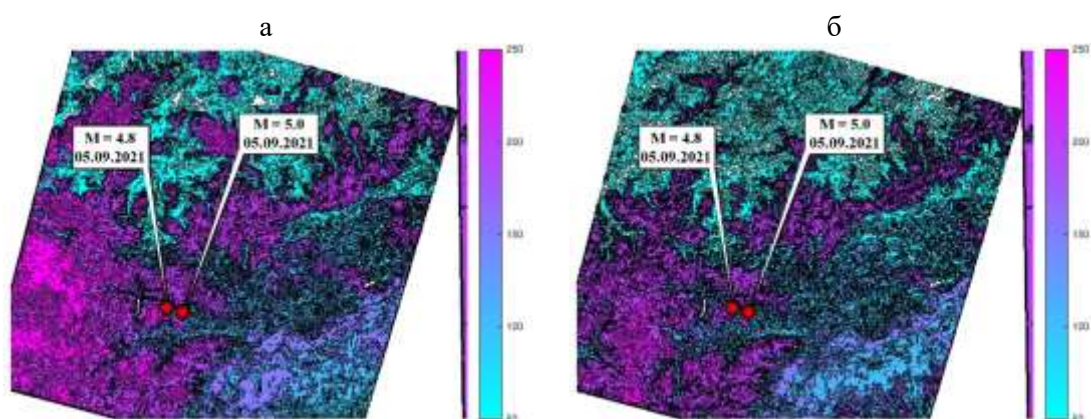


Рис. 8. Космоснимки после землетрясений: а – 05.10.2021; б – 23.10.2021.

ЗОНА 2 (фрагмент таблицы 1).

DATE	LAT	LON	H	MS	K
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4

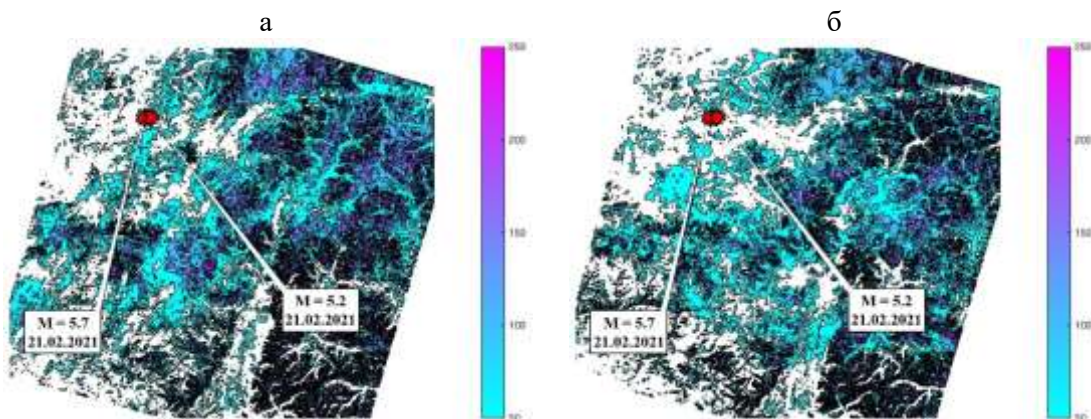


Рис. 9. Космоснимки перед землетрясениями: а – 02.12.2020; б – 03.01.2021.

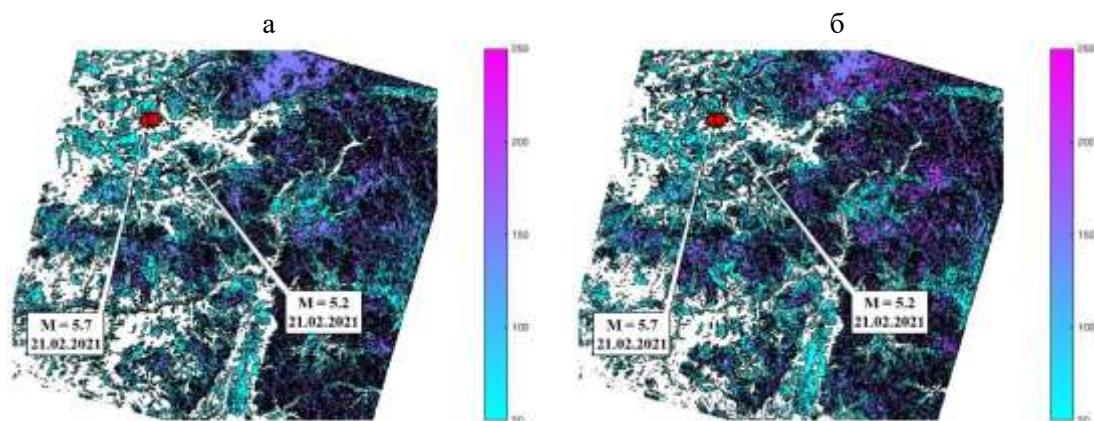


Рис. 10. Космоснимки после землетрясения: а – 08.03.2021; б – 24.03.2021.

ЗОНА 3 (фрагмент таблицы 1)ю.

DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2

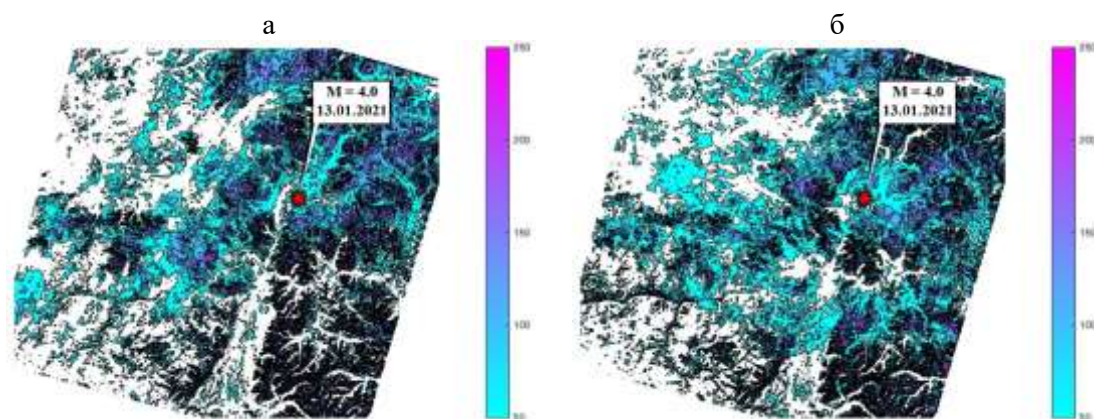


Рис. 11. Космоснимки перед землетрясениями: а – 02.12.2020; б – 03.01.2021.

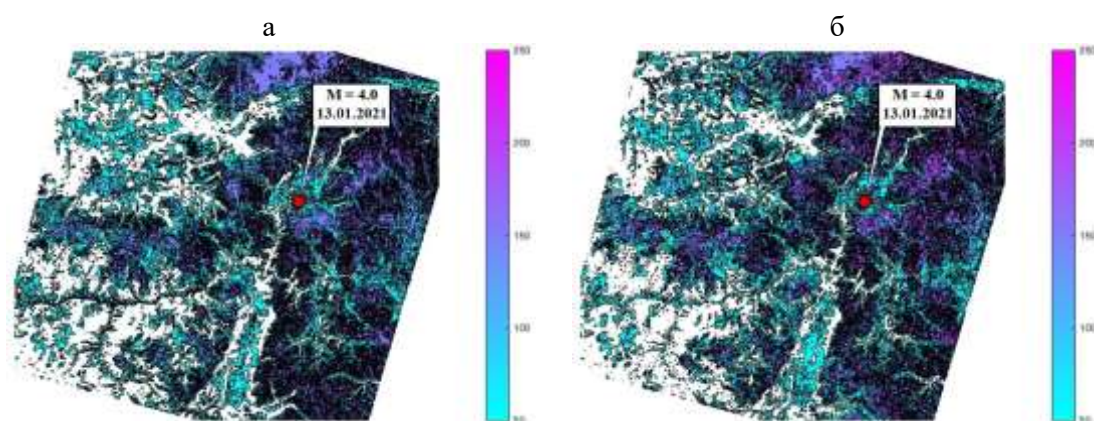


Рис. 12. Космоснимки после землетрясений: а – 08.03.2021; б – 24.03.2021.

Также, как и в предыдущем случае, анализируя рисунки 11-12, определяем, что в районе эпицентров землетрясений до возникновения землетрясений (рисунок 11) диапазон частот ниже (от 50 до 100 Гц), чем после реализации землетрясений (рисунок 12). В очаговой зоне появляется окрас диапазона частот 100-150 Гц.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы: локальные температурные аномалии по снимкам космического мониторинга (в красном и КИ диапазонах) после обработки быстрым дискретным шпирлет-преобразованием присутствуют в явном виде. В тоже время при разных сейсмических событиях (по магнитуде и месту возникновения) они отличаются друг от друга частотным диапазоном.

Для получения надежного результата и корреляционных оценок необходимы дальнейшие исследования с большим количеством (каталогом) ощутимых землетрясений, а также с использованием других алгоритмов контрастирования космоснимков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Kutyniok G., Labate D.* Introduction to Shearlets / Kutyniok G., Labate D. (eds) Shearlets. Applied and Numerical Harmonic Analysis, 2012. Birkhäuser Boston. DOI:10.1007/978-0-8176-8316-0_1.
- [2] *Lim W.-Q.* The discrete shearlet transform: a new directional transform and compactly supported shearlet frames // IEEE Trans. Imag. Proc., 2010. V. 19. P. 1166-1180.
- [3] *Guo K., Labate D., Lim W.-Q.* Edge analysis and identification using the Continuous Shearlet Transform // Appl. Comput. Harmon. Anal. 2009. V. 27. P. 24-46.
- [4] *Hauser S.* Fast finite shearlet transform: a tutorial. Preprint University of Kaiserslautern, 2014.
- [5] *Hauser S.* Fast Finite Shearlet Transform, 2014. Режим доступа: <http://www.mathematik.uni-kl.de/fileadmin/image/haeuser/software/FFST.zip>.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ПОСТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОГОДЫ И ОСАДКОВ

Кадочников А.А.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В работе рассмотрены этапы создания специализированной системы сбора и обработки данных мониторинга состояния природной среды и ресурсов с применением веб-сервисов. Источником информации для такой системы являются данные наземных постов наблюдений и данные глобальных и региональных моделей. Данные модели Global Forecast System, позволяет проводить дополнительный анализ состояния атмосферного воздуха там, где наземных постов недостаточно. Для анализа состояния почвы используются данные проекта Global Precipitation Measurement.

Ключевые слова: ГИС, веб-сервисы, пространственные данные, данные наблюдений, глобальные модели.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE DATA OF GROUND OBSERVATION STATIONS AND DATA OF GLOBAL WEATHER AND PRECIPITATION MODELS

Kadochnikov A.A.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The paper considers the stages of creating a specialized system for collecting and processing data for monitoring the state of the natural environment and resources using web services. The source of information for such a system is data from ground-based observation posts and data from global and regional models. The data of the Global Forecast System model allows for additional analysis of the state of atmospheric air where there are not enough ground posts. The data of the Global Precipitation Measurement project are used to analyze the state of the soil.

Keywords: GIS, web-services, geospatial data, observation data, global models.

Метеорологические данные и результаты обработки спутниковых данными играют важную роль в современном сельском хозяйстве, поскольку они позволяют принимать обоснованные решения по управлению процессами сельскохозяйственной деятельности, что в свою очередь повышает урожайность и снижает затраты на производство конечной продукции. Имея точную информацию о погодных условиях, температуре, осадках и влажности, фермеры могут оптимизировать графики посева, определить лучшее время для орошения, внесения удобрений и принять меры предосторожности для защиты урожая от экстремальных погодных явлений, таких как засухи и наводнения.

Одним из важных применений метеорологических данных в сельском хозяйстве является прогнозирование начала и продолжительности вегетационного периода для каждой агрокультуры. Анализируя данные за предыдущие года и исторические наблюдения за погодными условиями, фермеры могут прогнозировать этапы роста сельскохозяйственных культур в текущем периоде. Метеорологические данные также могут помочь фермерам контролировать уровень влажности почвы и соответствующим образом планировать графики полива, сокращая потери воды и максимально увеличивая рост урожая.

С целью повышения эффективности принимаемых решений в сельском хозяйстве для ряда опытных производственных хозяйств (ОПХ) Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН), возникла задача сбора и обработки метеорологических данных в единую систему. Данные в ежедневном режиме собираются со всех действующих метеорологических станции сети Росгидромета на территории Красноярского края. Однако вследствие недостаточного количества метеорологических станций невозможно оценивать все необходимые параметры сельскохозяйственного производ-

ства. Кроме того, для прогнозирования необходим огромный массив метеорологических данных, включающий данные спутниковой обработки и данные существующих прогностических моделей, каждая из которых настроена под конкретную задачу.

Сотрудниками Института вычислительного моделирования СО РАН (ИВМ СО РАН) много лет ведется работа по поддержке и развитию системы сбора оперативной информации о состоянии атмосферного воздуха в Красноярском крае. Сбор оперативных данных для научных исследований и мониторинга состояния атмосферного воздуха осуществляется в единую систему «Данные оперативного мониторинга» Института вычислительного моделирования СО РАН (<http://sensor.krasn.ru/sc>) [1, 2].

Для исследования состояния атмосферного воздуха в городе Красноярск ведется сбор данных краевой сети из Краевой ведомственной информационно-аналитической системы о состоянии окружающей среды Красноярского края (<http://krasecology.ru/Air>). Осуществляется сбор данных с собственной сети станций ФИЦ КИЦ СО РАН. Помимо основных метеорологических параметров (температура, влажность и атмосферное давление) доступны данные по содержанию взвешенных частиц в атмосферном воздухе (PM_{2.5}, PM₁₀) [3]. Такой же набор данных собирается со станций двух общественных проектов. Данные проекта Nebo community (<https://nebo.live>), созданного активистами из Красноярска. И данные открытой экологической платформы «Российские зеленые», проект «Эковизор» (<http://online.russiangureens.ru>).

Для исследования состояния воздуха за пределами города на территории всего Красноярского края осуществляется сбор оперативных данных метеонаблюдений FM-12 IX SYNOP. Данные SYNOP включают данные о ветре, осадках, влажности, температуре воздуха и др. Данные ежедневно загружаются с портала ЕСИМО (межведомственная информационная система для доступа к ресурсам морских информационных систем и комплексного информационного обеспечения морской деятельности). Данные собираются по метеостанциям на территории Красноярского края и соседних с ним регионам.

Дополнительно была организована загрузка архивных данных метеонаблюдений по ряду метеостанций на территории Красноярского края за XX 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://www.ncei.noaa.gov/maps/hourly>). Данные метеонаблюдений включают информацию о качестве воздуха, атмосферном давлении, температуре атмосферы, ветре, облаках, осадках и многое другое. База данных содержит данные в цифровом формате, в которой хранятся часовые, 3х-часовые (синоптические) и ежедневные наблюдения за погодой. Загруженный архив содержит данные за разные промежутки времени по всем доступным метеостанциям на территории Красноярского края.

К недостаткам данных системы NCEI можно отнести пропуски данных по ряду метеостанций в некоторые периоды. По наиболее интересным для исследований метеостанциям были дополнительно загружены архивы данных с сайта <https://rp5.ru>, которые позволили заполнить пробелы в данных. Этот сайт позволяет выгрузить архив метеоданных за произвольный период по метеостанции с международным кодом WMO (World Meteorological Organization Codes).

Доступ к данным системы «Данные оперативного мониторинга» Института вычислительного моделирования СО РАН организован для авторизованных пользователей с помощью веб-сервисов с использованием REST API [4].

Данных метеостанций недостаточно для исследований, связанных с темой экологического мониторинга атмосферного воздуха и исследованиях для агропромышленного комплекса. Расстояния между исследуемым объектом и ближайшей метеостанцией может измеряться в десятках или сотнях километров. Для решения этой проблемы были использованы данные глобальных моделей, имеющих сплошное покрытие территории. В связи с чем возникла задача загрузки и подготовки данных для территории Красноярского края.

Сегодня существует множество глобальных и региональных моделей прогноза погоды и осадков. Глобальные модели охватывают всю планету, локальные охватывают определенные

области, такие как континенты, страны, горные массивы и так далее. Как глобальные, так и локальные модели различаются между собой по пространственному разрешению, которое представляет собой размер точек сетки и по временному интервалу.

Среди глобальных моделей погоды можно отметить бесшовную европейскую модель глобального прогнозирования ECMWF и модель Global Precipitation Measurement (GFS). GFS – самая известная глобальная модель погоды, которая обновляется каждые шесть часов американской метеорологической службой [5]. Модель ICON (Integrated COSMO model), созданная Немецкой метеорологической службой (Deutscher Wetterdienst). Совместную модель COSMO, развиваемую и поддерживаемую консорциумом ряда Европейских стран, включая Россию. В России используется база данных прогнозов COSMO-Ru. Однако данные этой модели недоступны обычным пользователям.

Еще одним популярный источником метеоинформации являются сайты агрегаторы. Например, проект OpenWeatherMap и ему подобные, которые используют данные различных моделей и данные домашних метеостанций. Каждый может купить такую станцию, установить за окном, после чего данные будут передаваться на сайт агрегатор. Однако у домашних станций большой разброс показаний, что может негативно влиять на общий прогноз. Обычно доступ к таким данным платный, за исключением разовых обращений.

Для дальнейшего анализа данных были разработаны алгоритмы пакетной обработки данных проектов Global Precipitation Measurement (GPM) и Global Forecast System. Проект Global Precipitation Measurement – предоставляет централизованный доступ к глобальным картам осадков [6]. Global Forecast System – модель прогноза погоды, которая генерирует данные для десятков атмосферных и почвенных показателей, включая данные о температуре, ветре, осадках, влажности почвы и др. Ранее в Институте уже был сформирован архив данных этих проектов за прошлые года. Ежедневно выполняется загрузка новых данных. Результаты обработки этих данных позволяют ежедневно анализировать состояние атмосферного воздуха и поверхности почвы на выбранном участке с помощью специализированных веб-приложений.

В 2019 году появился доступ к единому архиву об осадках за последние 22 года, подготовленному с помощью алгоритма Integrated Multi-satellitE Retrieval for GPM (IMERG). Алгоритм IMERG объединяет информацию от ряда космических аппаратов для оценки количества осадков на большей части поверхности Земли и формирует несколько наборов данных с разными типами обработки исходной информации и разной скоростью подготовки: «Early Run», «Late Run», «Final Run» [7]. В мае 2022 года вышла 7 версия алгоритма.

Разработанное ранее программное обеспечение для загрузки и обработки данных проекта GPM позволяло загружать наборы данных «Late Run». Этот набор позволял получать информацию с задержкой не более суток. В 2022 году программное обеспечение было доработано, что позволило загружать набор данных «Final Run». Эти данные по сравнению с набором «Late Run» по версии разработчиков лучше подходят для создания продуктов исследовательского уровня. В наборе данных «Final Run» используется ежемесячная корректировка исходного набора, которая сочетает в себе спутниковые данные за месяц с использованием датчиков GPCC (Global Precipitation Climatology Centre). Эти данные получены с использованием большего количества информации и являются более точными по сравнению с наборами «Early Run» и «Late Run» [8]. Однако на их формирование уходит много времени, и они появляются с задержкой более месяца.

Общая схема обработки включает в себя несколько этапов. В первую очередь выполняется загрузка и подготовка исходных данных. На следующих этапах выполняется подготовка данных для работы веб-сервисов и приложений. Из глобальной карты осадков вырезается прямоугольная область на территорию Российской Федерации. Затем растры сшиваются в один файл на основе которого формируется png изображение с учетом всех ограничений и коэффициентов исходных данных.

Аналогичные алгоритмы обработки использовались для обработки данных проекта GFS. Но стоит отметить, что данные этого проекта содержат множество различных слоев информации. Для дальнейшего анализа информации о состоянии атмосферного воздуха и поверхности

почвы были выбраны наиболее подходящие слои из общего числа, включающие следующие показатели:

- Температура на поверхности, на высотах 2, 80 и 100 метров над уровнем поверхности, а также на высотах изобарической поверхности: 850, 900, 925, 950 и 975 гПа.
- Давление на поверхности.
- Направление и скорость ветра в U и V компонентах на поверхности, на высотах 2, 80 и 100 метров над уровнем поверхности, а также на высотах изобарической поверхности: 850, 900, 925, 950 и 975 гПа. Порывы ветра на поверхности.

Для данных об атмосферном давлении и температуре дополнительно формируется векторные слои с изолиниями. Изображение изолиний на карте облегчает восприятие информации для пользователя. Для сглаживания линий изолиний, построенных по сетке, использовалось предварительное размытие раstra.

Описанные выше алгоритмы позволяют получать информацию за период времени только в одной точке. Дополнительно для анализа информации на некоторой области разработан алгоритм, позволяющий рассчитать среднее взвешенное значение для выбранного показателя из моделей GFS и GPM. При расчете учитываются все пиксели, попавшие в область с учетом площади, возникшей при пересечении пикселей раstra с границей области. Каждое рассчитанное значение по выбранному показателю записывается в базу данных за все дни с 2007 года для данных модели GFS и с 2000 года для данных модели GPM. Такие данные позволяют легко и быстро строить графики по выбранной области за любой период времени. На основе алгоритма разработано программное обеспечение на языке Python с использованием библиотек GDAL и OGR. Пример с диаграммами осадков по данным GPM и температуры на поверхности по данным GFS за вегетационный период 2022 года представлен на рисунке 1.

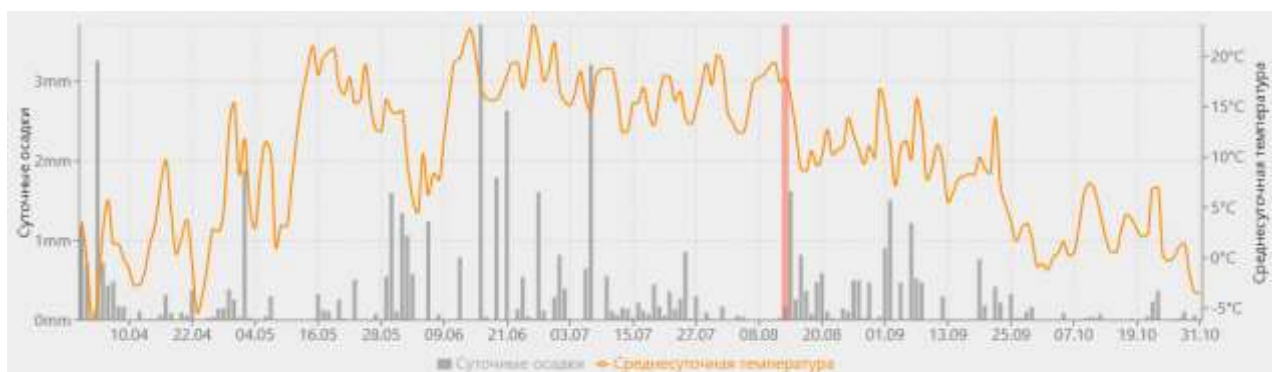


Рис. 1. Графики осадков по данным GPM и температуры по данным GFS за период 2022 года.

Данные осадков и температуры, рассчитываемые для заданных областей, позволили выполнить расчет других комплексных показателей. В качестве эксперимента разработана программа, которая позволяет автоматически рассчитать гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) (предложен советским климатологом Г.Т. Селяниновым). ГТК Селянинова позволяет проводить оценку увлажнённости территории. Определяется отношением суммы осадков (R) в мм за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10 °С к сумме температур (T) за это же время, уменьшенной в 10 раз:

$$\text{ГТК} = 10 * R / T$$

Чем ниже ГТК, тем засушливее местность. ГТК используют при сельскохозяйственной оценке климата для выделения зон различной влагообеспеченности сельскохозяйственных культур.

Коэффициент рассчитывается для каждой заданной области с 2007 года за весь вегетационный период года, за каждый месяц года и по декадам каждого месяца. Данные загружаются в базу данных, что в свою очередь позволяет получить доступ к ним за любой выбранный период времени из сторонних приложений без ожидания.

В результате на основе загруженных данных проектов GPM и GFS с использованием разработанного программного обеспечения было подготовлено несколько наборов данных, каждый из которых обновляется ежедневно. Первый набор представляет собой каталог растровых изображений в форматах png и jpeg и векторных файлов по каждому отдельному слою данных. Данные в таком формате имеют значительно меньший объем, что позволяет их быстро просматривать в веб-приложении на стороне клиента. А также без особой нагрузки на сервер позволяют выполнять запросы по одной выбранной точке на карте за произвольный период времени.

Второй набор данных формируется для каждой выбранной области и загружается в базу данных. Разработанный алгоритм позволяет рассчитать средний показатель для каждой заданной области из всего архива данных GFS и GPM. Такой алгоритм позволяет получить суммарную оценку по всей выбранной территории. Сформирована база данных, позволяющая в онлайн режиме получать данные по показателям в выбранной области за период от одних суток до нескольких лет с возможностью расчета других комплексных показателей.

Все программы загрузки и обработки файлов реализованы на языке Python 3 и языке сценариев Bash. Для хранения данных применяется СУБД PostgreSQL с модулем расширения PostGIS. Веб-сервисы разработаны с использованием языка PHP 8.

Разработан набор веб-сервисов, позволяющих для прикладных систем получать данные по осадкам и температуре на заданной территории в выбранный промежуток времени. Данные по осадкам могут быть отфильтрованы по температуре. Однако к данным глобальных моделей в некоторых случаях возникали вопросы в их достоверности [9, 10]. С целью проверки данных моделей было создано тестовое веб-приложение, позволяющее просматривать данные по осадкам на некоторых участках исследования совместно с данными метеостанций. В качестве примеры были выбраны три ОПХ ФИЦ КНЦ СО РАН: Курагинское, Мининское и Михайловское.

При совместном анализе данных об осадках, полученных с метеостанций федеральной сети Росгидромета и данных модели GPM стоит учитывать ряд особенностей. Данные осадков с метеостанций Росгидромета передаются в 0 и 12 часов каждых суток по шкале времени UTM+0. Передается сумма накопленных осадков за 12 часов измерений. Данные модели GPM содержат сумму накопленных осадков за полные сутки по шкале времени UTM+0. Данные для метеостанций хранятся в местном времени, UTC+7.

Для анализа данных сети Росгидромета формируется набор с суммой осадков за полные сутки. Для тестов для каждого хозяйства было выбрано несколько ближайших метеостанции.

На рисунке 2 представлен график с данными распределения значений накопленных осадков в мм/ч с апреля по октябрь включительно 2019 года для ОПХ Курагинское и метеостанции в Курагино.

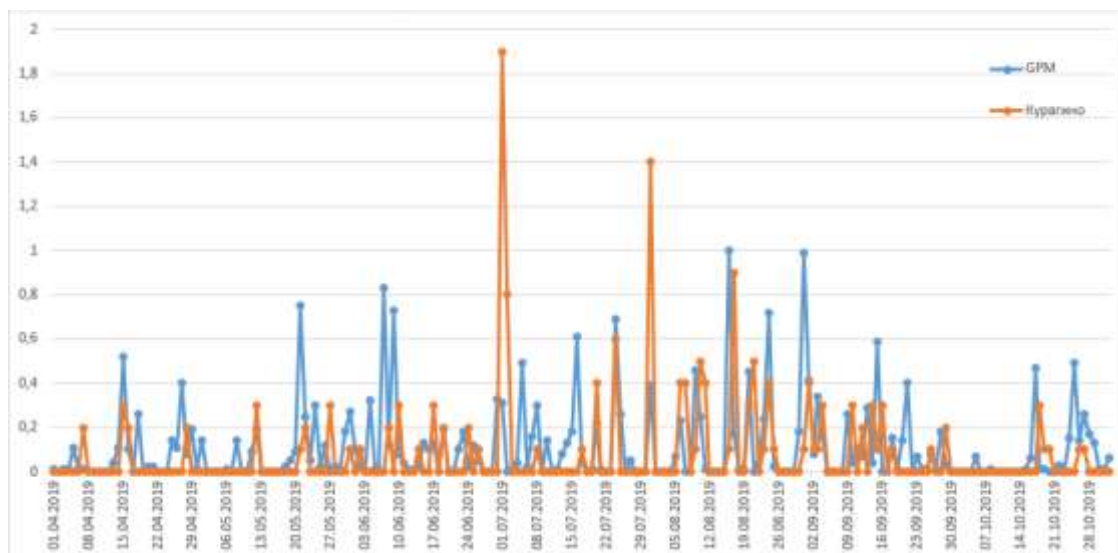


Рис. 2. Осадки в ОПХ Курагинское в 2019 году.

Метеостанция в Курагино расположена недалеко от полей ОПХ Курагинское. Корреляция между данными GPM и данными метеостанции слабая и составляет 0,247. Сумма накопленных осадков при температуре выше 10° Цельсия по данным с метеостанции составляет 355,2 мм против 471,36 мм по данным GPM. Для ОПХ Михайловское и метеостанции в Шарыпово с апреля по октябрь включительно 2021 года корреляция слабая и составляет 0,385, сумма осадков на метеостанции 271,2 мм против 343,44 мм по данным GPM. Для ОПХ Мининское и метеостанции в Минино за аналогичный период корреляция слабая и составляет 0,369, сумма 249,6 мм против 315,12 мм соответственно.

За другие периоды похожая картинка. Наблюдается слабая корреляция между модельными данными и данными метеостанций. Превышение суммы осадков у GPM составляет порядка 20-25 процентов над данными метеостанции. Для общей оценки данные GPM можно использовать, однако для прогноза урожайности требуется их корректировка. Следует учитывать, что данные метеостанций также не всегда содержат корректные значения и некоторые значения, выходящие за пределы допустимых значений можно отбросить.

Для доступа к загруженным данным проектов GPM и GFS создан отдельный WMS сервер с использованием программного обеспечения MapServer. Такой сервер позволяет загружать карты в настольные ГИС программы и веб-приложения на выбранный момент времени с данными об осадках, температуре, ветре и других показателей.

Использование современных информационных технологий в задачах анализа состояния атмосферного воздуха и почвы в Красноярском крае, а также в задачах для агропромышленного комплекса позволяет повысить эффективность принимаемых решений. Интеграция различных инструментов в единую информационную систему позволяет совместно анализировать самые разные виды пространственно распределенных показателей и описательных данных. Разработанные алгоритмы и сервисы могут использоваться как в масштабах всего региона, так и на уровне отдельного небольшого участка для исследований.

Данные погодных моделей и глобальных карт осадков помогают исследователям улучшить прогнозирование экстремальных явлений, изучать глобальный климат и расширить существующие возможности анализа и прогноза для агропромышленного комплекса. Данные моделей погоды и осадков совместно со спутниковыми данными позволяют проанализировать годовой цикл сельскохозяйственного производства на протяжении ряда лет. Анализируя многолетние погодные условия и условия окружающей среды, фермеры могут принимать обоснованные решения по управлению посевами и внесением удобрений, повышая урожайность сельскохозяйственных культур на своих полях.

При анализе состояния атмосферного воздуха для задач экологического мониторинга данные прогнозных моделей атмосферы позволяют выполнять оценку многолетних наблюдений за состоянием воздуха в городе или другой крупной территории. Для более детального анализа уже в рамках населенного пункта пространственного разрешения прогнозных моделей обычно недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Токарев А.В.* Программно-технологическое обеспечение для сбора и хранения данных серийных наблюдений за состоянием окружающей среды. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2014. С. 228-236.
- [2] *Kadochnikov A.A.* Experience in the development a regional geoportal for the Krasnoyarsk region. Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS” – 2020. Vol. 26, Issue 1, P. 203-214.
- [3] *Azegov D.* Saint-Petersburg air pollution monitoring system. Environment of Saint-Petersburg, 2016. Vol 2 (2), P. 8-14.
- [4] *Schmitt R.H. and Voigtmann C.* Sensor information as a service – component of networked production. J. Sens. Sens. Syst., 2018. Vol. 7, P. 389-402.
- [5] *Hewage, P., Trovati, M., Pereira, E. et al.* Deep learning-based effective fine-grained weather forecasting model. Pattern Anal Applic, 2021. V. 24. P. 343-366.
- [6] *Skofronick-Jackson G. et al.* The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017. V. 98 (8). P. 1679-1695.

- [7] *Hou A.Y. et al.* The global precipitation measurement mission. Bulletin of the American meteorological Society, 2014. V. 95 (5). P. 701-722.
- [8] *Tan, J., W. A. Petersen, and A. Tokay.* A Novel Approach to Identify Sources of Errors in IMERG for GPM Ground Validation. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17 (9), P. 2477-2491.
- [9] *Tang L. et al.* An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates. Atmospheric Research, 2015. V. 163. P. 61-73.
- [10] *Ignatov A. V., Osipova O. P., Balybina A. S.* Spatial structure of the relationships of annual precipitation amounts in Siberia and Kazakhstan. Geography and Natural Resources, 2018. V. 39. P. 148-152.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЙ НА РОСТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЕВОВ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ БЕСПИЛОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Картушинский А.В.^{1,2}, Картушинский С.А.¹, Ботвич И.Ю.², Емельянов Д.В.²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

² Институт биофизики СО РАН, Красноярск

Представлены результаты обработки термодинамических и биологических параметров поверхности полей сельскохозяйственного назначения, полученных с использованием контактных измерителей и беспилотных летательных аппаратно-измерительных средств. Рассматриваются системные признаки реализации научной технологии измерений изменчивости состояния растительности на мелкомасштабных пространственно-временных интервалах и параметров окружающей среды. Показаны особенности микроклиматического влияния факторов термодинамического режима воздуха на морфологические свойства с/х растений в поверхностном слое почвенного покрова.

Ключевые слова: микроклимат, хлорофилл, поверхность почвы, растительность, урожайность, температура воздуха, влажность, сила ветра, БПЛА, спектральные измерения.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF SMALL-SCALE AGROCLIMATIC FLUCTUATIONS ON GROWTH CHARACTERISTICS OF CROPS AND COMPARISON WITH DATA OF UNMANNED MEASUREMENTS

Kartushinsky A.V.^{1,2}, Kartushinsky S.A.¹, Botvich I.Yu.², Emelyanov D.V.²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk

² Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk

The results of processing the thermodynamic and biological parameters of the surface of agricultural fields obtained using sensors on ground and unmanned aerial vehicles are presented. Systemic features of the implementation of scientific technology for measuring the variability of the state of vegetation on small-scale space-time intervals and environmental parameters are considered. The features of the microclimatic influence of the factors of the thermodynamic regime of air on the morphological properties of agricultural plants in the surface layer of the soil cover are shown.

Key words: microclimate, chlorophyll, soil surface, vegetation, productivity, air temperature, humidity, wind force, UAV, spectral measurements.

Введение. Использование современных приборных и информационно-программных средств обработки данных дистанционных измерений в задачах мониторинга агроэкосистем создает неравнозначность между объемом накопленного материала и автоматизацией прикладных и научных методов изучения состояния растительных культур в условиях меняющегося климата. Развивающийся парк дистанционных аппаратно-инструментальных средств изучения динамики растительности, а в особенности агрономических посевов, сориентирован в последнее время на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) из-за существенной экономии финансовых средств по сравнению со спутниковыми методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и более высокому пространственно-временному разрешению изображений поверхности в различных спектральных диапазонах [1-3].

Несмотря на значительные успехи в изучении динамики растительных сообществ в вегетационный период, остаются нерешенными задачи оценки влияния на хлорофилльный листовый потенциал растений локальных пространственных мелкомасштабных факторов погодных условий. Кроме того, существенной проблемой в условиях изменений климата и переформирования масштабов, а также местоположения климатических поясов земной поверхности, является прогноз урожайности сельхозкультур и возможных изменений морфологической

структуры растений [4]. Параметрами, которые могут определяться как факторы, оказывающие влияние на ростовые характеристики растений, является температура и влажность почвы, а также режим температуры и влажности воздуха, атмосферное давление и сила ветра на уровне масштабов самого растения, а также размеров тестовых участков поля. Оценка этого влияния, основанная на одновременных дистанционных и контактных измерениях, имеет значительную важность прикладного и фундаментального характера исследований влияния абиотических факторов на продуктивный потенциал растений за весь период вегетации.

Таким образом основной научной задачей работы является выявление особенностей микроклиматического влияния факторов термодинамического режима воздуха на продуктивность растений в поверхностном слое почвенного покрова. Кроме того, решается задача оценки функционального разрыва данных БПЛА и термодинамических параметров, измеряемых непосредственно на поверхности почвенного покрова.

Материалы и методы. В работе используются данные, полученные в ходе полевых измерений дистанционными и контактными методами. Здесь предусмотрено применение автоматизированных методов измерений влажности и температуры воздуха, атмосферного давления и силы ветра, а также состояния почвы при помощи микродатчиков сантиметрового размера с применением разработанного программного обеспечения выполняющего функции сбора, накопления и хранения данных. Предусмотрены измерения и обработка данных с необходимой калибровкой и привязкой к данным измерений хлорофиллометром, который измеряет содержание хлорофилла в листьях, что позволяет следить за динамикой азотного питания растения. Упрощенный вид контактного измерителя метеорологических параметров представлен на Рисунке 1.

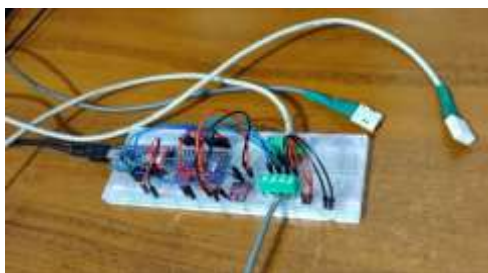


Рис. 1. Прототип платы измерителя («Гирлянда») – часть программно-измерительного устройства, состоящего из отдельных трех датчиков каждый из которых измеряет температуру и влажность воздуха, и на плате – атмосферное давление.

В полевых условиях применяется экспериментальная технология проведения контактных измерений температуры воздуха, влажности воздуха и атмосферного давления, а также силы ветра. Для одновременного считывания данных с различной частотой используются три датчика разнесенные на расстояние 3 метра соединенные проводами в гирлянду с микроконтроллером на плате прототипирования. Таким образом, есть возможность проводить измерения и в горизонтальной, и в вертикальной плоскости учитывая высоту шероховатости поверхности и, следовательно, высоту растения. Данные с датчиков передаются на компьютер, с последующим формированием таблиц в Excel для первичной обработки и построения графиков изменения параметров во времени.

Также в измерительном эксперименте применяется электронный анемометр на разноуровневом штативе от 50 см до двух метров от поверхности, что соответствует стандартной высоте метеонаблюдений. Контроль содержания хлорофилла в листьях растений осуществляется с применением N-тестера (ССМ-200) в плановом режиме совмещения с временем измерения беспилотными летательными аппаратами – БПЛА самолетного типа и дрона.

Полученные данные локальных метеопараметров и хлорофилла сравниваются с результатами беспилотных спектральных измерений радиационной температуры и вегетационных индексов (NDVI, ClGreen, NDRE) посевов с помощью DJI Matrice 210 (Zenmuse XT2) и Геоскан-201 (мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge-MX) на различных интервалах вегетационного периода.

Результаты и обсуждение. Обращают внимание исследователи изменений климата на особенности сходных температурных режимов и осадков в различных региональных условиях и климатических зонах [5]. Однако «кухня погоды» на территории Евразии во многом определена интенсивностью термодинамических осцилляций Северной Атлантики и траекторией атмосферного переноса потоков тепла и массы, которая формирует локальные особенности погоды изменяя масштабы климатических процессов [6].

В нашей работе предлагается обратить внимание на масштабы усреднения измеряемых параметров в соответствии с существующими термодинамическими и биологическими процессами, которые имеют свои пространственные и временные масштабы функционирования. Таким образом научная новизна исследований определена возможностью получения уникальных данных, совмещенных по времени измерения:

- параметров данных беспилотных измерений (БПЛА с аппаратурой многоканальных мультиспектральных измерений);
- данных контактных измерений трех датчиков температуры, влажности воздуха и атмосферного давления на поверхности почвенного покрова на тестовых участках сельскохозяйственных посевов;
- параметров анемометра на штативе 0,5, 1,0, 1,5 и 2 м от поверхности земли по силе ветра, температуры и влажности воздуха.

На рисунке 2 представлена фотография рабочего места для проведения измерений контактным методом.



Рис. 2. Полевой агрометеорологический программно-измерительный комплекс.

Пространственное разрешение данных БПЛА – от 40см до 1м. Расстояние между контактными датчиками на поверхности измерения 1,5-3,0 м. Состояние листового покрова оценивается по показаниям прибора измеряющего концентрацию хлорофилла отдельного листа растительной культуры.

Все результаты измерений контактными датчиками «in situ» фиксируются в соответствующих базах и банках данных с использованием современных информационных систем, а также современных программных средств, в том числе авторских разработок, для статистической обработки данных. Таким образом, сформированы базы данных контактных метеорологических параметров с частотой измерений 0,2-0,4 секунды. На рисунке 3 показаны графики изменений величины температуры воздуха и влажности при измерениях датчиками в открытых и изолированных от внешней среды условиях. Интервал времени измерения: с 13:00 до 13:30 местного времени (Красноярск).

На рисунке 4 показан график изменений величины скорости ветра измеряемой на высоте треноги, на которой закреплен анемометр – 1,5 метра. По оси абсцисс – время измерения 0,4 секунды. Этот результат дает возможность оценивать потенциал пульсационной составляющей кинетической энергии без учета пульсационных колебаний скорости ветра, а точнее – силы ветра, а также градиентную составляющую пульсационных (турбулентных) движений в приповерхностном слое трения. Такие измерения дают возможность получать оценки мелко-масштабных воздействий на формирование морфологических характеристик растений на

уровне слоя шероховатости поверхности, подверженному плотностным изменениям состояния воздуха, которые определены стратификационными условиями.

Сканирование тестового участка поля проводилось с применением БПЛА DJI Matrice 210 RTK V2 с полезной нагрузкой в виде температурной камеры ZENMUSE XT2. Камера позволяет вести съемку в тепловом диапазоне 7,5-13,5μm с разрешением 640x512 пикселей. В качестве входных параметров съемки выбрано продольное и поперечное перекрытие снимков – 80 и 70%, соответственно. Высота полета – 300 м от точки взлета, съемка проводилась в надир. Пространственное разрешение построенного ортофотоплана составляет 39-40 см.

На рисунке 5 представлено цветное изображение радиационной температуры поверхности Land Surface Temperature (LST) посева яровой пшеницы за 22 июня 2023 г. в 13:30 местного времени г. Красноярск.

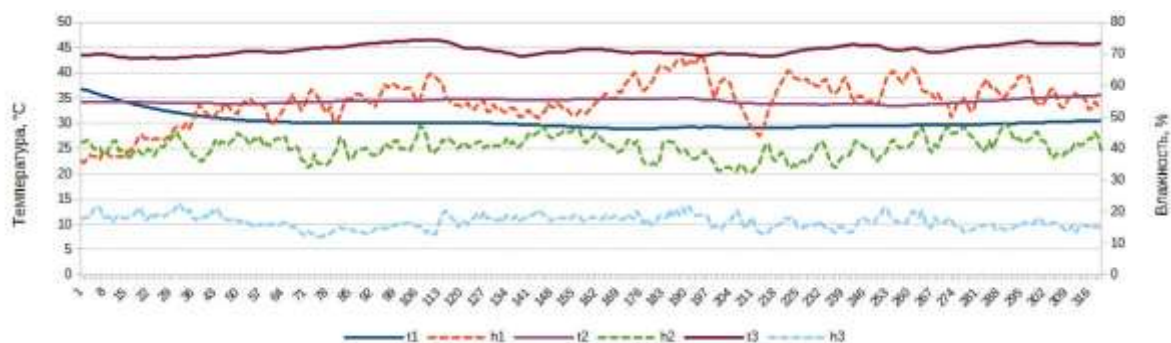


Рис. 3. Графики изменения температуры воздуха и влажности по датчикам в различных определяемых условиях задачи эксперимента в полевых условиях 22/06/23г.: t1, t2, t3 – датчики измерения температуры воздуха на поверхности земли; h1, h2, h3 – датчики влажности воздуха на поверхности.

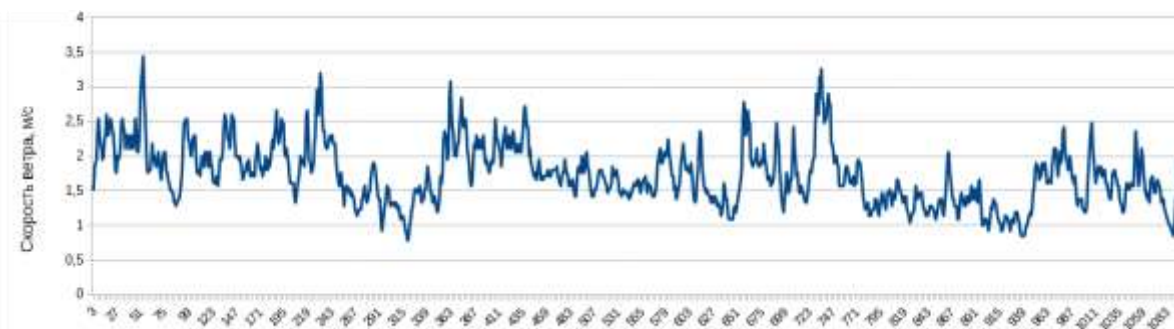


Рис. 4. График изменения скорости ветра, измеряемой анемометром на высоте 1,5м. Дата измерений – 22/06/23г. Интервал измерений: с 13:00 до 13:30 местного времени (Красноярск).

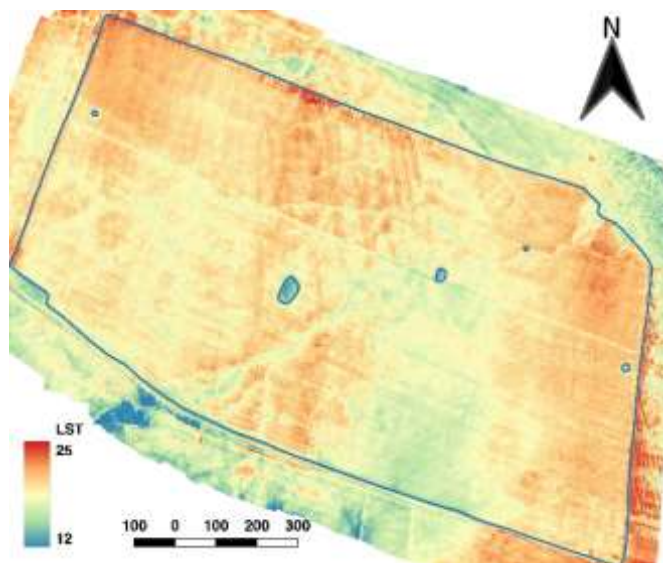


Рис. 5. Изображение LST тестового поля посева яровой пшеницы в 13:30 (Красноярск 22/06/23г.).

Площадь поля составляет 124 га. На момент съемки БПЛА проходила фаза кушения. На поле происходит деградация из-за водной эрозии, из-за чего начинают образовываться промоины, проходящие через все поле. На поле отмечены окружностями несколько участков (колок) в виде отдельных деревьев или группы деревьев и кустарников.

Интервал радиационной температуры (LST) варьируется от 12°C до 25°C. На возвышенностях температура достигает максимальных значений и составляет в среднем около 21°C, в понижениях и промоинах – 16°C, в области колок – 12°C. Наличие растительности на поверхности почвы служит сдерживающим фактором уменьшения температуры деятельного слоя. Присутствие растений и величина их проективного покрытия являются определяющими в формировании температурных условий почвенного покрова. Рост и развитие растительного покрова, его высоты и сомкнутости изменяют условия температурного режима в приповерхностном слое почвенного покрова.

Применение дистанционных методов аэроспектрофотометрии поверхности сельскохозяйственных посевов с использованием данных беспилотных технических и программно-информационных средств в совокупности с измерениями метеорологических параметров «in situ» позволяет:

- оценивать изменения продуктивности сельхоз посевов, обусловленные ситуациями, вызванными локальными аномальными погодными условиями;
- определять пространственно-временные границы проявления мелкомасштабных агроклиматических флуктуаций по температуре и влажности воздуха, атмосферному давлению и силе ветра на уровне шероховатости земной поверхности;
- оценивать пространственные и временные масштабы границ применимости исходных данных, когда существуют так называемые функциональные разрывы при анализе и обработке данных, полученных при помощи разных аппаратных средств ДЗЗ.

Заключение. Результатом анализа динамики микроклиматических условий и данных по морфологическим характеристикам растений с оценкой содержания хлорофилла листьев, а также совмещение этих параметров со спектрофотометрическими данными БПЛА, дают возможность комплексного решения биофизических задач по реализации новых методов и подходов для моделирования процессов функционирования экологических систем.

Планируется обработка и анализ полученных данных по усредненным значениям температуры воздуха и влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра с применением методов математической статистики для оценки пространственно-временных масштабов влияния изменчивости погодных условий на хлорофилльный потенциал сельскохозяйственных культур по тестовым участкам, засеянным пшеницей, ячменем и овсом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Mulla D.J.* Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // *Biosystems engineering*. 2013. No. 114. P. 358-371.
- [2] *Yang S., Yang X., Mo J.* The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China // *Precision Agriculture*. 2018. No. 19. P. 278-292.
- [3] *Mogili U.R., Deepak B.* Review on application of drone systems in precision agriculture // *Procedia Computer Science*. 2018. No. 133. P. 502-509.
- [4] *Емельянов Д.В., Ботвич И.Ю., Ивченко В.К., Шевырнов А.П.* Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 15. № 3. С. 308-317.
- [5] *Lebedeva M.G., Lupo A.R., Chendev Y.G., Krymskaya O.V., Solovyev A.B.* Changes in the Atmospheric Circulation Conditions and Regional Climatic Characteristics in Two Remote Regions Since the Mid-20th Century // *Atmosphere*. 2019. 10. 11. DOI:10.3390/atmos10010011.
- [6] *Kartushinsky A.* Climatic Atmospheric Heat and Moisture Fluxes of Eurasia Due to Ocean Climate Processes // *E3S Web of Conferences*. 2021. 333. 02003. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/109/e3sconf_rpers2021_02003.pdf

МОНИТОРИНГ И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕХНОГЕННО-НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Колесников А.А.^{1,2}, Косарев Н.С.^{1,2}

¹ Института горного дела СО РАН, Новосибирск

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

В работе рассматривается методика и возможности технических решений (в виде модулей геоинформационных систем и сетевых сервисов) комплексного геоэкологического мониторинга и анализа техногенно-нарушенных территорий, позволяющие оперативно изучать процесс негативного влияния горнодобывающих объектов на окружающую среду с использованием открытых и высокоточных геопространственных данных, технологий машинного обучения.

Ключевые слова: техногенно-нарушенные территории, мониторинг, открытые пространственные данные, ГИС, машинное обучение.

MONITORING AND ANALYSIS OF CHANGES IN TECHNOGENOUSLY DISTURBED TERRITORIES

Kolesnikov A.A.^{1,2}, Kosarev N.S.^{1,2}

¹ Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

The thesis considers the methodology and possibilities of technical solutions (in the form of modules of geoinformation systems and network services) for integrated geoecological monitoring and analysis of technogenically disturbed territories, which make it possible to quickly study the process of the negative impact of mining facilities on the environment using open and high-precision geospatial data, machine learning technologies.

Keywords: technogenically disturbed territories, monitoring, open spatial data, GIS, machine learning.

Введение. Для мирового сообщества характерно постоянное нарастание количества извлекаемых из недр и потребляемых ноосферой жидких, газообразных и твёрдых полезных ископаемых. При добыче последних максимально широко используются открытые горные работы, которые по сравнению с подземными и комбинированными способами обеспечивают более высокие технико-экономические показатели для инвесторов и горных предприятий. Одновременно с этим открытые геотехнологии оказывают, как правило, более значимое негативное воздействие на окружающую природную среду вследствие объёмных техногенных нагрузок. В процессе подготовки и освоения месторождений большие площади земель, имеющих различное назначение, ценность и пригодность к восстановлению, выводятся из хозяйственного оборота на длительные сроки, часть из них даже после технической и биологической рекультивации теряет свои первоначальные свойства, а часть деградирует полностью. Тенденция вовлечения в оборот территорий со всё более сложными природно-климатическими и горно-геологическими условиями освоения месторождений приводит к удорожанию большинства технологических и бизнес-процессов, снижению эффективности извлечения минерального сырья из недр, появлению дополнительных высоких экологических рисков. Для обогащения, переработки и складирования сырья, получаемых при этом отходов различной опасности также задействуются большие территории. К сожалению, примеры успешного возврата в оборот земель, нарушенных в результате техногенного воздействия различными технологиями и вызываемыми при этом процессами саморазрушения и деградации служат исключением из правил [1].

Методы и материалы. В рамках построения математических моделей оценки состояния и прогнозирования влияния техногенно-измененных территорий на окружающую среду учи-

тываются стратегии и тактики рационального природопользования на различных уровнях планирования и управления, использование ресурсосберегающих экологически сбалансированных и конкурентоспособных технологий, комплексная эколого-технологическая оценка локальных территорий и объектов накопленного техногенного экологического ущерба добывающих и перерабатывающих предприятий [2, 3]. К антропогенным факторам, вызывающим экологические риски, отнесем нарушение целостности геологической среды в результате хозяйственной деятельности; загрязнение воздушного бассейна; загрязнение поверхностных и воздушных вод; физическое нарушение почвенного покрова (распашка, мелиоративные работы); химическое загрязнение почв и грунтов; шум и вибрация; визуальное загрязнение и т.д. [4, 5].

Мониторинг состояния окружающей среды предусматривает постоянное наблюдение за процессами, происходящими в природе и техносфере, с целью предвидения изменений их качества, ухудшения среды обитания человека, деградации биосферы: наблюдения за источниками и факторами антропогенного воздействия, абиотической составляющей биосферы и ответной реакцией экосистем на эти изменения [6]. Он позволит обнаружить источники влияния на компоненты окружающей среды, отследить воздействия антропогенного фактора, исследовать зоны, где выявлено загрязнение и др [7, 8]. Независимо от особенностей объекта наблюдения, процесс мониторинга будет включать в себя четыре основных этапа:

- 1) наблюдение за объектом мониторинга;
- 2) оценку фактического состояния объекта мониторинга;
- 3) прогноз возможных изменений состояния объекта мониторинга;
- 4) оценку прогнозного состояния объекта.

Мониторинг по факторам и объектам воздействия – мониторинг различных загрязнителей (ингредиентный); мониторинг в различных средах (приземный слой атмосферы, верхняя атмосфера, литосфера, почва, воды суши, воды морей и океанов); мониторинг источников загрязнения (точечные источники – промышленные предприятия, точечные передвижные – транспорт, площадные – поля, города и т.п.); мониторинг объектов воздействия (живые организмы – популяции животных, человек и т.п., неживые объекты - здания, сооружения и т.п.) [9-11].

Результаты. Методика состоит из этапов получения открытых геопространственных данных, их обработки и расчета сводных показателей в виде базы данных для анализируемой территории, последующего анализа состояния и поиска изменений, а также прогнозирования влияния горно-добывающих объектов на окружающую среду (рисунок 1).

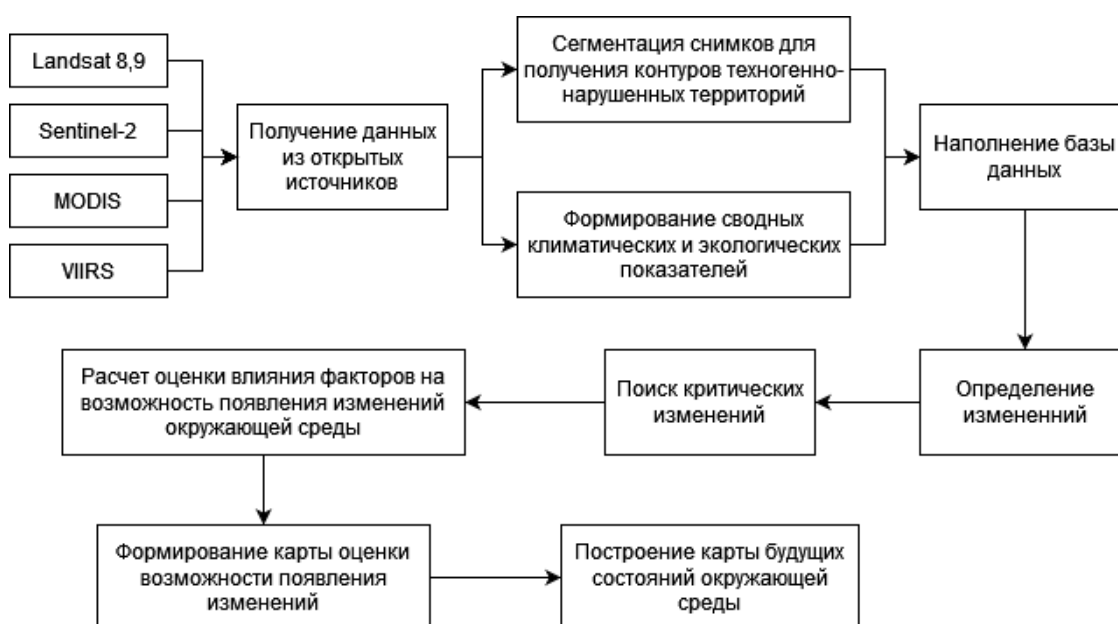


Рис. 1. Схема выполнения этапов методики мониторинга и анализа изменений техногенно-нарушенных территорий.

Для каждого года создавались обучающие выборки для двух классов земного покрова, подлежащих моделированию – участков техногенно-нарушенных территорий и прочих поверхностей, с последующей контролируемой классификацией с использованием случайного леса и нейронных сетей. Несколько вариантов используется при последующем ансамблировании итогового результата для повышения качества определения объектов. Метод случайного леса используется в реализации Scikit-learn. Две архитектуры глубокой нейронной сети для семантической сегментации базируются на U-Net [13]. Архитектура U-Net была выбрана в качестве базовой из-за ее эффективности в извлечении признаков и пространственных закономерностей из спутниковых данных даже в случае ограниченных обучающих данных [14]. В исследовании используются следующие два варианта:

- стандартная архитектура U-Net, которая использует операции свертки для извлечения пространственных характеристик из изображений в различных масштабах изображения. Начальные карты активации выделяют контекстную информацию и формируют тип и положение глобальных дескрипторов. Карты активации, полученные в разных масштабах, впоследствии объединяются с помощью коротких соединений для объединения прогнозов начального и более высокого уровня [15].
- Attention U-Net, которая интегрирует шлюзы внимания в стандартную архитектуру U-Net, чтобы выделить важные дескрипторы, которые передаются через короткие соединения. Это важно, поскольку фрагменты информации, извлеченные из нижних уровней, используются на уровне шлюзов внимания для усиления неважных и зашумленных функций в коротких соединениях [16].

Обе модели были созданы с использованием библиотеки Keras и TensorFlow. Все модели были обучены в течение 50 эпох с использованием размера пакета в 32 единицы. Для каждого сверточного слоя были добавлены операции заполнения, чтобы гарантировать, что размер последнего слоя остается сопоставимым с входным слоем, за которым следует функция нелинейности ReLU. Функции в сверточных слоях были нормализованы с использованием пакетной нормализации с последующим коэффициентом отсева регуляризации, равным 0,1. Все модели были оптимизированы с использованием оптимизатора Adam. Функция потерь представляет собой сумму мультиклассовых категориальных Focal Loss и Dice Loss после слоя softmax и бинарной метки, аналогичной классу техногенно-нарушенных земель для каждого пикселя блока изображения.

Используемые открытые мультиспектральные спутниковые данные MODIS и VIIRS с возможностью извлечения температур, влажности, параметров ветра на исследуемой поверхности по всей площади в свою очередь, может служить элементами мониторинга на каждом этапе технологического процесса горного производства с возможностью автоматизации определения критических значений показателей и моделирования состояния.

На втором этапе выполняются статистические проверки, которые позволяют динамически оценивать поступающие данные на их качество, достоверность и выполнять поиск критических значений. Оценка достоверности данных выполняется на основе проверок на пропуски, теста Граббса (Grubbs') на наличие выбросов и теста Манна-Кендалла на наличие тренда. Оценка достоверности спутниковых снимков выполняется на основе каналов оценки качества (QA), позволяющие получить сведения о параметрах получения данных.

Третий этап, состоит в определении потенциальных изменений техногенно-нарушенной территории и отгружающей среды посредством моделирования ситуации на следующие несколько лет с использованием методов машинного обучения.

После формирования базы данных изменений техногенно-нарушенных территорий возможно спрогнозировать будущее состояние окружающей среды. Рабочий процесс представляет собой прямое прохождение через шесть подэтапов:

- определение участков, подвергшихся изменениям и расчет вероятности изменения;
- оценка влияния каждого фактора на возможность появления изменений;
- переклассификация территории с учетом полученных весов;

- объединение карты начальных весов и начальных состояний в карту оценки возможности появления изменений на основе вероятностей и искусственной нейронной сети для вычисления карт потенциальных переходов;
- построение карты будущих состояний окружающей среды с использованием клеточных автоматов на основе метода Монте-Карло;
- оценка качества полученного результата.

После формирования прогнозных карт техногенно-нарушенных территорий для разных временных периодов возможен расчет корреляция между переменными с последующим расчетом вероятностей перехода и картой изменения окружающей среды.

Разработанная методика может быть использована для прогнозирования геоэкологических рисков, последствий и ситуаций и их идентификация в горнопромышленных регионах и выдаче рекомендаций по сокращению негативных ситуаций. Разработанные в рамках исследования технические решения представлены в репозитории по ссылке <https://github.com/AlexeyKW/TechTerr>.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-10057) и гранта НСО № р-60.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кожиев Х.Х., Босиков И.И., Дряев А.М.* Комплексная оценка и учет требований для проведения рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами на Михайловском месторождении (КМА) // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7, № 1(27). С. 26-32. DOI:10.25744/genb.2022.34.76.003.
- [2] *Idrizi B., Maliqi E., Pashova L.* Spatial database designing for environmental monitoring and decision making in Mitrovica Region, The Republic of Kosovo // Geosfera Indonesia. 2021. Т. 6. №. 2. С. 189-204.
- [3] *Бардина Т.В., Чузунова М.В., Кулибаба В.В., Бардина В.И.* Использование методов биотестирования для оценки экологического состояния почвогрунтов рекультивированного карьера // Биосфера. 2020. Т. 12, № 1-2. С. 1-11. DOI:10.24855/BIOSFERA.V12I1.539.
- [4] *Ивлиева М.С.* Оценка техногенного воздействия при разработке карьера с помощью безмерных экологических индексов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 547-550. DOI:10.24412/2071-6168-2023-3-547-551.
- [5] *Курбатова И.Е.* Изучение антропогенной нарушенности природной среды северо-восточного побережья Каспия с помощью космической информации // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 4-5. С. 487-491.
- [6] *Герасимова Е.М., Воробьева О.Н.* Открытая разработка железорудного карьера и его влияние на окружающую среду // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы Международной научной конференции, Майский, 14-15 марта 2023 года. Том 1. Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. С. 257-258.
- [7] *Иванов А.В., Смирнов Ю.Д.* Оценка влияния работы карьера на окружающую среду и способы предупреждения распространения основных загрязнений // Антропогенная трансформация природной среды. 2012. № 1. С. 207-211.
- [8] *Худойбердиев Ф.Ш.* Изучение полигонов бытовых отходов и влияния их на окружающую среду, методика зарубежного опыта // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2022. № 8. С. 547-551. DOI:10.33920/sel-04-2208-07.
- [9] *Гусев А.П., Калейчик П.А., Шаврин И.А.* Геоэкологическая диагностика загрязнения окружающей среды в зоне влияния полигона химических отходов // Российский журнал прикладной экологии. 2019. № 3(19). С. 51-55.
- [10] *Masolele R.N., Sy V., Marcos D., Verbesselt J., Gieseke F., Mulatu K.A., Moges Y., Sebrala H., Martius C., Herold M.* Using high-resolution imagery and deep learning to classify land-use following deforestation: a case study in Ethiopia // GIScience & Remote Sensing. 2022. 59:1. С. 1446-1472. DOI:10.1080/15481603.2022.2115619.
- [11] *Brovelli M.A., Sun Y., Yordanov V.* Monitoring Forest Change in the Amazon Using Multi-Temporal Remote Sensing Data and Machine Learning Classification on Google Earth Engine // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020. №9. С. 580. DOI:10.3390/ijgi9100580.

- [12] *Cook M., Schott J.R., Mandel J., Raqueno N.* Development of an Operational Calibration Methodology for the Landsat Thermal Data Archive and Initial Testing of the Atmospheric Compensation Component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the Archive // *Remote Sensing*. 2014. № 6(11). P. 11244-11266.
- [13] *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // *Lecture Notes in Computer Science. Miccai 2015*. T. 9351. C. 234-241.
- [14] *Zhao F., Sun R., Zhong L., Meng R., Huang C., Zeng X., Wang Z.* Monthly Mapping of Forest Harvesting Using Dense Time Series Sentinel-1 SAR Imagery and Deep Learning // *Remote Sensing of Environment*. 2022. 269:112822. DOI:10.1016/j.rse.2021.112822.
- [15] *Descals A., Wich S., Meijaard E., Gaveau D.L.A., Peedell S., Szantoi Z.* High-resolution Global Map of Smallholder and Industrial closed-canopy Oil Palm Plantations // *Earth System Science Data*. 2021. 269. P. 1211-1231. DOI:10.1016/j.rse.2021.112829.
- [16] *Schlemper J., Oktay O., Schaap M., Heinrich M., Kainz B., Glocker B., Rueckert D.* Attention Gated Networks: Learning to Leverage Salient Regions in Medical Images // *Medical Image Analysis*. 2019. 53(53). P. 197-207. DOI:10.1016/j.media.2019.01.012.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА КРАСНОЯРСКА ПО СРЕДНЕМЕСЯЧНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ $PM_{2.5}$

Краснощечков К.В.¹, Якубайлик О.Э.²

¹ Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В работе описывается алгоритм построения пространственного распределения среднемесячных значений $PM_{2.5}$ с использованием информации об аэрозольной оптической толщине, полученной по спутниковым данным. С использованием пространственных данных можно оценить влияние крупных городов, таких как Красноярск, на качество воздуха для окрестных территорий.

Ключевые слова: Красноярск, $PM_{2.5}$ загрязнение воздуха.

AIR QUALITY ASSESSMENT OF KRASNOYARSK BY AVERAGE $PM_{2.5}$ VALUES

Krasnoshchekov K.V.¹, Yakubailik O.E.²

¹ Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

In the paper on the construction of an algorithm for determining the distribution of monthly average $PM_{2.5}$ values using information on aerosol optical density obtained from satellite data. Using such data, it is possible to estimate the scale of large cities, such as Krasnoyarsk, on the air quality for the surrounding fields.

Keywords: Krasnoyarsk, $PM_{2.5}$ air pollution.

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

Район исследования. Красноярск имеет население более одного миллиона и активно развивается. Город расположен вдоль обоих берегов реки Енисей на протяжении 20-25 км и имеет площадь около 350 км². Красноярск с юга и запада окружают леса и холмистая местность, с северной и восточной части города рельеф преимущественно равнинный. Эти особенности рельефа, формирующие экологическую среду города, определяют циркуляцию воздушных масс и низкую рассеивающую способность атмосферы, что приводит к накоплению загрязнителей в городе и пригородной зоне.

На величину загрязнения атмосферного воздуха в городе влияют многочисленные факторы, такие как пространственная застройка города, временная динамика загрязняющих выбросов и метеорологические условия. Наиболее высокие значения загрязнения в Красноярске фиксируются при малой скорости ветра (до 3-4 м/с). При увеличении скорости ветра, уровень загрязнения уменьшается.

Исходные данные. Для получения информации о загрязнении атмосферы методом ДЗЗ в работе использовался параметр Аэрозольная оптическая толщина (AOD), который чаще всего используется в качестве основы для оценки $PM_{2.5}$ [6]. Этот параметр пропорционален количеству частиц в воздухе и, зависит от их массовой концентрации. Данный параметр

предоставляет продукт MCD19A2. Он имеет пространственное разрешение в 1 км^2 и содержит в себе ежедневные значения аэрозольной оптической толщины.

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

Данные продукта MCD19A2 предоставляются для всей площади Земли, однако с целью минимизации веса конечного файла вся территория планеты разбита на гранулы размером 1200 км^2 (всего 476 ячеек). Территория Красноярска находится в ячейке с номером h23v03.

Для пересчёта данных AOD в $\text{PM}_{2.5}$ дополнительно использовались метеорологические данные из набора модели Global Forecast System (GFS) [7]. Пространственное разрешение модели составляет $0,25$ на $0,25$ градуса, что для Красноярска приблизительно соответствует 625 км^2 . На рисунке 1 показана территория Красноярска с областью ячеек модели GFS, обозначенных красным цветом.

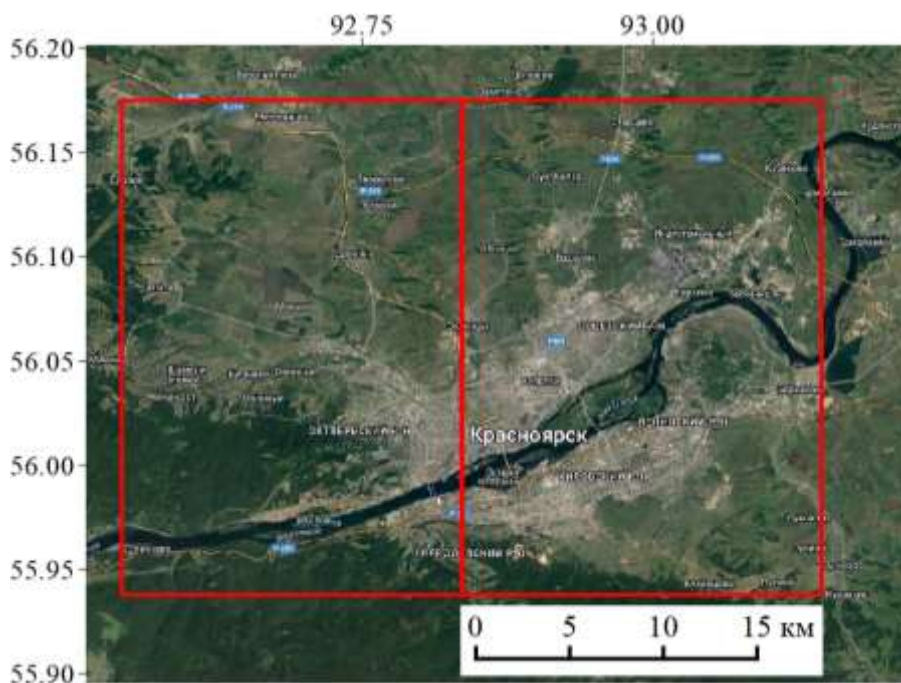


Рис. 1. Район исследования. Красным выделены две используемые ячейки модели GFS.

В данной работе использовались данные о высоте пограничного слоя атмосферы (PBLH) и относительной влажности воздуха на приземном уровне (RH) по данным модели GFS на всю площадь ячейки данных h23v03. Это позволяет охватить большую площадь, что способствует более обширному анализу влияние города на окрестные территории, а также позволяет оценить влияние природных факторов, таких как пожары, на экологическую обстановку в городе.

Верификация спутниковых данных. В работах [8, 9] показано, что рассчитанные данные по концентрациям $\text{PM}_{2.5}$ с использованием спутниковой информацией имеют высокую корреляцию с данными наземного мониторинга. В приведённых выше работах концентрация $\text{PM}_{2.5}$ рассчитывалась по формуле (1)

$$\text{PM}_{2.5} = \frac{\text{AOD}}{\frac{\text{PBLH}}{K \frac{1-\text{RH}}{1-\text{RH}_0} - \gamma}} \quad (1)$$

где AOD – значения аэрозольной оптической толщины, полученной по данным продукта MCD19A2, PBLH – величина пограничного слоя атмосферы, RH – относительная влажность воздуха, RH_0 – среднее значение влажности воздуха, для исследуемой области, коэффициенты K и γ отвечают за свойства аэрозоля, характерных для данной территории.

Пространственное распределение $PM_{2.5}$. Для расчёта данных о пространственном распределении концентраций $PM_{2.5}$ над Красноярском использовались данные спутникового мониторинга совместно со значениями, взятыми из модели GFS. Расчёт значений концентраций $PM_{2.5}$ за одни сутки по формуле (1) показан на рисунке 2.

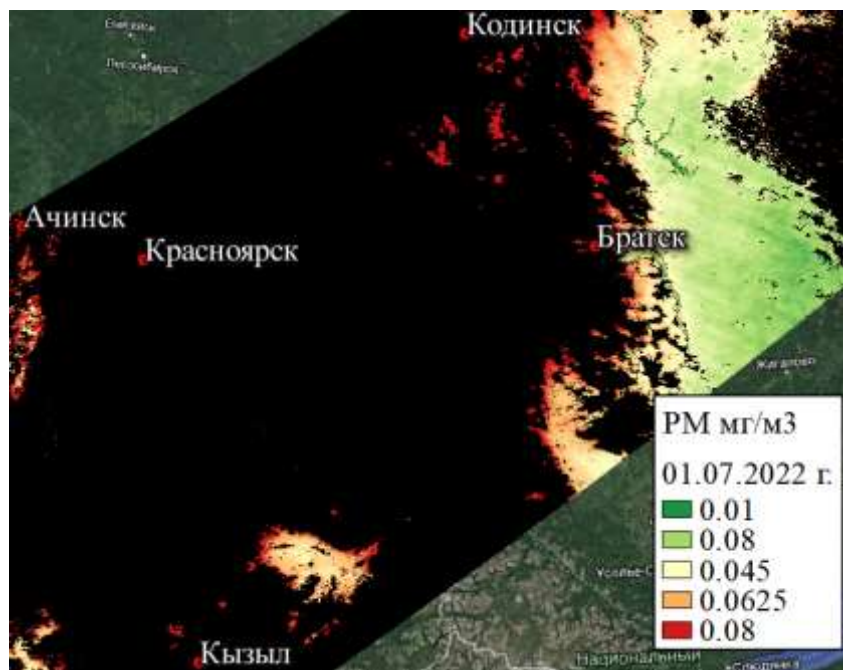


Рис. 2. Концентрация $PM_{2.5}$ для гранулы h23v03 за 1 июля 2022 г.

Из-за облачности, а также дымовых шлейфов от лесных пожаров, большая часть данных отсутствует. Так же по краям областей с низким и умеренным загрязнением, которым соответствует зелёный и жёлтый цвет, наблюдаются значения с повышенной концентрацией $PM_{2.5}$. Для устранения большого количества пропущенных значений ежедневные данные усреднялись с интервалом в 1 месяц. В результате были получены среднемесячные значения концентрации $PM_{2.5}$. Повышенные показатели концентрации $PM_{2.5}$ по краям областей с низким и умеренным загрязнением связано с тем, что продукт MCD19A2 над поверхностями с высоким коэффициентом отражательной способности может некорректно рассчитывать значения AOD, увеличивая их [10].

Усреднение данных за один месяц устраняет большое количество пропущенных данных. Но остается проблема с ошибочными, повышенными значениями, которая при усреднении данных не пропадает. Для их устранения был использован метод с применением стандартного отклонения. Данный подход заключается в определении максимального и минимального значения, за пределами которых значения считаются некорректными. На рисунке 3 показана гистограмма распределения значений $PM_{2.5}$ за июль 2022 г. Среднее значение равняется $M=0,0194$, среднеквадратичное отклонение $\sigma =0,006$. Синей рамкой ограничены используемые значения, остальные значения удаляются.

После удаления значений, превосходящих величину $M+2\sigma$ была проведена интерполяция. В результате описанных выше преобразований получается распределение среднемесячных значений $PM_{2.5}$ на территорию всей ячейки h23v03, рисунок 4.

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

На рисунке 5а видно, как повышенные концентрации внутри территории города переносятся на восток от города, влияя на экологическую обстановку таких крупных населённых пунктов как Березовка и Сосновоборск. Под б на рисунке 5 отображена обратная ситуация. Дым от крупных лесных пожаров на севере Красноярского края в августе 2020 года переносится воздушным потоком на территории городов, располагаемых южнее. Под дымовое загрязнение попали такие крупные города как Красноярск, Канск и Братск.

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

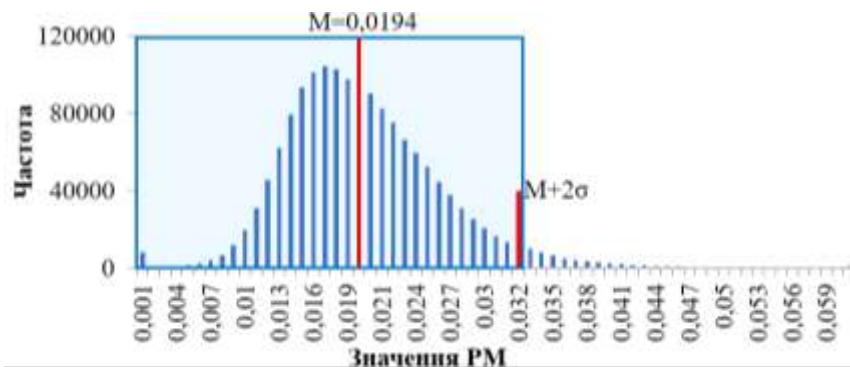


Рис. 3. Гистограмма распределения значений $PM_{2.5}$.

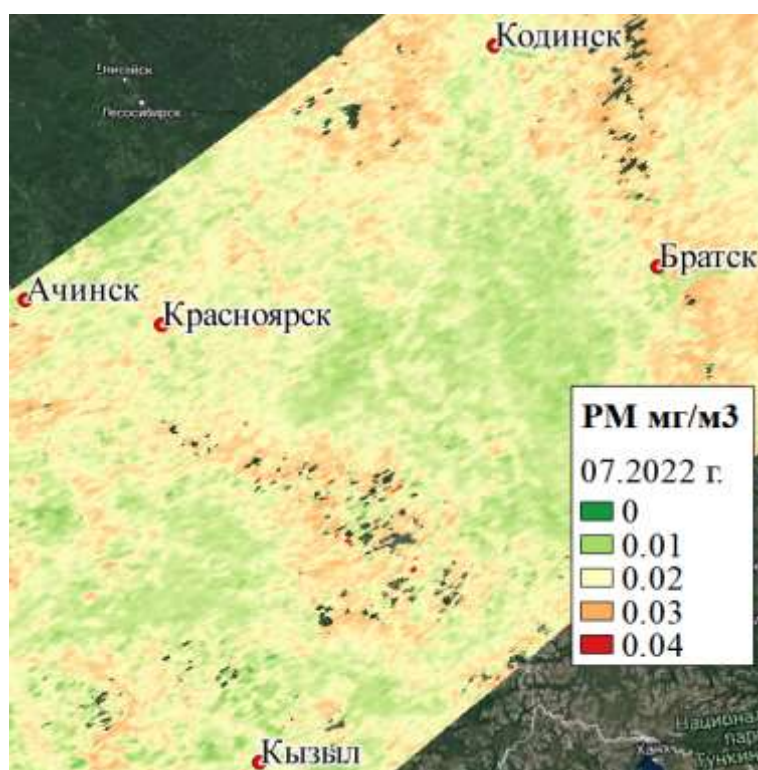


Рис. 4. Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за июль 2022 г.



Рис. 5. Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за разные периоды времени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Зарубин Г.П., Новиков Ю.В.* Гигиена города // Казанский медицинский журнал. М., Медицина. 1987. Т. 26, №2. С. 148-149.
- [2] *Brunekreef B., Holgate S.T.* Air pollution and health // The lancet. 2002. Т. 360. №. 9341. С. 1233-1242.
- [3] *Orru, H. et al.* Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences // Air quality, atmosphere & health. 2011. Т. 4. №. 3. С. 247-258.
- [4] *Zanobetti A. et al.* Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions // Environmental Health. 2009. Т. 8. №. 1. С. 1-12.
- [5] *Dominici F. et al.* Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases // Jama. 2006. Т. 295. №. 10. С. 1127-1134.
- [6] *Koelemeijer R.B.A., Homan C.D., Matthijsen J.* Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe // Atmospheric Environment. 2006. Т. 40. №. 27. С. 5304-5315.
- [7] The Global Forecast System (GFS) https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php (дата обращения 15.05.2023)
- [8] *Дергунов А.В., Краснощеков К.В., Якубайлик О.Э.* Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. №. 3. С. 84-94.
- [9] *Lin C. et al.* Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // Atmospheric Environment. 2020. Т. 227. С. 117410.
- [10] *Lyapustin A., Wang Y.* MODIS Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) data user's guide // NASA: Greenbelt, MD, USA. 2018. Т. 6. №. June. С. 1-19.

ДИНАМИКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА АГРАРНОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ MODIS

Красноярова Б.А., Назаренко А.Е., Плуталова Т.Г., Шарабарина С.Н.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

В работе проанализированы данные MODIS/TERRA (MOD17A2H V.6 и MOD17A3H V.6) за 2001-2022 гг. для территории Алтайского края за вегетационный период (май-сентябрь). Анализ NPP позволил выявить годы минимального и максимального накопления, ее зависимость от гидротермических условий; GPP – территориальные природообусловленные различия накопления углерода внутри вегетационного периода.

Ключевые слова: углерод, сельское хозяйство, первичная продукция, MODIS/TERRA.

DYNAMICS OF PRIMARY PRODUCTION FOR ASSESSMENT OF CARBON STOCKS IN AGRICULTURAL REGION ACCORDING TO MODIS DATA

Krasnoyarova B.A., Nazarenko A.E., Plutalova T.G., Sharabarina S.N.

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul

The paper analyzes MODIS/TERRA data (MOD17A2H V.6 and MOD17A3H V.6) for 2001-2022 years on the territory of the Altai Territory for the growing season (May-September). By NPP analyzing, it was possible to identify the years of minimum and maximum accumulation, its dependence on hydrothermal conditions; GPP territorial natural differences in carbon accumulation within the growing season.

Keywords: carbon, agriculture, primary production, MODIS/TERRA.

Введение. Изучение современных механизмов изменения климата является одним из ключевых условий обеспечения устойчивого социально-экономического развития. С 2000-х годов началось детальное изучение влияния землепользования в глобальном масштабе на взаимодействие подстилающей поверхности и атмосферы в отношении потоков парниковых газов и энергии [1, 2]. Вклад землепользования (по определению Межправительственной группы экспертов по изменению климата) в глобальную эмиссию парниковых газов существенен 23%, из них: 13% выбросов CO₂, 44% CH₄ и 81% N₂O за период 2007-2016 гг. [2]. Одновременно землепользование является и мощным поглотителем CO₂: глобальные модели оценивают его углероддепонирующую способность в 11,2 +/- 2,6 ГтCO₂/год из атмосферы в течение этих лет. Изучение составляющих углеродного баланса при разных видах землепользования и возможностей его регулирования с помощью пространственной структуры сельскохозяйственного землепользования является актуальной научной задачей в рамках глобальной проблемы увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и развития концепции углеродной нейтральности. Существуют различные системы оценки запасов и потоков углерода: ИЗИС ПАСА, РОБУЛ, глобальные модели динамики растительности (DGVM), углеродные калькуляторы и др. В их основе лежит два метода, поступлений-потерь и разности запасов, основанных на балансе первичной продуктивности экосистемы.

В упрощенном виде динамика потоков углерода над растительными сообществами может быть описана следующим образом:

$$\Delta C(Fa) = \Delta R_m - \Delta(NPP),$$

где $\Delta C(Fa)$ – поток CO₂ над растительным покровом; R_m – выделение CO₂ в результате жизнедеятельности почвенных и наземных сапротрофов (преимущественно бактерий и грибов), разлагающих гумус, лесную подстилку и скелетный детрит; NPP – чистая первичная продукция биогеоценоза (надземная + корневая) [3].

Таким образом, для оценки углеродного баланса, помимо динамики NPP, необходимо определить объемы эмиссии углерода из почвы, связанной с разложением растительных остат-

ков. В зависимости от климатических условий и особенностей круговорота углерода в различных сообществах (лугово-степных, лесостепных, лесных, болотных и др.) интенсивность разложения органического вещества в почвах различается. Для оценки интенсивности разложения применяются различные регрессионные модели и другие методы [4].

Одним из способов оценки динамики такого баланса может быть дистанционный подход. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в этом случае используются для выделения полигонов или классификации пикселей цифровой карты, а расчет запасов углерода проводится по ассоциированным типовым значениям либо моделям [5, 6]. Большинство работ с использованием данных ДЗЗ направлено на изучение углеродного баланса в лесных и болотных экосистемах, в последние годы появляются исследования, посвященные моделированию запасов углерода на землях сельскохозяйственного назначения [7- 9].

Обсуждение результатов. Объектом исследования являются агроэкосистемы Алтайского края – одного из ведущих аграрных регионов России, который занимает лидирующую позицию среди субъектов Сибирского Федерального округа по производству зерна, сахарной свеклы, подсолнечника, льна-долгунца и масличного, хмеля, рапса и сои. Анализ проводится в разрезе административных и природных границ. Первые необходимы для разработки адресных рекомендаций хозяйствующим субъектам муниципальных образований, вторые – природные условия, в первую очередь климат и рельеф, продолжают оказывать существенное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур, несмотря на активное управление человеком.

В сельском хозяйстве особое значение имеет сочетание благоприятной температуры воздуха и наличия достаточного количества осадков. Оценка гидротермических условий за каждый месяц вегетационного периода проводилась с помощью гидротермического коэффициента (ГТК) Г.Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = \Sigma R / 0,1 \cdot \Sigma T,$$

где ΣR – сумма осадков за период с температурой выше 10 °С, мм; ΣT – сумма температур воздуха за период с температурой выше 10 °С.

ГТК Селянинова был рассчитан для шести метеорологических станций (МС) исследуемого региона, расположенных в разных ландшафтных провинциях (рис.1). Максимальные значения коэффициента отмечены для МС Бийск расположенной на юго-востоке Верхне-Обской провинции лесостепной зональной области, минимальные – Славгород (Кулундинская провинция степной зональной области) и Камень-на-Оби (север Верхне-Обской провинции). При этом отмечены годы с неблагоприятными гидротермическими условиями на всех метеостанциях – 2006, 2008, 2010 и 2012.

Основным методом исследования является анализ данных дистанционного зондирования Земли спутника MODIS/TERRA (НАСА, США).

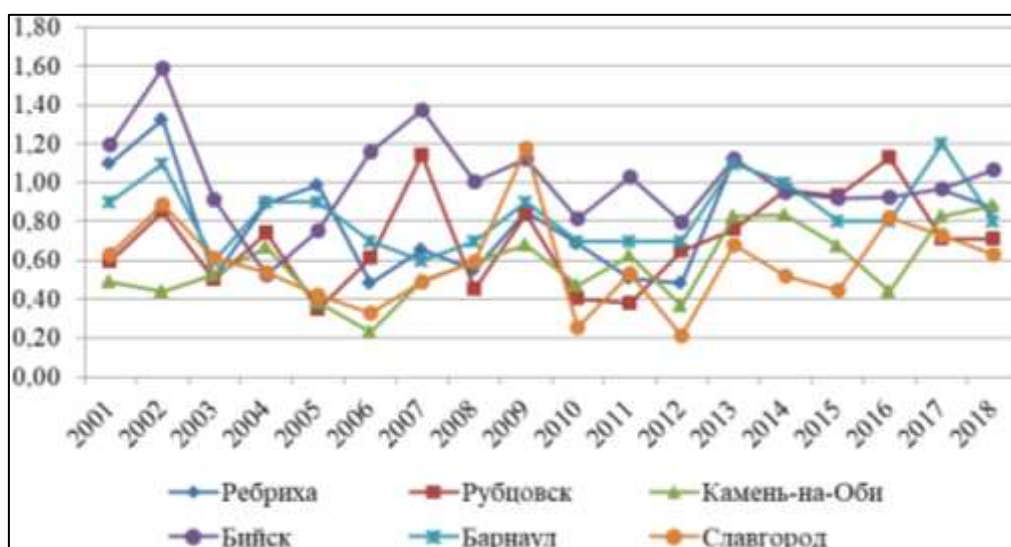


Рис. 1. Многолетний ход ГТК по метеорологическим станциям Алтайского края за 2001-2018 гг.

Непрерывный временной и территориальный ряд данных годовой чистой первичной продукции (NPP) и ее динамики обеспечивается снимками MOD17A3HGF V.6 (разрешение 500 м) за 2001-2022 гг. [10, 11]. Ход значений NPP имеет неравномерный характер и зависит от погодных условий в конкретный временной отрезок, так как минимумы соответствуют самым засушливым годам в Алтайском крае (рис. 2). При этом отмечается значительный положительный тренд в накоплениях первичной продукции от 4100 до 4600 кг/С/м²/г.

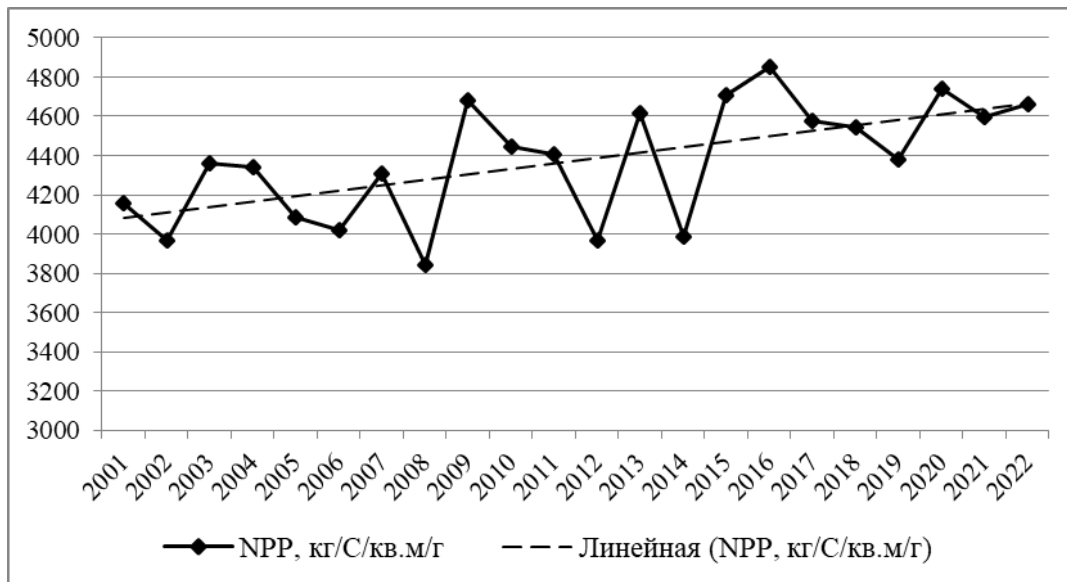


Рис. 2. Многолетний ход годовой чистой первичной продукции за 2001-2022 гг.

На рисунке 3а представлены места наибольшего накопления NPP (среднее 119 кг/С/м²/г) за исследуемый период. Основной прирост углерода пришелся на первую половину исследуемого периода – 222 кг/С/м²/г (рис. 3б). Наименьший во вторую – 103 кг/С/м²/г (рис. 3в). Стоит отметить, что основными местами производства С в Алтайском крае являются не лесные экосистемы, а степные. Особенно это проявилось в 2001-2011 гг. места накопления – степные и лесостепные зональные области.

Продукт MOD17A2H V.6 (кумулятивная 8-дневная совокупность значений валовой первичной продукции (GPP) с размером пикселя 500 м) позволяет отследить динамику накоплений за вегетационный период (май-сентябрь) и выявить сезонные изменения.

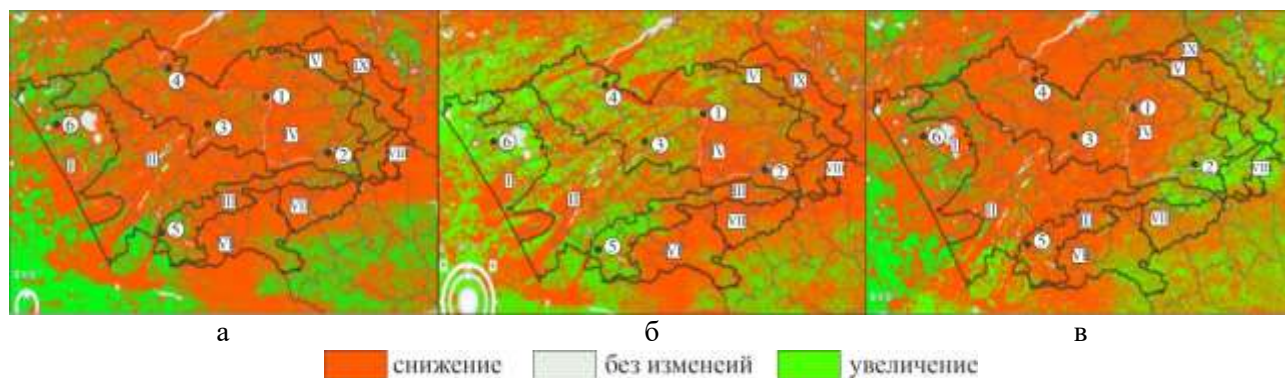


Рис. 3. Межгодовые изменения в накоплении годовой чистой первичной продукции за 2001-2022 (а), 2001-2011 (б), 2011-2021 (в) годы в ландшафтных границах [12]. Степная зональная область: I. Кулундинская, II. Южно-Приалейская и III. Предалтайская провинции. Лесостепная зональная область: IV Верхне-Обская и V. Предсалаирская провинции. Алтайская горная область: VI. Северо-Западная Алтайская, VII. Северо-Алтайская и VIII. Северо-Восточная Алтайская провинции. Салаиро-Кузнецкая-Алатауская горная область: IX. Салаирская провинция. Метеорологические станции: 1. Барнаул, 2. Бийск, 3. Ребриха, 4. Камень-на-Оби, 5. Рубцовск, 6. Славгород.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IPCC 2000. Land Use, Land-use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, et al., editors. Cambridge University Press, 375 p.
- [2] IPCC 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page> (дата обращения 21.05.2022).
- [3] *Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоздат, 1988.
- [4] *Наумов А.В., Косых Н.П., Мироньчева-Токарева Н.П., Паршина Е.К.* Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал, 2007. Т. 14. №. 5. С. 771-779.
- [5] *Барталев С.А., Лукина Н.В.* Комплексное использование данных дистанционного зондирования из космоса и наземных измерений как основа национальной системы мониторинга бюджета углерода в лесах России // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 1. DOI:10.21046/19DZZconf-2021a.
- [6] Глобальные модели динамики растительности (DGVM). <http://carbon.cepl.rssi.ru/%d0%b3%d0%bb%d0%be%d0%b1%d0%b0%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%8b%d0%b5-%d0%bc%d0%be%d0%b4%d0%b5%d0%bb%d0%b8-%d0%b4%d0%b8%d0%bd%d0%b0%d0%bc%d0%b8%d0%ba%d0%b8-%d1%80%d0%b0%d1%81%d1%82%d0%b8%d1%82%d0%b5%d0%bb> (дата обращения: 14.04.2023).
- [7] *Барталев С.А., Ворушилов И.И., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Сайгин И.А., Стыценко Ф.В.* Оценка вклада древесно-кустарниковой растительности заброшенных сельскохозяйственных земель в бюджет углерода лесов России // Научные дебаты «Лесные климатические проекты в России». 19 октября, 2021. http://rbf-ras.ru/wp-content/uploads/2021/12/AD_20211019_Bartalev.pdf (дата обращения 06.06.2023).
- [8] *Xie X, Li A, Tan J, Jin H, Nan X, Zhang Z, Bian J, Lei G.* Assessments of gross primary productivity estimations with satellite data-driven models using eddy covariance observation sites over the northern hemisphere. Agricultural and Forest Meteorology. 2020. 280. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107771> (дата обращения 06.06.2023).
- [9] [9] *Meroni M, Fasbender D, Lopez-Lozano R, Migliavacca M.* Assimilation of Earth Observation Data Over Cropland and Grassland Sites into a Simple GPP Model. Remote Sensing. 749(11). DOI:10.3390/rs11070749.
- [10] MODIS Gross Primary Production (GPP)/Net Primary Production (NPP). <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod17.php> (дата обращения: 14.04.2023).
- [11] USGS Global Visualization Viewer. <http://glovis.usgs.gov> (дата обращения: 14.04.2023).
- [12] Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500000. Науч. рук. Ю.И. Винокуров. ИВЭП СО РАН, 2016.

ОРГАНИЗАЦИЯ КАТАЛОГА ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АГРАРНОГО МОНИТОРИНГА

Кузнецова А.С.¹, Пушкарев А.А.¹, Якубайлик О.Э.², Ерунова М.Г.¹

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В статье рассматриваются особенности организации, связанные с составлением структуры и разработкой содержания каталога данных информационной системы «АгроМониторинг». Охарактеризованы доступные в системе пространственные данные, включая данные дистанционного зондирования Земли и информационные продукты, полученные на их основе. Приведены возможности использования данных, входящих в систему аграрного мониторинга, для наблюдения за состоянием сельскохозяйственных угодий.

Ключевые слова: агромониторинг, геопропространственные данные, каталог данных, сельское хозяйство.

ORGANIZATION OF THE DATA CATALOG OF THE AGRICULTURAL MONITORING INFORMATION SYSTEM

Kuznetsova A.S.¹, Pushkarev A.A.¹, Yakubailik O.E.², Erunova M.G.¹

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The article discusses the features of the organization associated with the compilation of the structure and development of the content of the data catalog of the information system «AgroMonitoring». The spatial data available in the system, including remote sensing data of the Earth and information products obtained on their basis, are characterized. The possibilities of using the data included in the agricultural monitoring system to monitor the condition of agricultural land are presented.

Keywords: agromonitoring, geospatial data, data catalog, agriculture.

Введение. Цифровизация в агропромышленном комплексе (АПК) представляет собой процесс применения цифровых технологий и инновационных решений для развития и оптимизации сельскохозяйственного производства. Одним из направлений цифровизации в сельском хозяйстве является разработка специализированных информационных систем мониторинга сельскохозяйственных земель и их внедрение в сельскохозяйственное производство. При помощи таких систем осуществляется сбор данных о погоде, биофизических параметрах, а также о сельскохозяйственной растительности [1, 2] в автоматизированном режиме. Собранные данные могут быть использованы для планирования посевных работ, удаленного контроля технических операций (укос сенокосов, сбор урожая, подкормка), отслеживания состояния сельскохозяйственных посевов, прогнозирования урожайности и т.д. [3-6].

В числе ключевых элементов специализированных систем аграрного мониторинга, влияющих на эффективность их работы, находится каталог данных. Организация каталога данных должна быть удобной с точки зрения пользователя для того, чтобы они могли с легкостью находить интересующие данные и проводить их анализ. Классическим примером отечественной системы аграрного мониторинга является ВЕГА-PRO. Информационная система разработана Институтом космических исследований РАН и предназначена для работы с архивами спутниковых данных и другой геопропространственной информацией [7]. Для обеспечения доступности данных геоинформационное содержание системы распределено по нескольким разделам каталога данных: спутниковые данные; растительность; природные пожары; метеоданные; картография; анализ данных. К зарубежным системам, обеспечивающим сельскохозяйственный сектор, относятся система наблюдения Земли (EOS) Crop Monitoring и OneSoil. EOS Crop Monitoring создана EOS Data Analytics и представляет собой инструмент интеллектуального ведения сельского хозяйства на базе спутниковых данных. EOS Crop Monitoring имеет

простой и понятный интерфейс, позволяющий работать с различными типами данных (климатические характеристики, влажность почвы, индексы растительности и многие другие) в одном пространстве [8]. В каталоге данных системы EOS Crop Monitoring вся доступная информация распределена среди трех основных разделов: мониторинг, погода и зонирование. OneSoil – онлайн платформа швейцарской компании, состоящая из трех приложений. Система объединяет в себе цифровую аналитику, спутниковые и наземные данные для точного земледелия и растениеводства [9]. Каталог данных представлен следующими разделами: поля, севооборот, дифференцированное внесение, погода и данные с полей.

Каталоги данных приведенных в пример систем имеют разную структуру. Это связано с отсутствием единого стандарта как на мировом уровне, так и на уровне отдельных стран. При этом системы имеют схожее геоинформационное содержание, основанное на использовании спутниковых данных, вегетационных индексах и метеоданных. Такие данные отлично подходят для проведения аграрного мониторинга и решения сельскохозяйственных задач. Однако для комплексного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения важно учитывать особенности рельефа, почвенные характеристики, оперативные данные высокого пространственного разрешения, полученные при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и другие характеристики местности.

В данной работе рассматриваются особенности организации, связанные с составлением структуры и разработкой содержания каталога данных на примере информационной системы «АгроМониторинг», разрабатываемой в ФИЦ КНЦ СО РАН.

Материалы и методы. Система «АгроМониторинг» подготавливается для земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края. В первую очередь в систему вошли опытно-производственные хозяйства (ОПХ), которые относятся к ФИЦ КНЦ СО РАН («Михайловское», «Журагинское» и «Минино») и расположены в пределах Красноярского края.

Для разработки содержания каталога данных информационной системы «АгроМониторинг» подобраны текстовые и картографические материалы, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и компьютерных моделей, а также цифровая модель рельефа (ЦМР) глобального масштаба. Обеспечение системы данными высокого пространственного разрешения реализуется при помощи БПЛА.

В качестве текстовых и картографических материалов использованы результаты почвенных и агрохимических обследований ОПХ, а также сведения о выращиваемых культурах, их урожайности и севооборотах за разные года. Исходные материалы на бумажных носителях получены из архивов ОПХ.

Данные ДЗЗ представлены двумя спутниковыми группировками: Sentinel-2 и Landsat 8/9. Продукты Sentinel-2 имеют высокое пространственное разрешение 10 м с частотой получения снимков 1 раз в 5 дней. Космические снимки Landsat 8/9 с пространственным разрешением 30 метров распространяются 1 раз в 16 дней.

Помимо данных ДЗЗ выбраны компьютерные модели Global Forecast System (GFS) и NASA's Global Precipitation Measurement (GPM). Система численного прогнозирования погоды GFS запускается 4 раза в сутки и имеет пространственное разрешение 13 км. Международный проект по глобальному спутниковому мониторингу снежных и дождевых осадков GPM предоставляет доступ к глобальным картам осадков. В работе использовались ежедневные данные IMERG, имеющие пространственное разрешение $0,1 \times 0,1^\circ$.

ЦМР глобального масштаба представлена набором данных FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM). Набор данных разработан Бристольским университетом и доступен по всему миру с шагом сетки в 1 угловую секунду (приблизительно 30 м на экваторе). Это первая глобальная ЦМР, в которой удалены высоты деревьев и зданий [10].

Аэрофотосъемка на территории ОПХ проводилась при помощи камеры Sony RX1, установленной на борту Fixar 007. Пространственное разрешение полученных аэрофотоснимков – 4 см/пиксель с высоты 300 м. Для увеличения точности координат центров аэрофотоснимков совместно с Fixar 007 использованы геодезический приемник Emlid Reach M2, установленный на борту БПЛА, и ГНСС приёмник Emlid Reach RS2, стационарно расположенный на земле.

Исходные данные обработаны с использованием геоинформационных технологий в различных географических информационных системах (ГИС). Обработка ЦМР FABDEM, текстовых и картографических материалов проведена в ГИС QGIS с применением ряда технологий: векторизация бумажных материалов, актуализация цифровых карт и подготовка тематических карт [11]. Аэрофотоснимки, полученные при помощи БПЛА обработаны в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional [12]. Процедура обработки данных ДЗЗ и компьютерных моделей в ГИС QGIS состоит из нескольких этапов: перепроцирование; обрезка продуктов в соответствии с координатами исследуемой территории; применение алгебраических выражений для создания тематических карт. Перечисленные этапы преобразования данных Sentinel-2, Landsat 8/9, GFS и GPM (IMERG) выполнялись с помощью программ библиотеки GDAL, запуск которых для автоматизации осуществляется из командных файлов (bat-файлов) в пакетном режиме.

Результаты. Содержание каталога данных информационной системы «АгроМониторинг» состоит из информационных и технологических цифровых карт (рис. 1), разработанных на основе подобранных материалов и геоинформационных технологий. Все карты в процессе их формирования были приведены к единым параметрам и системе координат (WGS 84 / UTM zone 46N). Исходные слои преобразованы в форматы GeoTIFF и shape. Каждой цифровой карте подготовлена типовая легенда в едином стиле для гармоничного отображения в информационной системе аграрного мониторинга. На рисунке 1 в виде схемы представлены исходные материалы и разработанные по ним цифровые карты, формирующие содержание каталога данных. На схеме указаны названия и виды данных. Кроме этого, обозначено программное обеспечение, в котором была выполнена основная работа по составлению карт.

Каталог данных информационной системы «АгроМониторинг» имеет четырёхуровневую иерархическую структуру: вкладка – раздел – группа – карта. Возможность гибкой настройки сущностей каждого уровня позволяет выстраивать последовательность сущностей внутри каждого уровня, добавлять описание и изображения, ограничивать доступ определённому кругу пользователей. При авторизации у администратора системы появляются инструменты управления внутри самого каталога. Это позволяет настраивать внешний вид каталога, добавлять необходимые сущности в его состав и пополнять данными. В качестве базы данных используется MongoDB. Это NoSQL база данных, которая хранит сущности в формате JSON объектов.



Рис. 1. Геоинформационное содержание каталога данных системы «АгроМониторинг».

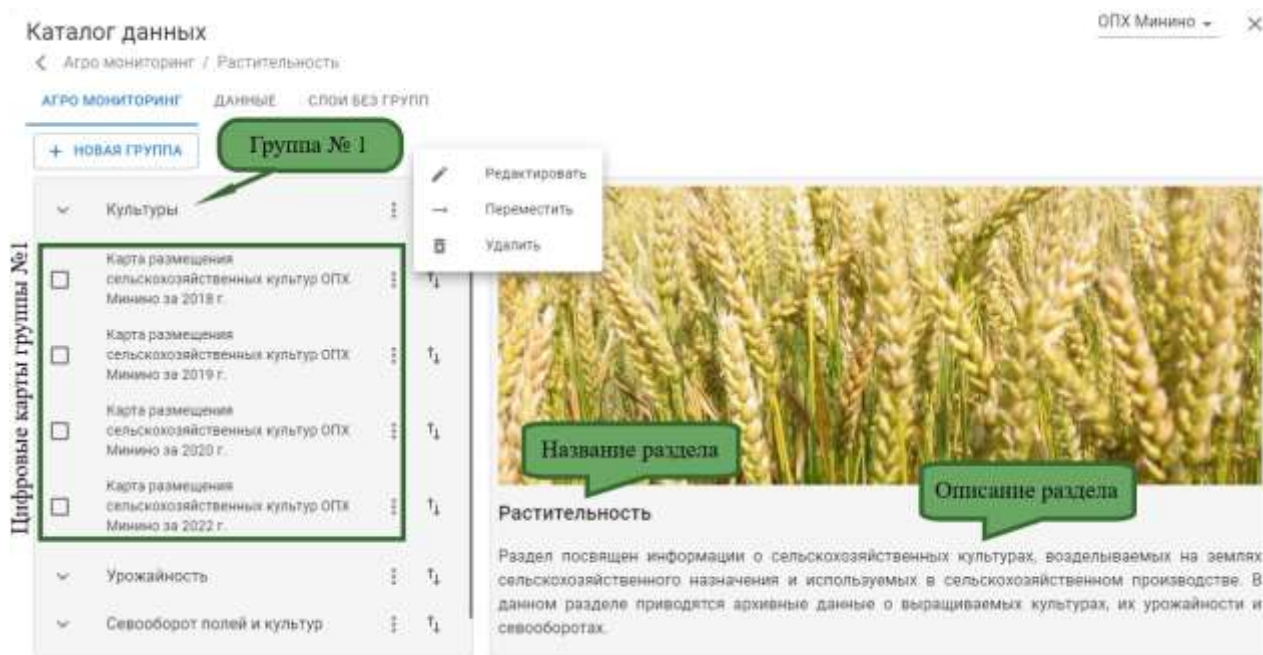


Рис. 2. Фрагмент каталога данных системы «АгроМониторинг».

На рисунке 2 приведен фрагмент каталога данных с разделом «Растительность» на территорию ОПХ «Минино». Пример фрагмента приведен с точки зрения администратора системы с доступными возможностями управления группами и цифровыми картами. Описание разделов, групп и карт подготовлено для пользователей, чтобы они могли ознакомиться с основными характеристиками и свойствами геопространственных данных. При составлении описания выдержано единообразие и структурированность текста.

В структуре каталога данных системы «АгроМониторинг» выделено 6 разделов по определенным тематикам. Подготовленные цифровые карты распределены по группам с учетом их назначения. Ниже приведено описание разделов и входящие в их состав группы:

1. «Растительность», раздел посвящен информации о сельскохозяйственных культурах, возделываемых на землях сельскохозяйственного назначения и используемых в сельскохозяйственном производстве. Раздел включает три группы: «Культуры»; «Урожайность»; «Севооборот полей и культур». Цифровые карты, входящие в состав данного раздела, позволяют отслеживать многолетнюю историю высеваемых сельскохозяйственных культур, их урожайность и севооборот в цифровом формате.
2. «Почва», раздел содержит основные агрономические свойства почв и поделен на две группы – «Агрехимия» и «Почвенные карты». К первой группе отнесена информация об агрохимических характеристиках почвы (по содержанию гумуса, подвижного фосфора, обменного калия и др.). Вторая группа включает сведения о характере распространения почв на территории хозяйства и их основные свойства. На основе почвенных карт и агрохимических картограмм проводятся работы по планированию видов землепользования, оценке экономической и экологической целесообразности использования территорий в рамках производства и разработке систем управления почвенным плодородием.
3. «Вегетационные индексы», в раздел входят спектральные индексы NDVI, GCI, VARI, MSAVI2, SAVI и NDRE, отражающие различные характеристики растительности. Каждый индекс определен в отдельную группу. Изучение тематических карт вегетационных индексов позволяет выявлять неоднородность пространственного распределения растительного покрова для каждого массива поля и отслеживать их динамику. Такие данные демонстрируют неравномерность роста и развития сельскохозяйственной культуры.
4. «Климат», раздел посвящен климатическим особенностям территории и их изменчивости в отдельные годы. Раздел включает две группы: «Температура» и «Осадки». Информация о температуре и количестве осадков необходима для определения благоприятных

(оптимальные значения температур и количество осадков) или неблагоприятных (дефицит и избыток осадков, аномально высокие и низкие температуры) климатических условий для развития посевов.

5. «Рельеф», раздел содержит информацию об особенностях устройства поверхности территории. Основные морфометрические характеристики рельефа организованы в группы: «Цифровая модель рельефа»; «Высоты»; «Экспозиция склона»; «Уклоны»; «Анализ рельефа». От рельефа сельскохозяйственных угодий зависит выбор сельскохозяйственных культур, технологии обработки почв, системы орошения и дренажа.
6. «Данные дистанционного зондирования», раздел включает спутниковые снимки и ортофотопланы местности, подготовленные при помощи БПЛА. Группы в данном разделе сформированы по названиям спутников «Sentinel» и «Landsat», а также камер, с которых проводилась съемка БПЛА – «Sony RX1». По спутниковым снимкам и ортофотопланам местности осуществляется уточнение границ сельскохозяйственных угодий и удаленный контроль проводимых технических операций (укос сенокосов, сбор урожая) на территории хозяйства.

В результате сформированный каталог данных системы «АгроМониторинг» служит эффективным средством управления данными, позволяя администраторам проводить процедуры по добавлению, обновлению, перемещению и удалению данных в каталоге. Удобный доступ к данным для пользователей через каталог повышает производительность системы в целом. Геоинформационное содержание каталога данных обеспечивает пользователей актуальной и комплексной информацией о сельскохозяйственных землях. При этом каждый раздел структуры способствует углубленному изучению конкретной характеристики сельскохозяйственных земель.

Заключение. Разрабатываемая информационная система «АгроМониторинг», включающая подготовленную структуру каталога данных и его геоинформационное содержание, позволит осуществлять оперативный мониторинг сельскохозяйственных угодий, отслеживать состояние сельскохозяйственных посевов и проводить комплексный анализ земель с учетом всех характеристик местности. В будущем планируется увеличить содержание каталога данных и добавить функции, такие как поиск данных и фильтрация.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fritz S., See L., Bayas J.C.L., Waldner F., Jacques D., Becker-Reshef I., Whitcraft A., Baruth B., Bonifacio R., Crutchfield J., Rembold F., Rojas O., Schucknecht A., Van der Velde M., Verdin J., Wu B., Yan N., You L., Gilliams S., Muecher S., Tetrault R., Moorthy I., McCallum I. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps // *Agricultural Systems*. 2019. V.168. P. 258-272.
- [2] Zahran S.A.E.-S., Saeed R.A.-H., Elazizy I.M. Remote sensing based water resources and agriculture spatial indicators system // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2022. V.25. P.515-527.
- [3] Гаврилов В.К., Зимин М.В., Моисеева Н.А. Возможности спутникового мониторинга для оценки состояния сельскохозяйственных земель и их инвестиционной привлекательности // *Управление рисками в АПК*. 2021. № 1(39). С. 8-21.
- [4] Шевырногов А.П., Емельянов Д.В., Мальчиков Н.О., Демьяненко Т.Н., Ивченко В.К., Ботвич И.Ю. Раннее прогнозирование урожайности зерновых культур на основе спутниковых данных Dove (PlanetScore) // *Биофизика*. 2021. Т. 66, № 6. С. 1164-1170.
- [5] Степанов А.С., Асеева Т.А., Дубровин К.Н. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // *Аграрный вестник Урала*. 2020. № 1(192). С. 10-19.
- [6] Страшная А.И., Береза О.В., Тарасова Л.Л., Максименкова Т.А., Шульгин И.А., Пурина И.Э., Чекулаева Т.С. Современное состояние и проблемы агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4(374). С. 219-240.
- [7] Денисов П.В., Лупян Е.А., Толпин В.А., Трошко К.А. Спутниковый сервис «Вега-PRO» для сельскохозяйственного мониторинга // *Управление рисками в АПК*. 2021. № 1(39). С. 22-36.

- [8] *Никонорова И.В., Гуменюк А.Е., Пивоваров И.А.* Оценка состояния плодородия почв сельскохозяйственных угодий с использованием ГИС-технологий // *Успехи современного естествознания.* 2021. № 12. С. 173-178.
- [9] OneSoil. <https://onesoil.ai/ru> (дата обращения: 05.06.2023).
- [10] *Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J.* A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters.* 2022. V.17. 024016.
- [11] *Ерунова, М.Г., Симакина А.С., Якубайлик О.Э.* Создание базы данных для точного земледелия ОПХ «Курагинское» // *Вестник КрасГАУ.* 2022. № 1(178). С. 13-20.
- [12] Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition, версия 2.0. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_ru.pdf (дата обращения 07.06.2023).

ОЦЕНКА ПЛАВУЧЕСТИ ДЫМОВЫХ ШЛЕЙФОВ ОТ ВЫСОТНЫХ ТРУБ ПО СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Леженин А.А.¹, Рапута В.Ф.¹, Амикишиева Р.А.²

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета», Новосибирск

Рассматриваются подходы по оценке характеристик дымовых шлейфов от высотных источников на основе прямых и косвенных методов расчета. Для этих целей привлекаются соотношения, вытекающие из теории подобия и размерности. Также для определения высоты подъема дымовых шлейфов и потоков их плавучести используется спутниковая информация. Для высотных труб крупных тепловых станций Сибири получены оценки параметров плавучести и подъема дымовых струй. Показано удовлетворительное согласие между прямыми и косвенными оценками параметров дымовых выбросов от труб ТЭЦ.

Ключевые слова: атмосфера, высотные трубы, дымовой выброс, параметр плавучести, спутниковая информация, теория подобия.

ESTIMATION OF THE BUOYANCY OF SMOKE PLUMES FROM HIGH-ALTITUDE PIPES FROM SATELLITE INFORMATION

Lezhenin A.A.¹, Raputa V.F.¹, Amikishieva R.A.²

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk

² Siberian Center of the Federal State Budgetary Institution «Scientific Research Center of Space Hydrometeorology «Planeta», Novosibirsk

Approaches are considered for assessing the characteristics of smoke plumes from high-altitude sources based on direct and indirect calculation methods. For these purposes, relations are involved that follow from the theory of similarity and dimension. Also, satellite information is used to determine the height of the rise of smoke plumes and their buoyancy flows. For high-altitude smokestacks of large thermal power plants in Siberia, estimates of the parameters of buoyancy and rise of smoke jets were obtained. Satisfactory agreement is shown between direct and indirect estimates of the parameters of smoke emissions from CHP stacks.

Keywords: atmosphere, high-altitude stacks, smoke emission, buoyancy parameter, satellite information, similarity theory.

Введение. Дымовые выбросы от труб тепловых станций в атмосферу могут распространяться на большие расстояния [1, 2]. Спутниковые снимки позволяют исследовать различные фазы распространения дымовых шлейфов в поле ветра [3, 4]. Уравнения гидротермодинамики атмосферы допускают вполне адекватное описание процессов распространения дымовых смесей. Для этого необходимо использовать большие объёмы информации. Теория подобия и размерностей даёт возможность существенно упростить представление траекторий дымовых шлейфов [2, 5-7]. Введение масштаба длины позволяет связать между собой высоту подъёма шлейфа и его смещение в горизонтальном направлении в поле ветра. В результате приходим к относительно простому соотношению, определяемому как «закон 2/3». По нему можно определить параметры активной фазы подъёма [2, 8-10]. С помощью спутниковой информации можно провести изучение различных участков траекторий выбросов дымовых смесей от высотных труб. Использование положение теней шлейфов на земную поверхность позволяет определять в разных проекциях характеристики распространения дымовых выбросов [11]. Для проведения исследований желательна наличие малооблачной погоды, достаточно однородной подстилающей поверхности, значимого угла между направлением переноса и азимутом солнца. Зимой на территориях Сибири снежный покров обеспечивает однородность подстилающей поверхности. Также в этот период выбросы в атмосферу от труб ТЭЦ являются наибольшими и соответственно повышаются возможности наблюдения дымовых шлейфов.

В цели работы входят задачи оценивания потока плавучести дымовых выбросов, высоты их подъема с привлечением спутниковой информации, данных с метеорологических и аэрологических станций.

Объекты и материалы исследования. Объектами исследований являлись дымовые шлейфы от высотных труб тепловых станций Сибири: Ново-Иркутской ТЭЦ, Барнаульской ТЭЦ-3, Омской ТЭЦ-5. Основные параметры источников атмосферных выбросов от рассматриваемых ТЭЦ приведены в табл. 1.

Фрагменты спутниковых снимков этих ТЭЦ представлены на рис. 1. Снимки получены в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>).

Табл. 1. Характеристики высотных труб ТЭЦ.

Название станции	Высота трубы, м	Внутренний диаметр трубы, м	Скорость исходящих газов, м/с	Температура смеси, °С
Ново-Иркутская ТЭЦ	250	6,6	20,1	140
Барнаульская ТЭЦ-3	230	7,2	9,6	120
Омская ТЭЦ-5	275	8,4	13,6	135

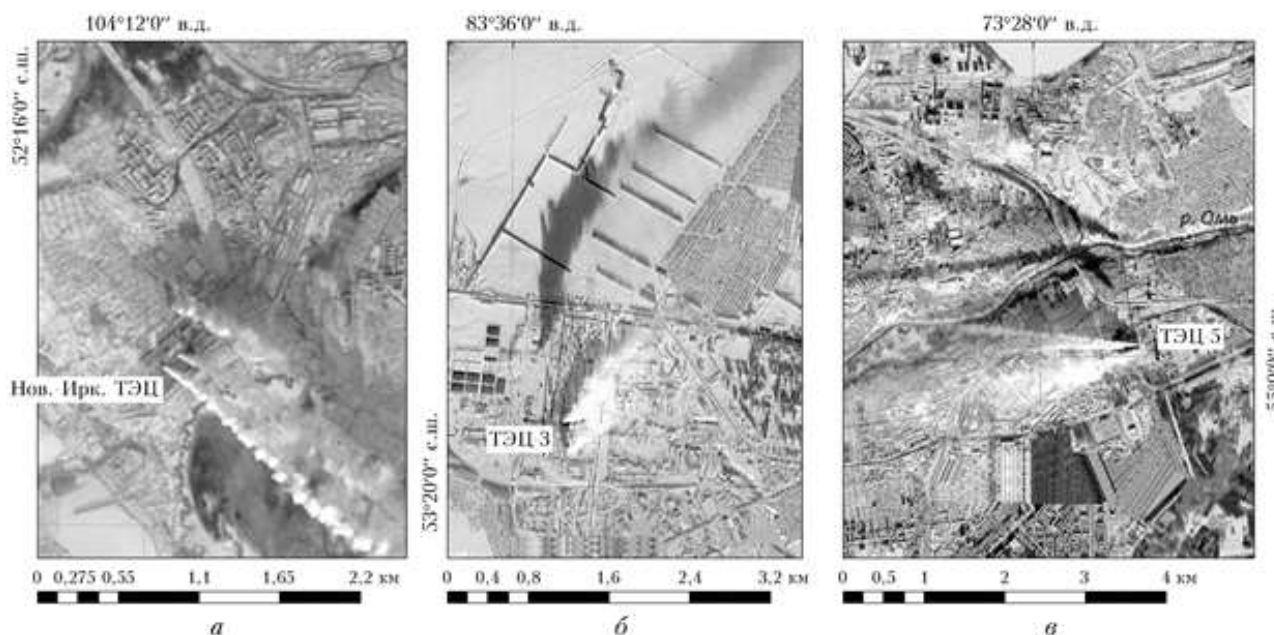


Рис. 1. Спутниковые снимки тепловых станций: Ново-Иркутской ТЭЦ за 18 января 2019 г. на 03:58 UTC с ИСЗ «Landsat-8» (а), ТЭЦ-3 г. Барнаула 2 декабря 2018 года 04:07 UTC с ИСЗ «Ресурс-П» (б), ТЭЦ-5 г. Омска 24 декабря 2018 г. 07:42 UTC с ИСЗ «Sentinel-2В» (в).

На рис. 1а прослеживается значительная протяжённость дымового шлейфа и его тень на земную поверхность. На рис. 1б и 1в видимые части траекторий дымовых выбросов значительно короче, чем их тени.

Для определения метеорологических характеристик использовались данные температурно-ветрового зондирования с ближайших от ТЭЦ аэрологических станций (АС): применительно к Ново-Иркутской ТЭЦ – АС Ангарск (индекс ВМО 30715), для ТЭЦ-3 г. Барнаула – АС Барнаул (индекс ВМО 29839), для ТЭЦ-5 г. Омска – АС Барабинск (индекс ВМО 29612). В табл. 2 приведены метеорологические параметры, полученные на рассматриваемых АС.

Из анализа табл. 2 следует, что на моменты проведения космических съёмок (рис. 1) температурная стратификация атмосферы во всех рассматриваемых случаях была близка к нейтральной. Наблюдаемые скорости ветра на высотах переноса дымовых выбросов составляли для АС Ангарск – 8 м/с, АС Барнаул – 4 м/с, АС Барабинск – 16 м/с.

Табл. 2. Характеристики нижней атмосферы по данным аэрологических станций.

Название станции, дата	Высота над уровнем моря, м	Атмосферное давление, гПа	Температура воздуха, °С	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
Ангарск, 18.01.2019 00 UTC	437	978	-19,3	ШТИЛЬ	0
	574	961	-17,0	275	4
	873	925	-11,9	295	7
	956	915	-10,7	300	8
	1368	867	-13,5	325	11
	1519	850	-14,5	320	15
Барнаул, 02.12.2018 00 UTC	159	1012	- 20,1	220	1
	232	1000	- 16,1	225	1
	355	984	- 10,1	232	2
	497	966	- 10,1	240	3
	658	946	- 10,1	235	4
	691	942	- 10,1	237	4
Барабинск, 24.12.2018 12 UTC	831	925	- 10,7	245	4
	120	1032	-30,7	30	5
	260	1012	-28,9	58	12
	347	1000	-22,3	75	16
	384	995	-19,7	80	17
	452	986	-19,2	85	16
	659	959	-17,5	83	15
	906	928	-17,5	80	13
930	925	-17,5	80	13	

Модель оценивания параметров подъема дымового шлейфа. Из теории размерности вытекают соотношения, позволяющие с точности до констант определить аналитический вид зависимостей, описывающих высоту подъема дымового шлейфа в поле ветра. Обработка значительных объёмов экспериментальных данных позволили достаточно надёжно оценить эти константы и получить ряд практических формул расчёта [2, 9].

В частности, для нейтральной температурной стратификации атмосферы дополнительный подъём дымовых смесей можно определить из следующих соотношений [6]:

$$\Delta h = 1,6 F^{1/3} (3,5 X)^{2/3} u^{-1}, \quad (1)$$

$$X = 14 F^{5/8} \quad \text{при} \quad F < 55 \text{ м}^4 \text{с}^{-3}, \quad (2)$$

$$X = 34 F^{2/5} \quad \text{при} \quad F \geq 55 \text{ м}^4 \text{с}^{-3}. \quad (3)$$

Здесь

$$F = g w_s r^2 (1 - T_a/T_c), \quad (4)$$

Δh – дополнительная высота подъема смесей над устьем трубы (м), X – расстояние, на котором дымовой шлейф достигает стадии пассивного переноса в поле горизонтального ветра (м), F – параметр плавучести ($\text{м}^4/\text{с}^3$), u – средняя скорость ветра в слое переноса примеси (м/с); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$); w_s – скорость газозвушной смеси на выходе из трубы (м/с); r – радиус трубы (м); T_c – температура смеси ($^\circ\text{K}$); T_a – температура окружающего воздуха ($^\circ\text{K}$).

Анализ табл. 1 показывает, что поток плавучести F для рассматриваемых ТЭЦ значительно выше $55 \text{ м}^4 \text{с}^{-3}$. В этом случае расчетные формулы (1) - (3) приводятся к следующему виду:

$$\Delta h = a F^{3/5} u^{-1} \approx 38.71 F^{3/5} u^{-1}, \quad (5)$$

где $a = 1.6 \cdot 119^{2/3}$.

Далее получаем

$$F = a^{-5/3} (u \Delta h)^{5/3} \approx 2.258 \cdot 10^{-3} (u \Delta h)^{5/3}. \quad (6)$$

Результаты и обсуждения. С использованием соотношений (4)-(6) и данных аэрологического зондирования, которые приведены в табл. 2, были рассчитаны параметры дымовых шлейфов, исследуемых ТЭЦ. На основе спутниковых снимков (рис. 1) выполнено определение высот подъема шлейфов от этих ТЭЦ. В табл. 3. представлены результаты определения прямым и косвенным способами дополнительных высот подъёма и потоков плавучести рассматриваемых дымовых шлейфов.

Табл. 3. Оценки параметров дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ.

Название ТЭЦ, дата снимка	u , м/с	T_a , °C	Расчёт Δh , м	Оценка $\widehat{\Delta h}$, м	Расчет F , м ⁴ /с ³	Оценка \widehat{F} , м ⁴ /с ³
Ново-Иркутская ТЭЦ, 18.01.2019 г.	8	- 11	264	230	784	624
Барнаулская ТЭЦ-3, 02.12.2018 г.	4	- 10	355	350	403	395
Омская ТЭЦ-5, 24.12.2018 г.	16	- 19	134	110	887	641

Вычисления F и Δh выполнялись по формулам (4), (5). Косвенное определение потоков плавучести \widehat{F} выполнялось с использованием соотношения (6). Дополнительные высоты подъёма $\widehat{\Delta h}$ оценивались на основе спутниковой информации (рис. 1). При проведении расчётов учитывался азимут и зенитный угол Солнца, положения и длины теней труб на поверхности земли [11]. Анализ табл. 3 показывает довольно высокий уровень соответствия оценок высот подъёма и потоков плавучести с результатами их расчетов по формулам (4), (5). Исследование распространения дымовых шлейфов проведено для различных скоростей ветра. При относительно небольшой скорости ветра согласие между оцениваемыми и рассчитанными характеристиками оказалось достаточно высокое. При больших скоростях ветра уровень их относительного согласия снижается, что может быть вызвано большей пологостью траекторий дымовых шлейфов и, как следствие, возникающими трудностями обработки спутниковых снимков.

Дымовые трубы являются весьма дорогостоящим оборудованием тепловых электрических станций. В результате ошибок при их проектировании и эксплуатации могут возникнуть дополнительные финансовые затраты, а также, значительные экологические проблемы. Возможность косвенного оценивания высоты подъема дымовых выбросов по спутниковым снимкам позволяет выполнить в агрегированном виде оценку интегрального показателя - потока плавучести шлейфа. Это обстоятельство следует использовать для оптимизации параметров источников эмиссии [12], тепловых и динамических параметров атмосферных выбросов дымовых смесей и текущего контроля эксплуатации высотных труб.

Заключение. Выполненные исследования позволяют предложить дополнительные методы оценивания параметров подъёма газовых и аэрозольных примесей от высотных труб. Их основу составляют соотношения теории подобия и размерности и спутниковая информация по распространению дымовых шлейфов. При температурной стратификации атмосферы, близкой к нейтральной, в слое распространения дымовых смесей использование этих методов является вполне обоснованным. Их апробация проведена для ряда крупных тепловых станций Западной и Восточной Сибири. При метеорологических условиях, допускающих применимость предложенных методов, и с учётом режимов эксплуатации высотных труб на рассматриваемых ТЭЦ получены оценки высот подъёма и потоков плавучести дымовых шлейфов. Предложенный подход позволяет восполнить контроль эксплуатации труб промышленных предприятий при отсутствии или недостаточности информации о параметрах источников выбросов.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787/8 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кондратьев К.Я., Григорьев А.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
- [2] Briggs G.A. Plume Rise // Atomic Energy Commission Critical Review Series. 1969. № 2507581
- [3] Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R. Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 1995-2006.
- [4] Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55-66.
- [5] Chanady G.T. Some observations on smoke plumes // Int. J. Air Water Poll. 1961. V. 4. P. 47-51.
- [6] Ванкевич Р.Е., Ермакова Т.С., Софиев М.А. Сравнение результатов вычисления высоты подъема струи дыма от лесных пожаров по полуэмпирическим формулам и одномерной модели BUOY-ANT // Ученые записки. 2011. № 19. С. 61-70.
- [7] Priestley C.H.B., Ball F.K. Continuous convection from an isolated source of heat // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1955. V. 81. P. 144-157.
- [8] Briggs G.A. A plume rise model compared with observations // J. Air Pollut. Control Assoc. 1965. V. 15, N 9. P. 433-438.
- [9] Иванов Е.А., Клепикова Н.В., Троянова Н.И., Фреймундт Г.Н. Методы расчета подъема факела из вентиляционной трубы // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). 2014. № 4. С. 18-32.
- [10] Netterville D.D.J. Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds // Atmospheric Environment Part A, General Topics. 1990. V. 24. No. 5. P. 1061-1081.
- [11] Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценка высоты подъёма дымового шлейфа по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 06. С. 471-475.
- [12] Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 131-145.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФЕНОТИПИРОВАНИЯ СТРЕССА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Максимов Л.В.¹, Гурова Т.А.², Елкин О.В.²

¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

² СибФТИ СФНЦА РАН, Новосибирск

Предложена методика разработки, калибровки и тестирования измерительной системы на основе гиперспектральной камеры фирмы Photonfocus (Швейцария) для лабораторного исследования влияния различных видов стрессов на жизнедеятельность зерновых культур. Разработана прецизионная сканирующая система для получения гиперспектральных изображений высокого пространственного разрешения. Предложена методика спектральной калибровки данного класса камер, позволяющая существенно уменьшить систематическую погрешность измерения во всём рабочем спектральном диапазоне. Приводятся предварительные результаты исследования заболеваний зерновых культур по гиперспектральным изображениям, полученным при помощи разработанного комплекса.

Ключевые слова: фенотипирование, гиперспектральная обработка, калибровка, photonfocus.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR PHENOTYPING OF GRAIN CROP STRESS BY HYPERSPECTRAL IMAGES

Maximov L.V.¹, Gurova T.A.², Elkin O.V.²

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Nocosibirsk

² SibFTI SFSCA RAS, Novosibirsk

The method of development, calibration and testing of measuring system on the basis of hyperspectral camera of firm Photonfocus (Switzerland) for laboratory research of influence of different types of stress on life activity of cereals is offered. A high precision scanning system for obtaining hyperspectral images of high spatial resolution has been developed. The technique of spectral calibration of this class of cameras is proposed, which makes it possible to significantly reduce the systematic error of measurement in the entire operating spectral range. Preliminary results of the study of cereal crop diseases on hyperspectral images obtained with the help of the developed complex are given.

Keywords: phenotyping, hyperspectral imaging, calibration, photonfocus.

Быстрые, неинвазивные методы обнаружения и идентификация болезней и других стрессовых состояний растений являются актуальной проблемой в сельском хозяйстве. Обнаружение болезней на ранних стадиях обеспечивает возможность раннего вмешательства для контроля и предотвращения распространения инфекции, снижению потерь урожая и повышению эффективности проведения защитных мероприятий. Выявление посевных площадей, пораженных болезнью, и их локализация, позволит перейти к целенаправленному применению химикатов. Такая точность приведёт к сокращению использования пестицидов и применению гербицидов, с последующим благоприятным воздействием на окружающую среду, сокращение затрат производителей и конечного потребителя. Существует огромный интерес перехода от ручных процессов в сельском хозяйстве к автоматизированным, объективным и чувствительным подходам.

Методы спектральной визуализации отражательной способности листьев растений представляют значительный потенциал в экологическом мониторинге посевов и оценке физиологического состояния растений на ранних стадиях развития патологического процесса. В частности, методы спектральной визуализации лучше подходят для обнаружения локальных эффектов в исследуемом образце.

Применение цифровых методов обнаружения болезней сельскохозяйственных культур по данным спектральной визуализации отражательной способности листьев растений в мониторинге основных болезней позволит точно выявлять очаги поражения посевов, достоверно диагностировать заболевания и степень поражения растений и обеспечить поддержку принятия решений товаропроизводителями по своевременным и эффективным мерам защиты урожая.

Оценку посевов сельскохозяйственных культур предложено осуществлять на основе обработки гиперспектральных изображений, которые будут представлены в виде гиперкуба. Для регистрации и формирования таких данных выбрана гиперспектральная камера MV1-D2048x1088-HS05-96-G2-10 фирмы Photonfocus [1]. Ее особенностью является матрица оптических полосовых фильтров на основе резонатора Фабри-Перо [2], скомпонованных в виде полос различного спектрального пропускания ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) [3], и сканирующий режим работы, что обуславливает необходимость обеспечения ее точно рассчитанного перемещения относительно наблюдаемого объекта при помощи системы сканирования, не входящей в комплект. Отсюда вытекает первая задача, заключающаяся в разработке и создании сканирующей системы, точность которой обеспечивала бы приемлемое качество регистрируемых гиперспектральных изображений.

Вторая задача заключалась в разработке методики прецизионной настройки системы сканирования (в документации по камере изложены общие требования к исходным снимкам, однако отсутствует сама методика их получения), которая состоит из следующих процедур:

- определения шага сканирования;
- определение ширины линейного участка характеристической кривой фотоприёмной матрицы;
- определение параметров съёмки (выдержка, диафрагма);
- регистрация калибровочных изображений.

Из-за конструктивных особенностей гиперспектральной камеры съёмку объектов необходимо производить со сдвигом между соседними изображениями в 5 пикселей, соответствующих одной длине волны λ_i .

При съёмке необходимо, чтобы значения регистрируемых изображений не выходили за пределы линейного диапазона, в т.ч. в простейшем варианте калибровки по двум кадрам (белый лист и темновой снимок). Однако для объектов с яркостью, значительно меньшей, чем у белого листа, такое требование существенно уменьшает часть динамического диапазона, приходящуюся на объект. В этом случае производитель камеры рекомендует проводить калибровку по трём кадрам: белый лист (и соответствующий ему темновой кадр) снимать с выдержкой, меньшей, чем используемая при съёмке объекта, а при калибровке подставлять значение белого листа с соответствующим коэффициентом, равным отношению выдержек. Таким образом, калиброванная интенсивность излучения объекта v равна

$$v = \frac{(\rho - \rho_{0,\tau}) \tau_{ref}}{(\rho_{ref} - \rho_{0,\tau_{ref}}) \tau},$$

где ρ – зарегистрированная интенсивность излучения объекта, снятого с выдержкой τ , $\rho_{0,\tau}$ – темновой кадр, снятый с выдержкой τ , ρ_{ref} – интенсивность излучения белого листа с выдержкой τ_{ref} , $\rho_{0,\tau_{ref}}$ – темновой кадр с выдержкой τ_{ref} .

На рисунке 1 представлено сечение интенсивности двух изображений белого листа, снятых с разной выдержкой, вдоль горизонтальной оси x . Оранжевым цветом достроен нижний график, отмасштабированный на отношение выдержек. Зеленым цветом обозначен темновой ток. Видно, что имеется отклонение от линейности в области $800 < x < 1200$.

Кроме учёта калибровочных кадров, при формировании гиперкуба гиперспектральных данных необходимо выполнять пересчёт номеров каналов в длины волн путём умножения измеренного спектра на заранее рассчитанную калибровочную матрицу. Каждому интерференционному фильтру соответствует одна или (в ряде случаев) несколько спектральных линий

пропускания в области чувствительности фотоприемника. Матрица соответствующего преобразования предлагается производителем, однако, экспериментально установлена необходимость ее уточнения. Обоснование необходимости подобной доработки, также как и подходы к её реализации уже опубликованы ранее различными исследователями [4, 5].

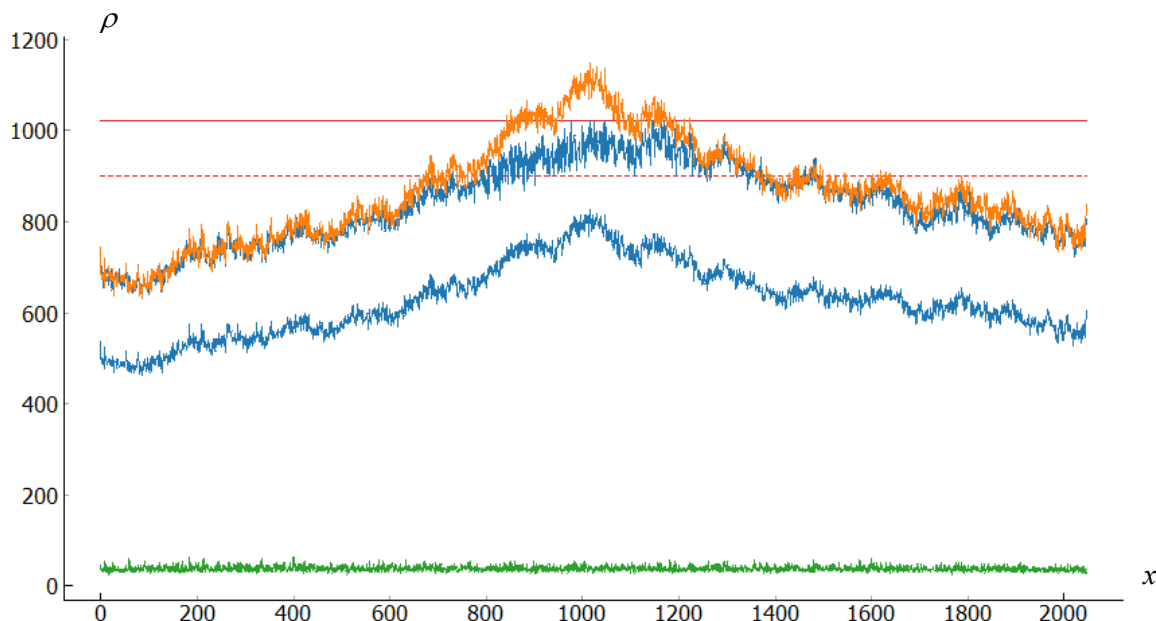


Рис. 1. Сечение интенсивности двух изображений белого листа, снятых при разной выдержке (синий, оранжевый), а также темного кадра (зеленый).

В качестве примера на рисунке 2 приведен исходный (рисунок 2,а) и скорректированный (рисунок 2,б) с применением данной матрицы спектры фильтра для длины волны 518 нм. Конечно скорректированный спектр лучше исходного, но значительно уступает по качеству рассчитанному при более точно подобранной комбинации каналов (рисунок 2,в). В данном случае для расчёта использованы 9 каналов, а оптимальные веса для них определены методом наименьших квадратов. Аналогичным образом была сформирована полная матрица преобразования. Это уменьшило систематическую ошибку в итоговых поточечных спектрах.

Третья задача заключалась в разработке программно-алгоритмических средств обработки данных, получаемых с гиперспектральной камеры. Ее штатное программное обеспечение данной камеры позволяет формировать гиперкуб (трехмерный массив зарегистрированных значений в координатах x, y, λ). Однако оно имеет ряд недостатков:

- не имеет графического интерфейса (GUI), что несколько усложняет его использование в реальных сценариях
- ограничено алгоритмами и сценариями использования, заложенными разработчиками, что не позволяет в полной мере задействовать возможности камеры

Для решения первой задачи разработана установка для сканирования в состав которой входит: гиперспектральная камера Photonfocus MV1-D2048x1088-HS05-96-G2-10 с диапазоном длин волн 400-900 нм и спектральным разрешением 3 нм., закрепленная на определенной высоте, соответствующей размеру кадра 10x10 см; координатный стол для размещения объекта исследования; по бокам установлены 2 прожектора с галогеновыми светильниками. На рисунке 3 показана функциональная схема, а на рисунке 4 внешний вид установки.

Спектральная полоса пропускания камеры разбита на 149 каналов, в диапазоне от 475 до 900 нм, пространственное разрешение камеры 2048x1088 пикселей, угол обзора $14^\circ \times 7^\circ$. Камера используется с парой широкополосных фильтров, необходимых для обрезания боковых интерференционных пиков, приводящих к наводкам в рабочем диапазоне: коротковолновый (Shortpass) – обрезает спектр после 900 нм и длинноволновый (Longpass) – обрезает спектр до 475 нм.

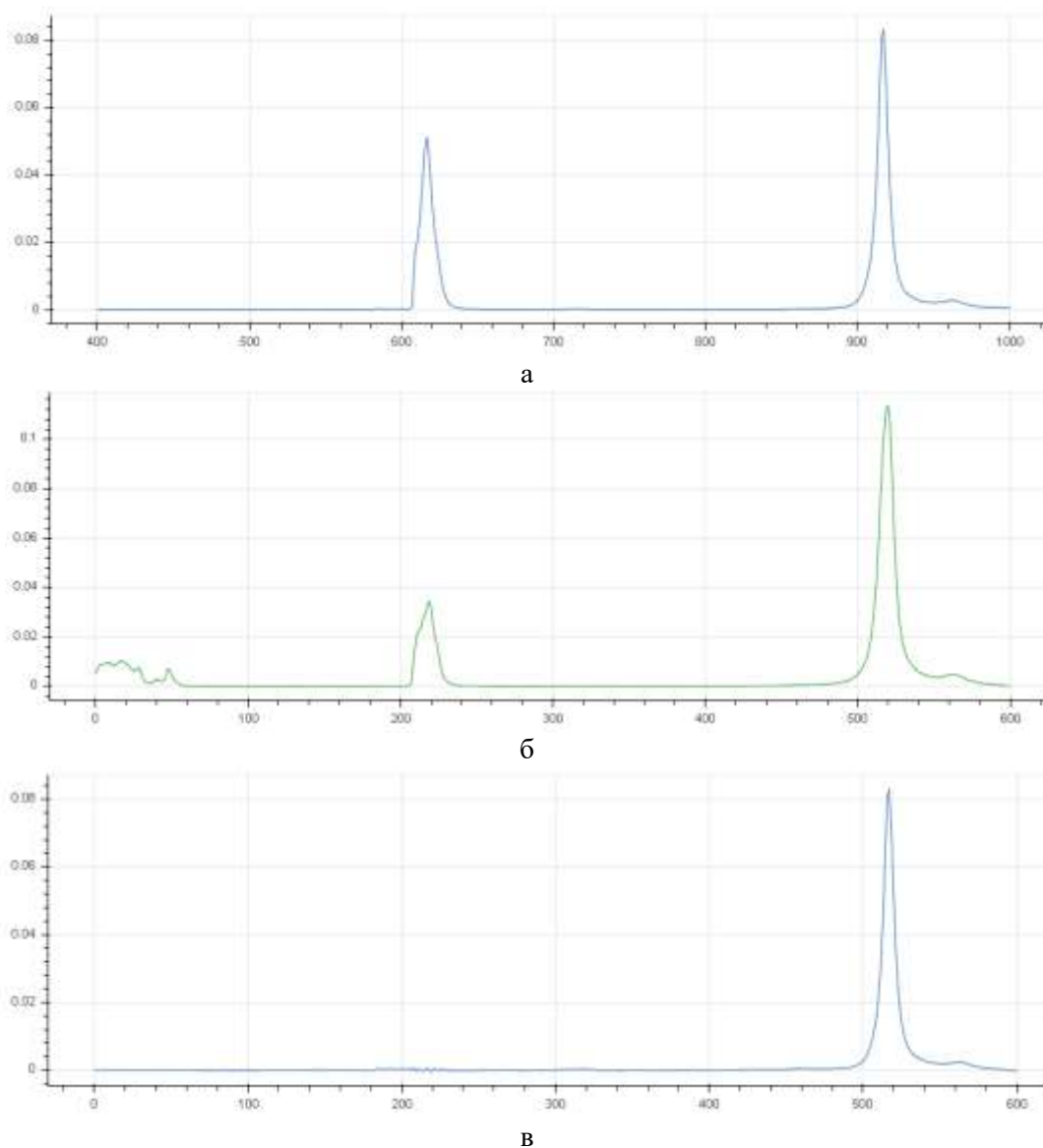


Рис. 2. Коррекция данных: а – исходный спектр для длины волны 518 нм., б – скорректированный с применением матрицы, предлагаемой производителем спектр, в – спектр, рассчитанный при более точно подобранной комбинации каналов.

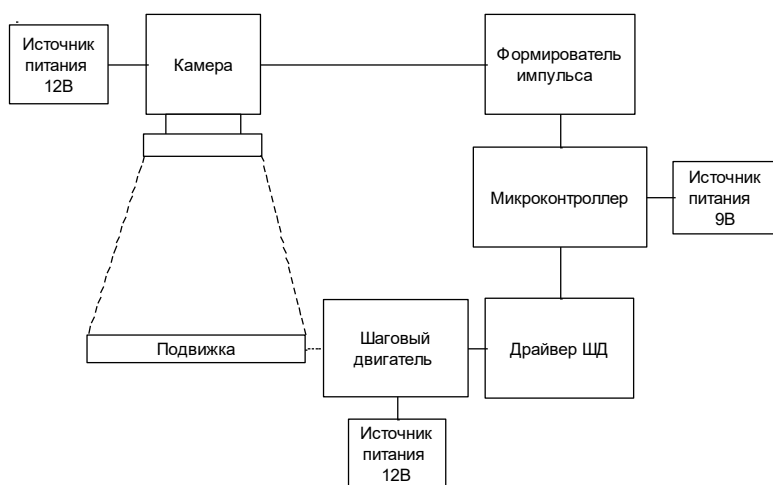


Рис. 3. Функциональная схема установки.



Рис. 4. Внешний вид установки.

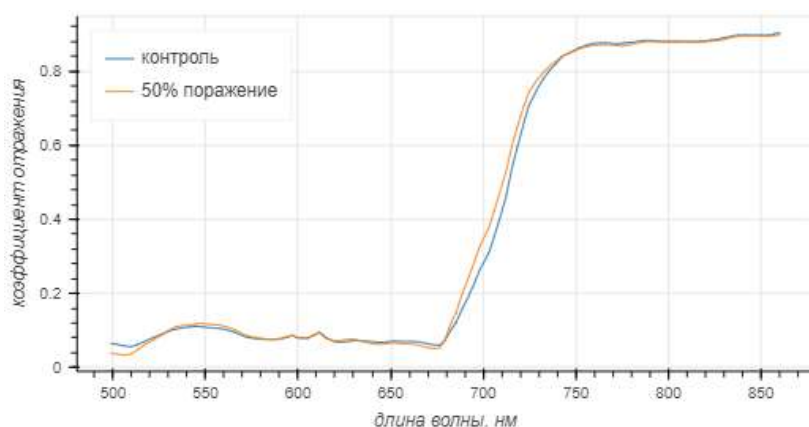


Рис. 5. Спектр отражения листьев пшеницы сорта Омская 18: мучнистая роса 50% и контроль.

Координатный стол системы состоит из направляющих с линейными подшипниками, по которым движется платформа и шагового двигателя (ШД) с шарико-винтовой передачей, позволяющей позиционировать платформу с объектом исследования с точностью до ± 5 мкм.

Данная установка предназначена для работы в помещении. Образцы исследования размещаются на координатном столе белого цвета. Для получения набора данных необходима следующая последовательность действий: съёмка светлого кадра, съёмка тёмного кадра, получение ~ 400 изображений – "срезов" гиперкуба – и формирование самого гиперкуба.

Для решения второй и третьей задач разработана методика и программное обеспечение. В состав программного обеспечения входит утилита PF_GEVPlayer для получения данных с камеры и записи изображений на диск, (поставляется в комплекте с камерой), разработанное программное обеспечение для калибровки и сборки гиперкуба. Получаемые в процессе сканирования гиперспектральные данные записываются в формате raw, а после сборки гиперкуба – в стандартном формате ENVI HDR. Их анализ может быть выполнен, например, при помощи стандартного приложения ENVI.

Разработанная сканирующая система, методика ее калибровки и программно-алгоритмические средства обработки гиперспектральных данных позволили экспериментально выявить спектральные особенности всходов здоровой и пораженной пшеницы (рисунок 5).

Разработана и создана сканирующая система мониторинга посевов сельскохозяйственных культур на основе гиперспектральной камеры MV1-D2048x1088-HS05-96-G2-10 фирмы Photonfocus. Разработана методика прецизионной калибровки системы сканирования, состоящая из следующих процедур: задания выдержки, калибровки камеры на белый фон, получение смещения относительно x и y координат объекта относительно исходного положения и корректировка. Разработаны программно-алгоритмические средства, позволившие автоматизировать настройку системы сканирования, что значительно сокращает время на настройку ее параметров, обрабатывать полученные гиперспектральные данные с формированием гиперкуба, осуществлять его визуализацию и интерактивный анализ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Geelen B., Tack N., Lambrechts A.* Компактная мультиспектральная камера с монолитно интегрированным мозаичным фильтром // *Spie Moems-Mems* 8613(0), 89740L-89740L (2014).
- [2] *MacLeod H., Macleod H.* Тонкопленочные оптические фильтры, четвертое издание, серия оптоэлектроники, CRC Press (2010).
- [3] *Loesel J., Laubier D.* Изучение доступных спектрометров с использованием клинового фильтра // *Proceedings of SPIE* 7100, 710013-710013-8 (2008).
- [4] *Liu S., Mainali P., Tackand K., Lauwereins R.* Моделирование утечки и алгоритм коррекции плоского поля для гиперспектрального датчика КМОП // *International Journal of Modeling and Optimization* 3(1), 30-35 (2013).
- [5] *Maloney L.T.* Оценка линейных моделей поверхностного спектрального отражения с небольшими числами параметров // *Journal of the Optical Society of America A* 3(10), 1673-1683 (1986).

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЧУЙСКОЙ МЕЖГОРНОЙ КОТЛОВИНЫ (РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LANDSAT

Мамаш Е.А.¹, Пестунов И.А.^{1,2}, Ермаков Н.Б.², Кудряшова С.Я.³, Чумбаев А.С.³

¹ Федеральный исследовательский центр информационных технологий, Новосибирск

² Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Ялта

³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

Рассматриваются известные алгоритмы вычисления температуры подстилающей поверхности (LST) на основе данных спутниковых данных Landsat. Предложен алгоритм вычисления LST с использованием альтернативного способа вычисления поверхностной эмиссии, выполнена его валидация на основе наземных данных, а результаты сравниваются с продуктом второго уровня (L2SP), выпускаемого геологической службой США и алгоритмом S. Ermida. Предложенный алгоритм применен для анализа многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай).

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, LST, Landsat, температурный режим, валидация, оросительные системы, Чуйская межгорная котловина.

ANALYSIS OF THE LONG-TERM DYNAMICS OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE CHUYA INTERMOUNTAIN BASIN (REPUBLIC OF ALTAI) BASED ON LANDSAT DATA

Mamash E.A.¹, Pestunov I.A.^{1,2}, Ermakov N.B.², Kudryashova S.Ya.³, Chumbaev A.S.³

¹ Federal Research Center for Information Technologies, Novosibirsk

² Nikita Botanical Garden – National Scientific Center RAS, Yalta

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk

Known algorithms for calculating the underlying surface temperature (LST) based on Landsat satellite data are considered. An algorithm for calculating LST using an alternative method for calculating surface emission is proposed, validated on the basis of ground data, and the results are compared with the second level product (L2SP) produced by the US Geological Survey and the S. Ermida algorithm. The proposed algorithm was applied to analyze the long-term dynamics of the temperature regime of the Chuya intermountain basin (Altai Republic).

Keywords: remote sensing data, LST, Landsat, temperature regime, validation, irrigation systems, Chui intermountain basin.

Введение. Для исследования локальных изменений температурного режима на небольших территориях обычно используются данные спутников серии Landsat, среди которых в основном востребованы данные Landsat 4, 5, 7, 8. Программа Landsat успешно предоставляет тепловую информацию о земной поверхности в течение почти четырех десятилетий с периодичностью в две недели. В последнее время (с сентября 2021 г.) коллекции данных Landsat начали пополняться новыми сведениями со спутника Landsat 9. Спутники Landsat 8, 9 оснащены тепловым инфракрасным датчиком (TIRS), ведущим съемку в двух тепловых каналах: 10 (10,6–11,19 мкм) и 11 (10,6–11,19 мкм) с номинальным пространственным разрешением 100 м.

Доступ к этим данным чаще всего осуществляется через сайт Геологической службы США (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). В последние годы все большую популярность приобретает также облачная платформа Google Earth Engine (GEE), обеспечивающая не только доступ к данным, но и обработку их больших временных серий. При расчете LST (Land Surface Temperature) по данным Landsat нужно учитывать, что не существует как единого общепринятого метода радиометрической и атмосферной коррекции снимков, так и единого алгоритма учета излучательной способности земной поверхности (коэффициента эмиссии).

USGS в рамках создания научных продуктов (Science products) второго уровня (L2SP) начала выпуск оперативного продукта LST (L8_ST и L9_ST), получаемого на основе данных Collection 2 Level-1 [1].

Этот продукт основан на решении уравнения радиационного переноса, примененном к микроволновому диапазону (L8,9/TIRS). Для реализации процедуры атмосферной коррекции в данном случае используются данные Североамериканского регионального реанализа (NARR), а для выполнения расчетов радиационного переноса используется программа MODTRAN. Коррекция излучательной способности для этого продукта основана на данных Aster Global Emissivity Dataset – ASTER GED [2], которые, в свою очередь, используют значения вегетационного индекса ASTER NDVI. Продукт L8_ST доступен с периодом в 16 дней через веб-сайт Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>), доступ открыт с 1 марта 2022 г. Коллекция данных L2 также представлена в системе доступа и обработки спутниковых данных Google Earth Engine. В последнее время начинают появляться публикации, связанные с валидацией этого достаточного нового продукта как для земных [3], так и для водных [4] объектов. Валидация проводится на основе наземных измерений, путем их сравнения с продуктами L2 и с результатами реализации альтернативных алгоритмов атмосферной коррекции и алгоритмов вычисления температуры. Результаты этой валидации показывают наличие систематической ошибки продукта L2, в большинстве случаев в сторону завышения. В работе [4] также предложена формула для коррекции значений продукта L2 применительно к водным объектам.

S. Ermida [5] предложен алгоритм подсчета LST для серии спутников Landsat, начиная с Landsat 4 в системе GEE, где представлены в открытом доступе все вычислительные модули.

К недостаткам этого алгоритма можно отнести необходимость использования данных ASTER GED, покрытие которыми на территории России обладает рядом пробелов и может быть использовано далеко не всегда. Например, на рисунке 1 представлен фрагмент покрытия данными ASTER GED территории России.

Целями данной работы являются:

- 1) модификация алгоритма вычисления LST, представленного S. Ermida [5] с использованием альтернативного способа вычисления поверхностной эмиссии, его валидация на основе наземных данных, сравнение с продуктом L2SP и алгоритмом S. Ermida.
- 2) применение разработанного алгоритма для анализа многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай).

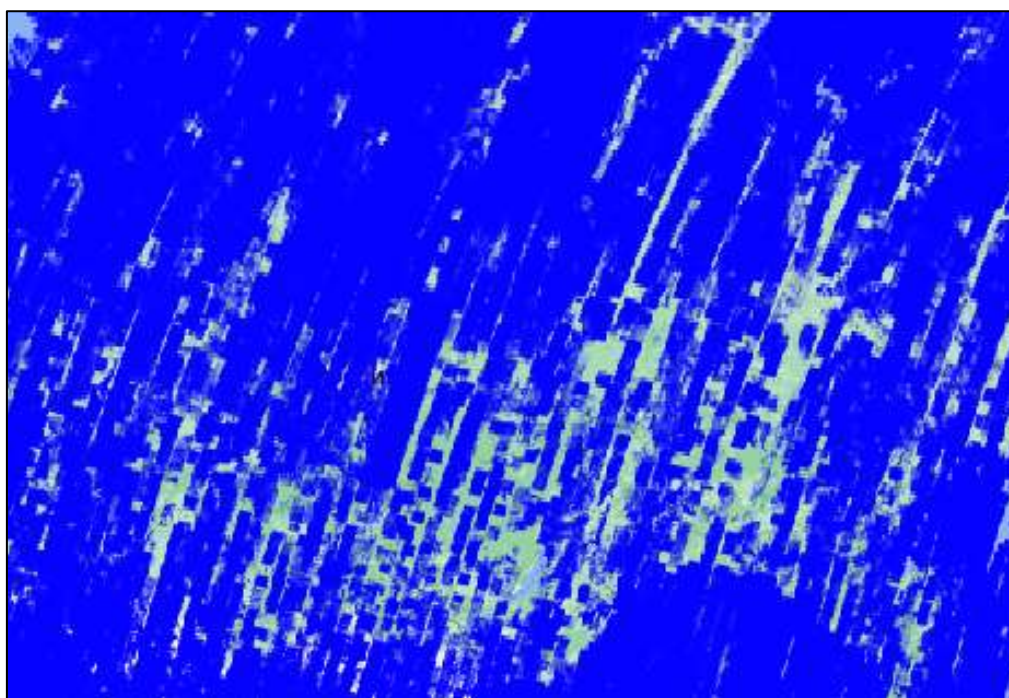


Рис. 1. Фрагмент покрытия данными Aster-GED на территории России.

Предлагаемый алгоритм вычисления LST. Как было сказано выше, одной из главных задач при вычислении LST является вычисление коэффициента эмиссии. Задача определения коэффициента эмиссии решается в основном следующими способами:

1. Для вычисления коэффициента эмиссии используются данные, получаемые с других спутников, например Terra и Aqua.
2. Коэффициент эмиссии принимает несколько значений в зависимости от типа подстилающей поверхности.
3. Коэффициент эмиссии вычисляется на основе индекса NDVI с использованием функции FVC (Fractional Vegetation Cover), отражающей соотношение площадей открытой почвы и растительности на исследуемом участке [5-8]. Эта функция имеет вид:

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2,$$

Здесь $NDVI_{bare}$ и $NDVI_{veg}$ – пороговые значения, соответствующие голой почве и почве, полностью покрытой растительностью. В нашем случае эти значения равны: $NDVI_{bare} = 0.2$ и $NDVI_{veg} = 0.86$, как в работе S. Ermida [5], которая, в свою очередь, ссылается на исследования J. Jiménez-Muñoz и др. [9].

Значения эмиссии поверхности, частично или полностью покрытой растительностью, могут быть получены на основе так называемого метода «растительного покрова» [10,11] и вычисляются как

$$\varepsilon_b = FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare},$$

где $\varepsilon_{b,veg}$ и $\varepsilon_{b,bare}$ излучательная способность поверхности, полностью покрытой растительностью и голой почвы соответственно для данного спектрального канала b . В алгоритме, предложенном в [5] значение $\varepsilon_{b,veg}$ считается постоянным и равным 0.99, тогда как $\varepsilon_{b,bare}$ вычисляются на основе данных ASTER GEDv3 [2]. Поскольку покрытие данными Aster на территории России местами отсутствует (рисунок 1), то в нашей работе мы используем альтернативный алгоритм подсчета эмиссии, описанный J.A. Sobrino [12]:

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \varepsilon_{b,bare}, & NDVI < NDVI_{bare} \\ FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare}, & NDVI_{bare} \leq NDVI \leq NDVI_{veg} \\ \varepsilon_{b,veg}, & NDVI > NDVI_{bare} \end{cases},$$

где $\varepsilon_{b,bare}$ – постоянная и в нашем случае равна 0,97. Это значение получено, исходя из ряда исследований [13, 14].

Значения LST вычисляются на основе алгоритма SMW (Statistical Mono-Window) [15], в котором используются также атмосферные данные реанализа National Center for Environmental Prediction (NCEP) и National Center for Atmospheric Research (NCAR). В результате модель представляет собой линейаризацию уравнения радиационного переноса, в котором сохраняется явная зависимость от излучательной способности [5]:

$$LST = A_i \frac{T_b}{\varepsilon} + B_i \frac{1}{\varepsilon} + C_i,$$

где T_b – яркостная температура TOA в канале TIR, ε – излучательная способность поверхности для того же канала, коэффициенты A_i, B_i, C_i получаются при построении моделей радиационного переноса на основе набора данных профилей температуры воздуха, водяного пара и озона [16].

Объект исследования. Многочисленные археологические находки специализированных земледельческих орудий и ирригационных сооружений свидетельствуют, что территория Чуйской сухостепной котловины Горного Алтая является областью широко развитого древнего орошаемого земледелия [17, 18]. Начало современного ирригационного строительства

связано с освоением промышленных запасов Курайского, Чаган-Узунского и Акташского ртутных месторождений. Рост численности населения, занятого в сооружении объектов Чаган-Узунского перерабатывающего предприятия, постоянно требовал решения продовольственной проблемы. Масштабное внедрение оросительных мелиораций в Чуйской степи дало возможность существенно повысить продуктивность кормовых культур – необходимой базы животноводства.

Для претворения программы, намеченной постановлением Всероссийского центрального исполнительного комитета и Совета народных комиссаров РСФСР «О мероприятиях в ознаменование десятилетия Ойротской автономной области» (1932 г.), были выполнены первые исследования и составлены технико-экономические обоснования орошения Чуйской и Курайской котловин.

С вводом в эксплуатацию ирригационной сети «обновились веками пустовавшая Чуйская степь», однако, избыточное многолетнее орошение стало причиной прогрессирующего заболачивания и проявления мерзлотных явлений. Было принято решение о нецелесообразности эксплуатации гидромелиоративной системы, и некогда орошаемый массив с крупнейшей коллекцией многолетних трав вновь стал пастбищным участком сухой степи.

В настоящее время, согласно данным ФГБУ Управление Мелиоводхоз по Республике Алтай в Чуйской степи на площади более 2 тыс. га функционируют Тархатинская, Елангашская и Чаган-Бургазинская оросительные системы [19].

Наземные измерения проводились с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 «Thermochron». Для сопоставления наземных данных с данными ДЗЗ изменения температур на поверхности почвы фиксировалась в течение вегетационного периода 2022 года (15.07.2022–27.10.2022), с учетом времени съемки со спутника поверхности исследуемого региона (12.00).

Валидация данных LST. Для валидации данных LST были выбраны ключевые участки на территории распространения орошаемых и посторошаемых земель сухостепных котловин Республики Алтай (2022-2023 гг.) (рисунок 2):

- 1) *участок 1* – староорошаемый и неорошаемый массивы гидросистемы Кокоря (точки A1, A2);
- 2) *участок 2* – староорошаемый участок Тархатинской оросительной системы (точка A3);
- 3) *участок 3* – староорошаемый участок Елангашской оросительной системы (точка A4);
- 4) *участок 4* – участок сухой степи, расположенный вне зоны орошения (точки A4, A5).

При валидации точек A1-A5 рассмотрено 3 различных алгоритма LST, результаты сравнения спутниковых и наземных данных приводятся в таблице 1 с соответствующими статистическими оценками. Для получения статистических оценок мы воспользовались наряду с стандартной оценкой сдвига МВЕ (mean bias error) робастными статистическими оценками [20].

Это так называемая точность или медианная ошибка μ , которая является робастным эквивалентом сдвига (МВЕ),

$$\mu = \text{median}(LST_{sat} - LST_{insitu}),$$

где LST_{sat} и LST_{insitu} соответственно спутниковые и наземные измерения LST. Робастным эквивалентом стандартного отклонения является медиана абсолютных остатков σ_μ :

$$\sigma_\mu = \text{median}|(LST_{sat} - LST_{insitu}) - \mu|.$$

Также мы вычисляли среднеквадратическую ошибку RMSE (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (LST_{i,sat} - LST_{i,insitu})^2},$$

где N – число измерений.

Из графиков на рисунке 3 и Таблицы 1 мы видим, что для всех точек и алгоритмов наблюдается высокий коэффициент корреляции спутниковых и наземных данных. Наибольшая

ошибка приходится на готовый продукт L2SP, о чем также говорится в работах других авторов [3, 5, 21, 22].

Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины. Для анализа динамики температурного поля на территории Чуйской котловины были отобраны 8 снимков с минимальной облачностью за разные годы, примерно в одно и то же время (конец августа – начало сентября) с промежутком 3-5 лет. В Таблице 2 приведена пространственная статистика по каждому году.

Примеры пространственного распределения LST для 1989 и 2022 годов с выделенными ключевыми участками и точками мониторинга приведены на рисунке 4. Первые два снимка (1989 и 1994 гг.) относятся к периоду, когда системы орошения на исследуемой территории активно эксплуатировались, а начиная с 1995 года использование систем орошения на территории Чуйской котловины заметно сократилось, это сразу отразилось на значении стандартного отклонения (σ стало меньше 4,5, хотя в 1989 и 1994 гг. было больше 5), то есть уменьшение влажности повлекло уменьшение разброса значений LST. Построены распределения LST за 1989-2022 гг. на всех ключевых участках и подсчитаны их основные статистические показатели. На рисунке 5 приведены графики среднеквадратических отклонений по годам.

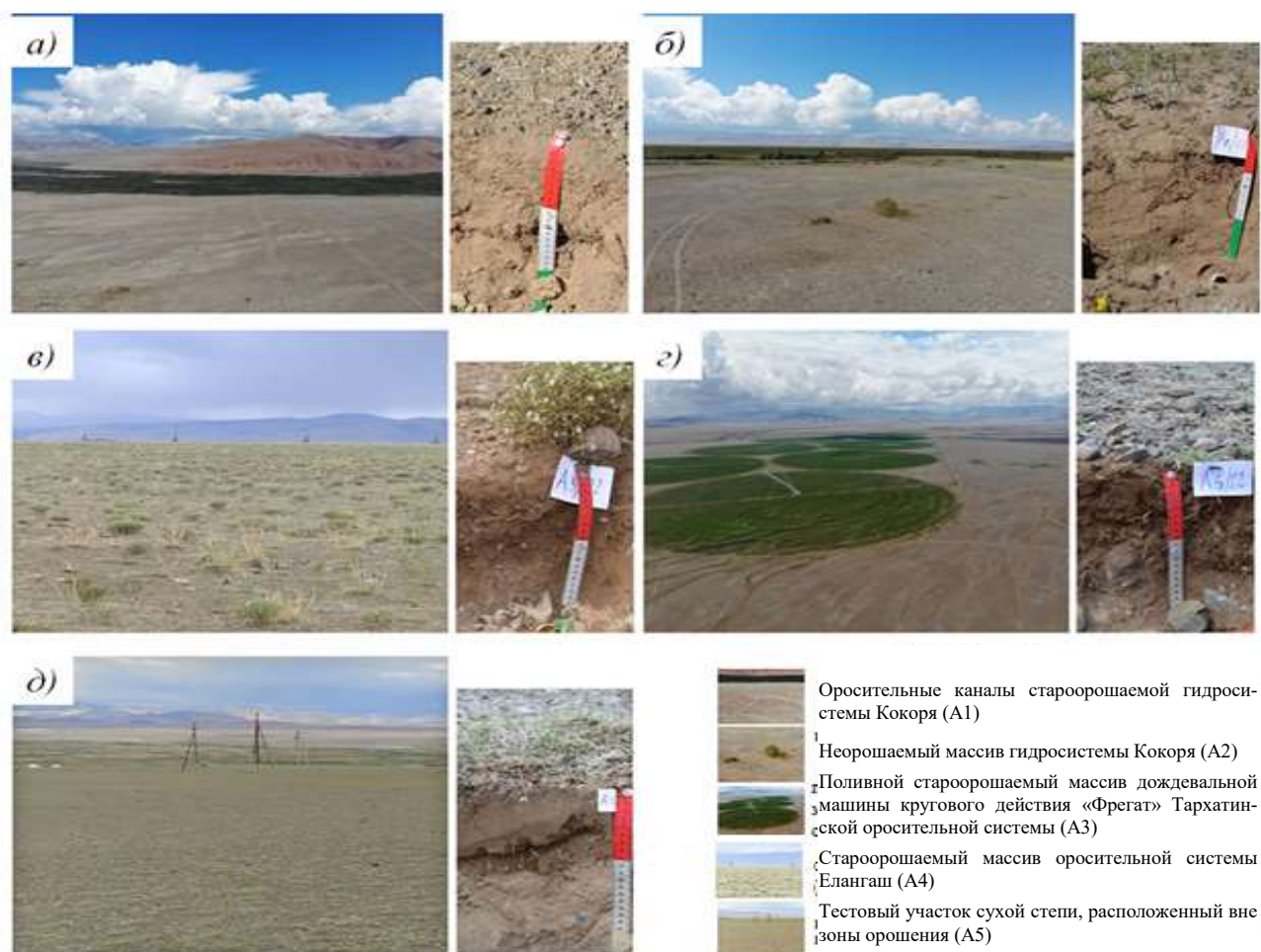


Рис. 2. Ключевые участки спутникового и наземного температурного мониторинга почв Чуйской степи. Староорошаемый (а) и неорошаемый (б) массивы гидросистемы Кокоря; староорошаемые массивы Тархатинской (в) и Елангашской (г) оросительных систем; контрольный участок сухой степи (д), расположенный вне зоны орошения.

Табл. 1. Результаты статистической обработки.

	MBE	μ	σ_{μ}	RMSE	R
A1 (N = 6)					
L2SP	-0.96	-0.66	0.61	1.42	0.99
LST_er	-0.31	0.01	0.81	1.24	0.99
LST_sob	0.18	0.44	0.80	1.21	0.99
A2 (N = 6)					
L2SP	-6.27	-7.17	0.72	6.53	0.98
LST_er	-5.60	-6.23	1.01	5.85	0.99
LST_sob	-5.03	-5.67	1.02	5.32	0.99
A3 (N = 7)					
L2SP	-5.34	-5.32	0.14	5.56	0.98
LST_er	-4.39	-4.50	0.83	4.67	0.99
LST_sob	-4.09	-4.27	0.92	4.38	0.99
A4 (N = 7)					
L2SP	-4.52	-4.51	0.95	4.69	0.99
LST_er	-3.91	-4.63	0.13	4.12	0.99
LST_sob	-2.92	-3.47	0.16	3.18	0.99
A5 (N = 6)					
L2SP	-2.40	-2.80	0.89	2.74	0.99
LST_er	-1.74	-2.42	0.54	2.28	0.99
LST_sob	-0.79	-1.45	0.54	1.63	0.99

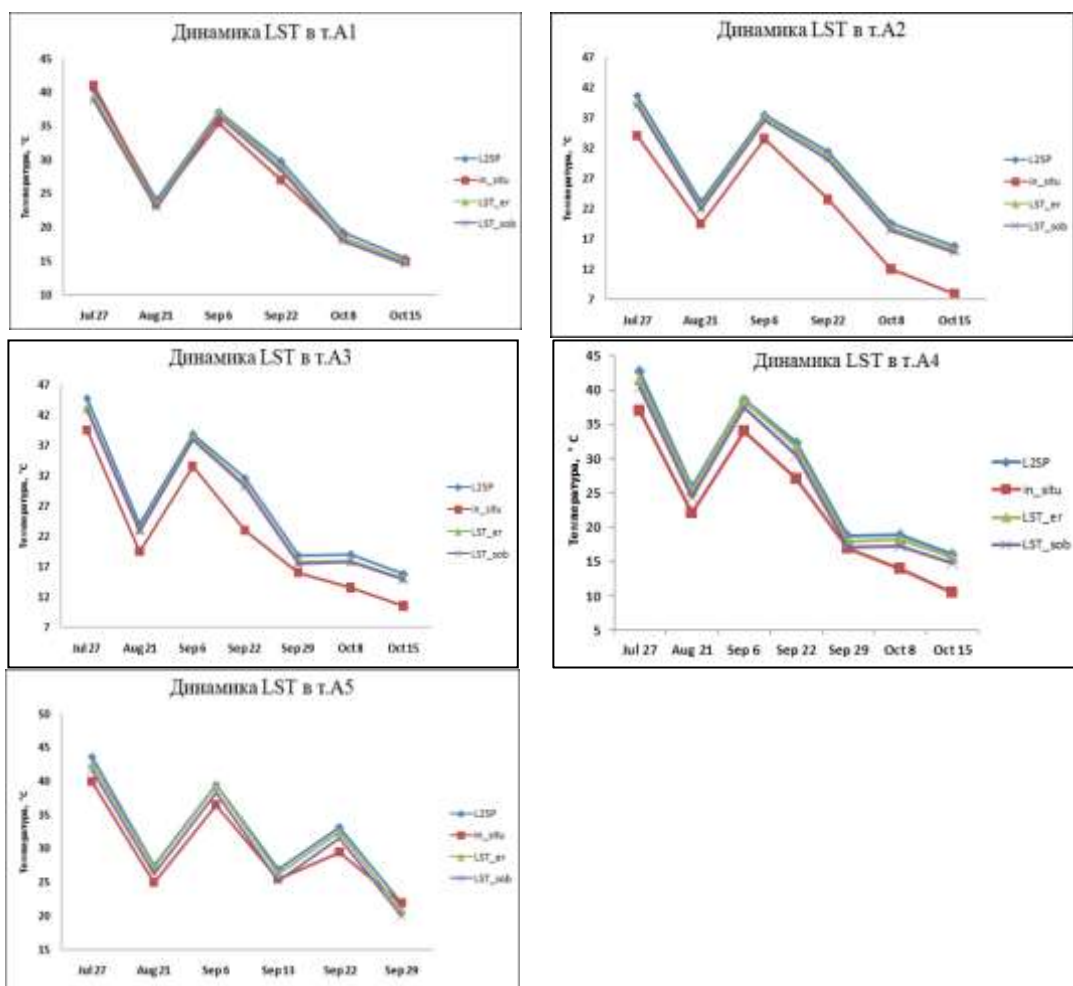


Рис. 3. Динамика температуры в точках мониторинга за период 17.07.2022–27.10.2022.

При изучении теплового и водного режимов территорий, изучении динамики влажности методами дистанционного мониторинга одной из важных задач является установление связи между температурой поверхности LST и индексами влажности NDMI, NDWI и индексом растительности NDVI [23-26], которые вычисляются по формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}; \quad NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}; \quad NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Для территории Чуйской котловины и ключевых участков построены картосхемы распределений упомянутых индексов NDMI, NDWI, NDVI, а также вычислены коэффициенты корреляции, как по пространству, так и по времени с целью выявления связей между показателями влажности, растительного покрова и LST как в целом на территории котловины, так и локально на исследуемых участках с различным типом оросительных систем.

Табл. 2. Спутниковые данные и пространственная статистика снимков.

№ п/п	Дата	Спутник	Mean	Median	Max	Min	Range	σ
1	03.09.1989	Landsat 4	30.58	31.99	10.93	42.89	31.96	5.14
2	24.08.1994	Landsat 5	31.89	34.15	13.96	42.72	28.76	5.52
3	04.09.1998	Landsat 5	27.39	27.35	12.16	37.39	25.23	3.73
4	04.09.2001	Landsat 7	28.61	29.73	10.9	41.68	30.78	4.06
5	17.08.2009	Landsat 8	28.27	28.67	12.05	39.22	27.17	4.26
6	31.08.2014	Landsat 8	35.12	36.82	16.98	45.93	28.95	4.4
7	29.08.2019	Landsat 8	31.88	33.54	17.97	42.32	24.35	4.35
8	21.08.2022	Landsat 8	23.75	24.28	11.58	33.47	21.89	3.01

На рисунке 6 представлен пример распределения индексов температуры для территории Чуйской котловины для 29.08.2019. На рисунке можно увидеть связь индексов и LST. Визуально прослеживается прямая связь между распределениями (NDVI, NDMI) и (LST, NDWI) и обратная между (LST, NDMI), (LST, NDVI) и (NDVI, NDWI). Соответствующие количественные оценки приведены в таблице 3.

Видно, что все коэффициенты корреляции значимы, очень высокий коэффициент корреляции (-0.97), т.е. обратная зависимость присутствует между индексами NDVI и NDWI, что можно объяснить тем, что NDWI не позволяет выделить влагу в почве и растительности, он нацелен на выделение исключительно водных объектов.

Выводы. Таким образом, в работе предложена модификация алгоритма вычисления LST, не зависящая от покрытия территории России данными ASTER GED. Результаты экспериментального исследования показали, что предложенный алгоритм в большинстве случаев показывает наилучшую точность при валидации на основе наземных данных. Наземные данные получены с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 «Thermochron» в период с 17.07.2022 по 27.10.2022.

С использованием предложенного алгоритма построены картосхемы и исследована динамика распределения LST на территории Чуйской котловины с 1989 по 2022 гг. на основе 8 разновременных снимков. Вычислены основные статистически показатели, построены графики их динамики.

Исследована зависимость пространственного распределения LST и индексов влажности и растительности (NDMI, NDWI, NDVI), получены количественные оценки, показано наличие значимой корреляции между LST и индексами по пространству и времени.

Показано, что функционирование оросительных систем приводит к существенному изменению характера распределения значений LST как на территории Чуйской котловины в целом, так и на ключевых участках, кроме тех, которые расположены вне зоны орошения.

Таким образом, представленная в работе методика исследования распределения температур может быть использована для исследования температурных режимов обширных труднодоступных территорий.

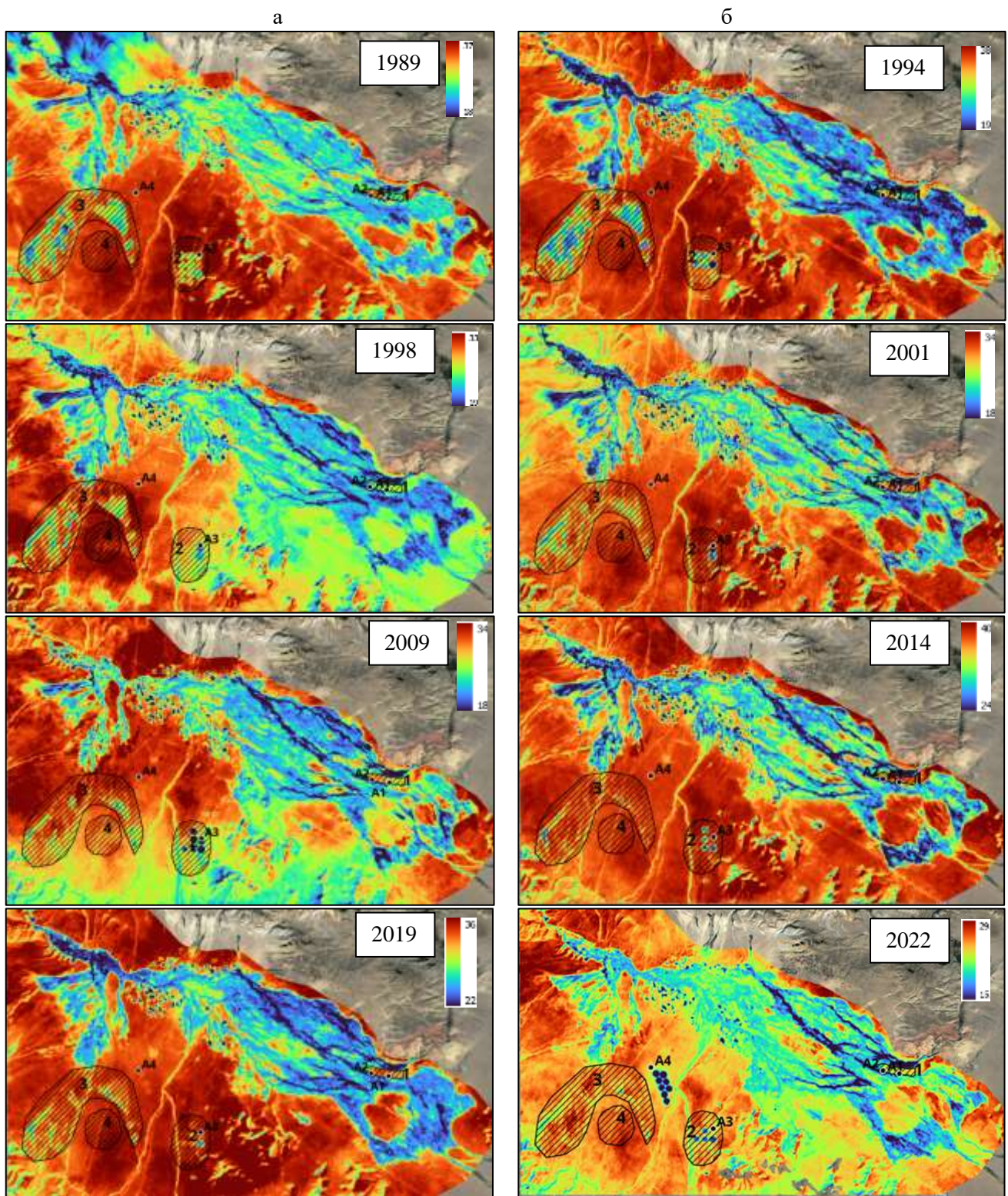


Рис. 4. Распределение температуры LST в Чуйской котловине за 1989-2022 годы и ключевые участки 1-4 (выделены штриховкой).

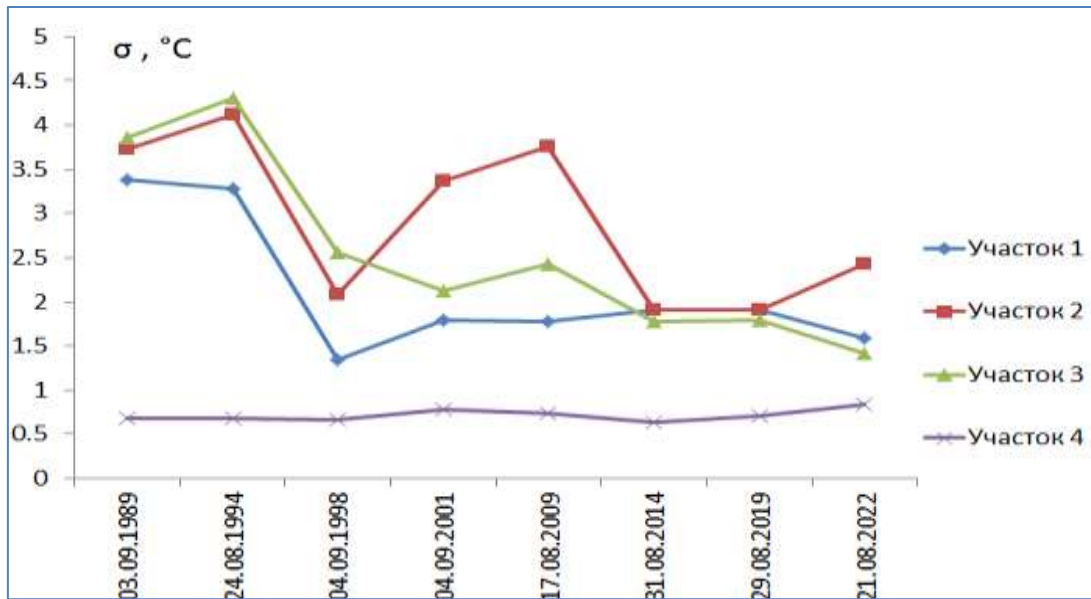


Рис. 5. Графики динамики среднеквадратичного отклонения σ для LST на ключевых участках.

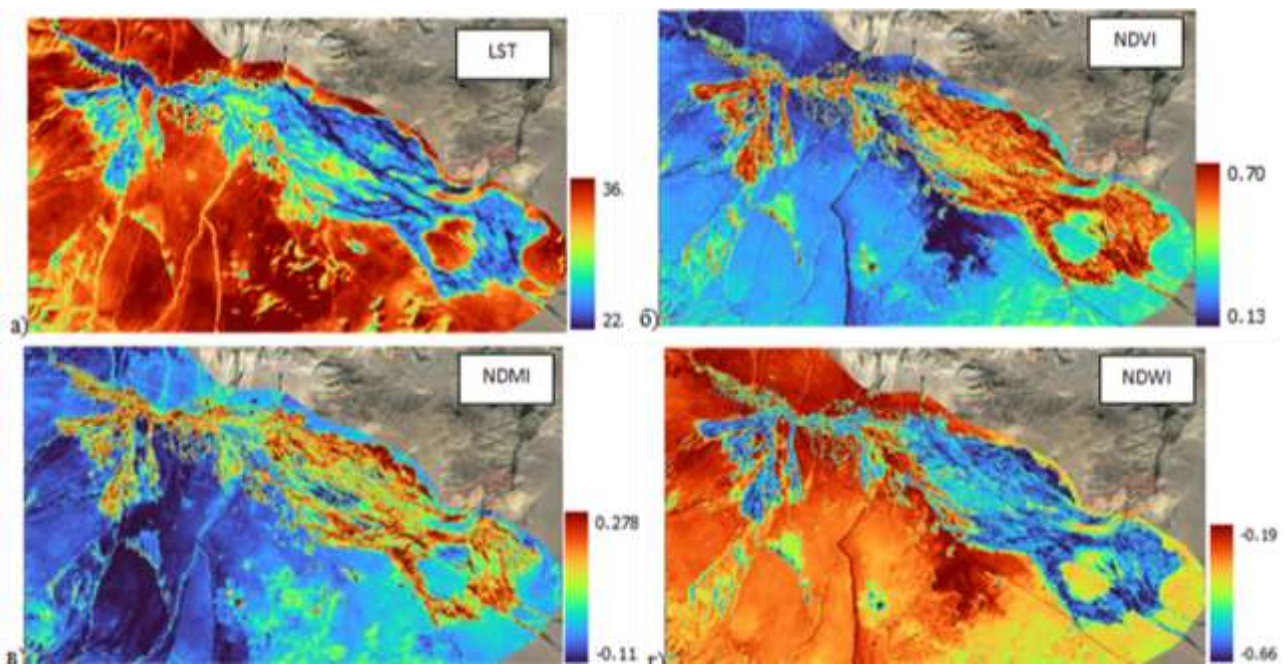


Рис. 6. Картограммы распределения LST (а) и индексов NDVI (б), NDMI (в) и NDWI (г) на территории Чуйской котловины на 29.08.2019 г.

Табл. 3. Результаты корреляционного анализа за 29.08.2019.

	LST	NDVI	NDMI	NDWI
LST	1			
NDVI	-0.75	1		
NDMI	-0.65	0.64	1	
NDWI	0.67	-0.97	-0.59	1

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cook M., Schott J.R., Mandel J., Raqueno N. Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature (LST) product from the archive // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. P. 11244-11266.
- [2] Hulley G.C., Hook S.J., Abbott E., Malakar N., Islam T., Abrams M. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): mapping Earth's emissivity at 100 m spatial scale // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 7966-7976.
- [3] Galve J.M., Sánchez J.M., García-Santos V., González-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of land surface temperature estimates from Landsat 8-TIRS in a high-contrast semiarid agroecosystem. Algorithms intercomparison // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. N. 8. P. 1843.
- [4] Dyba K., Ermida S., Ptak M., Piekarczyk J., Sojka M. Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8 // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. P. 3839.
- [5] Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I.F. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. P. 1471.
- [6] Malakar N.K., Hulley G.C., Hook S.J., Laraby K., Cook M., Schott J.R. An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: methodology and validation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. Vol. 56. P. 5717-5735.
- [7] Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. P. 1208.
- [8] Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62. P. 241-252.
- [9] Jiménez-Muñoz J., Sobrino J., Plaza A., Guanter L., Moreno J., Martínez P. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area // *Sensors*. 2009. Vol. 9. P. 768-793.
- [10] Rubio E., Caselles V., Badenas C. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm Wave band: analysis of two field methods // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 59. P. 490-521.
- [11] Caselles V., Valor E., Coll C., Rubio E. Thermal band selection for the PRISM instrument: 1. Analysis of emissivity-temperature separation algorithms // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102. P. 11145-11164.
- [12] Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Soria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. Vol. 46. P. 316-327.
- [13] Li Z.-L., Wu H., Wang N., Qiu S., Sobrino J.A., Wan Z., Tang B.-H., Yan G. Land surface emissivity retrieval from satellite data // *International Journal of Remote Sensing*. 2013. Vol. 34. P. 3084-3127.
- [14] Dash P., Göttsche F.-M., Olesen F.-S., Fischer H. Separating surface emissivity and temperature using two-channel spectral indices and emissivity composites and comparison with a vegetation fraction method // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 96. P. 1-17.
- [15] Duguay-Tetzlaff A., Bento V.A., Göttsche F.M., Stöckli R., Martins J.P.A., Trigo I., Olesen F., Bojanowski J.S., da Camara C., Kunz H. Meteosat land surface temperature climate data record: achievable accuracy and potential uncertainties // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. P. 13139-013156.
- [16] Ermida M.J., Trigo I., Bento V., da Camara C. A physically constrained calibration database for land surface temperature using infrared retrieval algorithms // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. P. 808.
- [17] Соенов В.И. Земледелие на Алтае в древности и средневековье // *Исторический опыт хозяйственного и культурного освоения Западной Сибири*. Барнаул: АлтГУ, 2003. С. 169-172.
- [18] Вдовина Т.А. Изучение оросительных систем Горного Алтая в 2003 году // *Археология и этнография Алтая*. – Горно-Алтайск: Институт алтаистики им. С.С. Суразакова, 2004. С. 116-131.
- [19] Кречетова И.М., Медведева Л.Н. Развитие мелиорации для кормопроизводства Республики Алтай // *Орошаемое земледелие*. 2020. № 3. С. 33-36.
- [20] Guillevic P., Göttsche F., Nickeson J., Hulley G., Ghent D., Yu Y., Trigo I., Hook S., Sobrino J.A., Remedios J. et al. Land surface temperature product validation best practice protocol // *Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation*. Version 1.1. – Land Product Validation Subgroup, 2018. P. 58. URL: https://lpvs.gsfc.nasa.gov/PDF/CEOS_LST_PROTOCOL_Feb2018_v1.1.0_light.pdf.
- [21] Duan S.-B., Li Z.-L., Zhao W., Wu P., Huang C., Han X.-J., Gao M., Leng P., Shang G. Validation of Landsat land surface temperature product in the conterminous United States using in situ measurements

- from SURFRAD, ARM, and NDBC sites // *International Journal of Digital Earth*. 2021. Vol. 14. P. 640-660.
- [22] Wang M., Zhang Z., Hu T., Liu X. A practical single-channel algorithm for land surface temperature retrieval: application to Landsat series data // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. Vol. 124. P. 299-316.
- [23] Taloor A., Mandas D., Kothiyari G. Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data // *Applied Computing and Geosciences*. 2021. Vol. 9. P. 100051.
- [24] Halder S., Bhattacharya S., Roy M.B., Roy K.P. Assessment of drought using multi-parameter indices // *Advances in Water Resources Management for Sustainable Use*. 2021. P. 243-255.
- [25] Чинь Л.Х., Заблоцкий В.Р., Дао К.Х. Изучение многолетней динамики влажности почвы района Бак Бинь (провинция Бинь Тхуан, Вьетнам) по данным многозональной спутниковой съёмки Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 89-101.
- [26] Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Кухарский А.В., Зейлигер А.М., Ермолаева А.М. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 108-136.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА БАЗЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТРАСЛЮ

Меденников В.И.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва

Цифровизация сельского хозяйства, превратившая его в индустриальное производство остро поставила вопрос о разработке методов оценки экономического эффекта инвестиций в такой новый актив, как технологии точного земледелия и дистанционного зондирования Земли, для чего представлена авторская математическая модель оценки применения данных технологий. Обсуждены условия и возможные варианты использования данной модели с целью научно-обоснованного подхода к развитию указанных технологий в стране.
Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, сельское хозяйство, цифровая платформа управления, математическая модель.

MATHEMATICAL EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF EARTH REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE ON THE BASIS OF A UNIFIED DIGITAL PLATFORM FOR INDUSTRY MANAGEMENT

Medennikov V.I.

Federal Research Center «Computer Science and Control» RAS, Moscow

The digitalization of agriculture, which has turned it into industrial production, has sharply raised the issue of developing methods for assessing the economic effect of investments in such a new asset as precision farming and remote sensing technologies, for which the author's mathematical model for evaluating the use of these technologies is presented. The conditions and possible options for using this model were discussed with the aim of a scientifically based approach to the development of these technologies in the country.

Keywords: Earth remote sensing, agriculture, digital control platform, mathematical model.

Введение. С самого начала появления технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) они, наряду с применением в военных целях, стали активно использоваться и в сельском хозяйстве из-за значительного его пространственного характера. Однако, в начальном периоде своего применения данные ДЗЗ на практике использовались только в виде снимков. Например, при формировании научно-исследовательского института кибернетики агропромышленного комплекса в 1985 г. ему досталось подразделение ДЗЗ, имевшее на балансе три самолета Ту-134 с новейшим французским оборудованием. Анализ же эффективности деятельности этого подразделения показал, что предоставление аэрофотоснимков сельскохозяйственных полей руководству хозяйств, районов, регионов не вызывало особого интереса, поскольку эти снимки требовали дешифровки, пояснений их высококлассными специалистами. Руководству же в силу лимита времени нужны были готовые варианты для принятия решений, а также централизованная ретроспектива, динамика, прогноз, для чего данные ДЗЗ нужно было накапливать в некоторой базе данных (БД) с динамическим рядом наблюдений. Лишь с появлением геоинформационных систем (ГИС) с мощными БД наряду с совершенствованием всего спектра программно-аппаратного обеспечения ДЗЗ началось широкое применение технологий ДЗЗ в отрасли. Лидером по применению данных технологий оказалось точное земледелие (ТЧЗ).

Анализ накопленного опыта использования технологий ТЧЗ в мире показывает, что данные ДЗЗ дают возможность решить множество различных задач по выращиванию растений, но их применение требует привлечения значительного объема научной и дополнительной производственной информации, накопленной в результате производственной деятельности с необходимой интеграцией ее с датчиками, оборудованием и исполнительными механизмами,

устанавливаемыми на сельскохозяйственную технику [1-5]. Таким образом, суть ТЧЗ заключается в интеграции новых агротехнологий и высокоточного позиционирования на основе технологий ДЗЗ, в результате которой за счет создания оптимальных условий роста и развития культур в пределах границ экологической безопасности цифровые технологии ТЧЗ дают возможность получать максимально возможное количество продукции, отвечающей ряду необходимых требований по качеству, цене и безопасности.

Поэтому индустриализация сельского хозяйства в сочетании с цифровой трансформацией его остро поставило вопрос о разработке математических методов оценки эффективности инвестиций в такой высокочрезвычайно актив, как технологии ТЧЗ и ДЗЗ. С учетом этого в работе рассматриваются поднятые выше проблемы на основе методов математического моделирования.

Проблемы оценка эффективности применения технологий ДЗЗ в сельском хозяйстве. В качестве примера активного использования технологий ТЧЗ на базе ДЗЗ можно привести практику их применения в США. Так, технологиями ТЧЗ пользуются около 40-50% ферм, что составляет около 40% мирового рынка. Среди наиболее востребованных технологий ТЧЗ являются следующие: 90% ферм пользуются приборами экспресс-анализа почвы; 80% ферм применяют в полевых работах космическую навигацию техники с мониторинговыми технологиями урожайности и соответствующим картированием ее; 60% ферм вносят удобрения прецизионно, то есть дозированно в соответствии с агрохимическими характеристиками участков полей и потребностями культурных растений; 30% ферм используют ряд вегетативных индексов, в частности, рассчитанных на основе данных ДЗЗ по спутниковым снимкам. В ЕС также почти все государства начинают применять отдельные технологии ТЧЗ и ДЗЗ. А лидером в данном направлении является Германия [6].

Большой интерес к ТЧЗ в развитых странах продиктован все более усложняющимися и дорогими традиционными технологиями повышения эффективности и качества продукции отрасли, поэтому в ее цифровизации многие видят дальнейший путь развития. В России же ситуация противоположная – потолок традиционных факторов повышения производства еще не скоро будет достигнут. Поэтому цифровизация должна рассматриваться в одном ряду с другими факторами: выведение более продуктивных сортов растений, изобретение более энергоэффективной сельскохозяйственной техники, создание оптимальной агротехнологической системы ведения сельского хозяйства, появление эффективных средств защиты и питания растений. В силу этого, а также высокой стоимости цифровых технологий, сложности в освоении высокотехнологических средств цифровых технологий, отсутствия квалифицированных кадров в стране, незначителен так называемый «социальный заказ» на цифровую трансформацию отрасли, в том числе, и на технологии ТЧЗ и ДЗЗ. Тем не менее, и в российском сельском хозяйстве также начали применяться отдельные цифровые технологии в ТЧЗ с использованием ДЗЗ [7]. Например, можно назвать такие компании.

Компания DatumGroup на основе геоинформационной системы (ГИС) помогает сотрудникам ростовского министерства с/х следить за состоянием культур в онлайн-режиме с расчетом индекса NDVI и формированием прогноза их урожайности.

Компания «Совзонд» с использованием ГИС «Геоаналитика.Агро» снабжает данными ДЗЗ со спутников Landsat 8, Sentinel-1 и Sentinel-2 и сервиса RapidEye информацией в области агрометеорологии для анализа в оперативном режиме.

Представленная на рынке ГИС «КосмосАгро» представляет облачную технологию анализа спутниковых данных ДЗЗ для использования нескольких вегетационных индексов, для мониторинга состояния угодий с прогнозом урожая, динамики выполнения работ на полях. При необходимости предоставляется возможность картирования полей, диагностики раннего выявления болезней и вредителей растений.

Организация «ЦентрПрограммСистем» уже наряду с решением задач указанных компаний осуществляет интеграцию данных ДЗЗ с наземными данными хозяйств для учетных задач не только в агрономии, но и транспортных, механизированных, плановых и бухгалтерских подразделениях на основе систем GeoServer и «1С: Предприятие 8».

Организация «ПанорамаАгро» на основе ГИС предлагает комплексную автоматизацию системы управления растениеводством на базе сервиса навигации GPS/ГЛОНАСС, обработанных мультиспектральных снимков с расчетом индексов вегетации по полям, мониторинга состояния сельскохозяйственной техники и ее движения.

Есть также группа компаний, например, «ГИС для сельского хозяйства», «ГрадоСервис», ГИС «Полис-5», ИАС «ГЕО-Агро» и др., предлагающих набор программных средств для формирования БД отдельных показателей полей на основе ГИС: химических, физических, значений урожайности, баланса вносимых и выносимых удобрений, учетных операций, осуществленным на основе технологий ТЧЗ, перемещения всей техники, включая автотранспорт, результатов пробоотбора почв, данных о погоде и ряда другой информации. Онтологические же модели БД вышеперечисленных систем, как правило, гетерогенны и являются неполными подмножествами некоторой идеальной концептуальной информационной схемы растениеводства, что в дальнейшем существенно усложнит в процесс интеграции аграрных информационных ресурсов (ИР) в единую цифровую технологическую платформу ДЗЗ и ТЧЗ в стране. Кроме того, онтологическая несовместимость, как по ИР, так и по алгоритмам, которые отданы на откуп производителям, указанных выше разработок не позволяет разработать и единую методику оценки многих цифровых технологий, в частности, и эффективности применения технологий ДЗЗ.

Для устранения онтологической несовместимости ИР и алгоритмов российских продуктов воспользуемся результатами разработанной экономико-математической модели формирования цифровых платформ управления (ЦПУ) экономикой агропромышленного комплекса [8, 9]. Модель позволила выделить ряд цифровых подплатформ, одна из них представляет облачный сервис сбора и хранения пооперационной первичной учетной информации всех предприятий в единой БД в следующем виде: вид и объект операции, место осуществления, субъект проведения, дата и интервал времени проведения, задействованные средства производства, объем и вид потребленного ресурса, качество операции. Вторая – также облачный сервис единой БД технологического учета всех предприятий. И уже на их основе была сформирована единая онтологическая информационная модель растениеводства с выделением 240 функциональных управленческих задач с единым описанием алгоритмов также для большинства товарных сельскохозяйственных организаций.

Математическая модель оценки эффективности применения технологий ДЗЗ в сельском хозяйстве на базе единой ЦПУ. С учетом приведенных выше рассуждений для разработки искомой математической модели сделаем еще несколько следующих предположений.

1. Считаем, что внедрением технологий ТЧЗ будут заниматься лишь прибыльные предприятия.
2. Все они разбиваются на группы, определяемые в соответствии со специализацией хозяйственной деятельности [10].
3. Все рассматриваемые предприятия в соответствии с общим объемом оборота продукции разбиваются на классы доходности с шагом 5 млн. рублей для более детального анализа уровня внедрения технологий ТЧЗ.
4. На основании исследований консалтинговой компании Gartner будем считать, что затраты предприятий на ИТ составляют около 0,5% от оборота [11]. Так, были выделены три группы предприятий по затратам на информационные технологии в зависимости от оборота компаний.
5. Считаем, что задачи, входящие в ТЧЗ, ранжированы по степени важности для очередности их покупки для каждой группы предприятий. Данное предположение основано на результатах мониторинга процесса информатизации трехсот лучших агропромышленных предприятий и анализа рынка программных средств России.
6. Считаем, что затраты предприятий на цифровую трансформацию сосредотачиваются на внедрении технологий ТЧЗ, то есть не будем учитывать затраты на остальные виды деятельности. Это необходимо, чтобы не потерять общности цели исследований.

Тогда введем обозначения: i – номер задачи, реализующей функцию ТЧЗ в виде прикладной программы, $i \in I_l$, $I = \sum I_l$; l – индекс, идентифицирующий технологию ТЧЗ, $l \in L$; j – индекс, идентифицирующий специализацию группы предприятий, $j \in J$; I_j – ранжированные задачи, необходимые предприятиям из группы j , $i \in I = \bigcup_{j \in J} I_j$; k – индекс, идентифицирующий класс доходности предприятия, $k \in K$; n_{jk} – количество предприятий из группы j в классе доходности k , $n_{jk} \in N$; a_{ijml} – инвестиции в оборудование, обучение персонала, реорганизацию системы управления на один га угодий, необходимых для решения i -й задачи m -го предприятия j -й группы l -й технологии ТЧЗ, $m \in N_{jk}$; q_{ijl} – годовая стоимость сопровождения оборудования на один га угодий, необходимых для решения i -й задачи j -й группы l -й технологии ТЧЗ; t – номер текущего года; S_m – площадь угодий m -го предприятия; p_{ijl} – стоимость прикладной программы, необходимого для решения i -й задачи j -й группы l -й технологии ТЧЗ; b_{ijl} – стоимость внедрения прикладной программы, необходимой для решения i -й задачи j -й группы l -й технологии ТЧЗ; r_{ijl} – годовая стоимость сопровождения прикладной программы, необходимой для решения i -й задачи j -й группы l -й технологии ТЧЗ; f_{jl} – годовая стоимость снимков ДЗЗ (на га), необходимых для j -й группы l -й технологии ТЧЗ; h_{jl} – годовая стоимость дешифровки снимков ДЗЗ (на га), необходимых для j -й группы l -й технологии ТЧЗ; d_{jk}^t – количество средств, выделенных на внедрение технологий ТЧЗ в группе j класса доходности k в t -м году; d_{jkl}^t – количество средств, выделенных на внедрение технологий ТЧЗ в группе j класса доходности k в t -м году l -й технологии ТЧЗ; I_{jk}^t – количество прикладных программ, внедренных в группе j классе доходности k к t -му году, включая t -й год; I_{jkl}^t – количество прикладных программ, внедренных в группе j классе доходности k к t -му году, включая t -й год l -й технологии ТЧЗ; MO_{jk}^t – объем инвестиций в оборудование, обучение персонала, реорганизацию системы управления в группу j класса доходности k к t -му году, включая t -й год; MO_{jkl}^t – объем инвестиций в оборудование, обучение персонала, реорганизацию системы управления в группу j класса доходности k к t -му году, включая t -й год l -й технологии ТЧЗ; Z_{jk}^t – затраты предприятий на цифровую трансформацию в t -м году группы j класса доходности k .

Введем величину $g_{jl}^t = 1$, если $\sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^t} p_{ijl} > 0$, 0 – иначе;

Тогда затраты на приобретение прикладных программ, оборудования, снимков ДЗЗ, сопровождение и внедрение их, а также обучение персонала, реорганизацию системы управления в t -м году в группе j класса доходности k к t -му году l -й технологии точного земледелия выглядит следующим образом:

$$\Delta d_{jkl}^t = n_{jk} \sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^t} p_{ijl} + n_{jk} \sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^t} (b_{ijl} + r_{ijl}) + \sum_{m=1}^{n_{jk}} \sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^t} a_{ijml} S_m + n_{jk} \sum_{m=1}^{n_{jk}} \sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^t} q_{ijl} S_m + \sum_{m=1}^{n_{jk}} g_{jl}^t (f_{jl} + h_{jl}) S_m$$

Затраты же на сопровождение прикладных программ, оборудования, приобретение снимков ДЗЗ, функционирующих к началу t -го года запишутся в виде:

$$d_{jkl}^{t-1} = n_{jk} \sum_{i=1}^{I_{jk}^{t-1}} (b_{ijl} + r_{ijl}) + n_{jk} \sum_{m=1}^{n_{jk}} \sum_{i=I_{jk}^{t-1}}^{I_{jk}^{t-1}} q_{ijl} S_m + \sum_{m=1}^{n_{jk}} g_{jl}^{t-1} (f_{jl} + h_{jl}) S_m$$

Тогда с учетом оговорки, что затраты предприятий на цифровую трансформацию сосредотачиваются на внедрении технологий ТЧЗ, выражение Z_{jk}^t определяется следующим образом

$$Z_{jk}^t = (d_{jk}^{t-1} + \Delta d_{jk}^t), \text{ где } d_{jk}^{t-1} = \sum_{l=1}^L d_{jkl}^{t-1}, \Delta d_{jk}^t = \sum_{l=1}^L \Delta d_{jkl}^t$$

Ограничения на финансовые средства выглядят:

$$d_{jk}^{t-1} + \Delta d_{jk}^t \leq D_{jk}$$

Критерий эффективности производимых затрат на цифровую трансформацию предприятий в t -м году группы j класса доходности k определим как максимизацию расходования отпущенных средств: $\max_i Z_{jk}^t$ при выполнении определенных выше ограничений.

В результате решения оптимизационной задачи будут найдены величины: I_{jk}^t , I_{jkl}^t , MO_{jk}^t , MO_{jkl}^t , а также затраты на снимки ДЗЗ в году t : $fh_{jl}^t = \sum_{m=1}^{n_{jk}} g_{jl}^t (f_{jl} + h_{jl}) S_m$.

Суммируя по времени осуществления цифровой трансформации за весь период (t_0, T) , получим интегральные величины: $I_{jk}^T = \sum_t I_{jk}^t$ – количество прикладных программ, внедренных в j -й группе k -го класса доходности за рассматриваемый период; $I_{jkl}^T = \sum_t I_{jkl}^t$ – количество прикладных программ, внедренных в j -й группе k -го класса доходности l -й технологии ТЧЗ за рассматриваемый период; $MO_{jk}^T = \sum_t MO_{jk}^t$ – объем инвестиций в оборудование, обучение персонала, реорганизацию системы управления в j -ю группу k -го класса доходности за рассматриваемый период; $MO_{jkl}^T = \sum_t MO_{jkl}^t$ – объем инвестиций в оборудование, обучение персонала, реорганизацию системы управления в j -ю группу k -го класса доходности l -й технологии ТЧЗ за рассматриваемый период; $fh_{jk}^T = \sum_t fh_{jk}^t$ – затраты на снимки ДЗЗ за рассматриваемый период.

Исходя из найденных интегральных величин, можно получить аналитические выкладки по уровню цифровой трансформации отрасли в разрезах функций ТЧЗ: $W^r = (\sum_{j,k} I_{jk}^T / I) * 100\%$, отраслевой принадлежности: $W^j = (\sum_k I_{jk}^T / I_j) * 100\%$, классу доходности предприятий $W^k = (\sum_j I_{jk}^T / I) * 100\%$, технологий ТЧЗ: $W^l = (\sum_{j,k} I_{jkl}^T / I_l) * 100\%$, и так далее. Например, руководство Минсельхоза должен интересоваться уровень цифровой трансформации отрасли в разрезе информатизации функций ТЧЗ: $W^r = (\sum_{j,k} I_{jk}^T / I) * 100\%$.

Если теперь в качестве эталона взять передовое предприятие в мире со 100-процентным уровнем цифровой трансформации и с показателем эффективности W^e применения технологий ТЧЗ на базе ДЗЗ, то величина $IND = W^r / W^e$ определит российский прогнозный индекс экономической эффективности применения данных ДЗЗ в ТЧЗ.

Заключение. Последовательный переход сельского хозяйства на единую ЦПУ АПК с тиражированием на большинство предприятий отработанных технологий на базе эталонных объектов является наиболее эффективным способом цифровой трансформации отрасли. При этом произойдет значительное сокращение как времени, так и затрат на массовое внедрение технологий ТЧЗ и ДЗЗ с существенным ростом эффективности использования данных инноваций. При объединении усилий Минсельхоза, науки, ИТ-компаний, бизнеса вполне возможно в короткий срок получить перспективные цифровые технологии ДЗЗ, которые станут базовым

(эталонным) объектом для оценки экономического эффекта применения данных ДЗЗ в сельском хозяйстве. Пока же преимуществами ТЧЗ и ДЗЗ может воспользоваться незначительное количество хозяйств.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, внутренний номер 00600/2020/51896, договор № 075-15-2022-319.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Arun Kumar K.C., Obi Reddy G.P., Masilamani P., Satish Y. Turkar, Sandeep P.* Integrated drought monitoring index: A tool to monitor agricultural drought by using time-series datasets of space-based Earth observation satellites. *Advances in Space Research*, 2021, 67(1), pp. 298-315, DOI:10.1016/j.asr.2020.10.003.
- [2] *Boori M.S., Choudhary K., Kupriyanov A.V.* Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series. *Computer Optics*, 2020, 44(3), p. 409-419, DOI:10.18287/2412-6179-CO-635.
- [3] *Huang Y., Chen Z., Yu T., Huang X., Gu X.* Agricultural remote sensing big data: Management and applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(9), pp. 1915-1931, DOI:10.1016/S2095-3119(17)61859-8.
- [4] *Kägo R., Vellak P., Ehrpais H., Noorma M., Ol, J.* Assessment of power characteristics of unmanned tractor for operations on peat fields. *Agronomy Research* 2022, 20(2), pp. 261-274.
- [5] *Černilová B., Kuře J., Linda M., Chotěborský R.* Tracing of the rapeseed movement by using the contrast point tracking method for DEM model verification. *Agronomy Research* 2022, 20(3), pp. 519-530.
- [6] *Kulba V., Medennikov V., Butrova E.* Methodical Approaches to Agricultural Risk Estimate in Forecasting the Economic Effect of Applying Data of the Earth's Remote Sensing. *IEEE Xplore Digital Library. Twelfth International Conference «Management of large-scale system development» (MLSD)*. Moscow, Russia, 2019. DOI:10.1109/MLSD.2019.8911084.
- [7] *Новицкий И.* Точное земледелие: принцип работы и перспективы. <https://xn--80ajgpcpbhks4a4g.xn--p1ai/articles/tochnoe-zemledelie> (дата обращения 09.06.2023).
- [8] *Алексеева Н.А., Осипов А.К. и др.* Экономические и управленческие проблемы землеустройства и землепользования в регионе. Ижевск: Шелест, 2022. 225 с.
- [9] *Меденников В.И.* Математическая модель формирования цифровых платформ управления экономикой страны // *Цифровая экономика*. 2019, № 1, С. 25-35.
- [10] Spark. <http://www.spark-interfax.ru> (дата обращения 09.06.2023).
- [11] Куда движется волна автоматизации. <https://1-sys.ru> (дата обращения 09.04.2022).

КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ЗОН ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ

Миков Л.С.

Кемеровский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Кемерово

В работе рассмотрены вопросы комбинированного использования двух разных типов спутниковых данных для выявления зон возможных подземных пожаров в местах угледобычи. Приведен способ расчета температуры земной поверхности на основе данных Landsat-8. Продемонстрировано совместное использование карты температур поверхности с картой вертикальных смещений земной поверхности, полученной на основе обработки радарных данных.

Ключевые слова: радарные данные, мультиспектральные данные, угольный разрез, подземные пожары.

COMBINED USE OF SATELLITE RADAR AND MULTISPECTRAL DATA TO IDENTIFY POSSIBLE ZONES OF UNDERGROUND FIRES

Mikov L.S.

Kemerovo Branch of the Federal Research Center of the Information and Computational Technologies,
Kemerovo

The paper considers the issues of combined use of two different types of satellite data to identify areas of possible underground fires in coal mining areas. A method for calculating the temperature of the earth's surface based on Landsat-8 data is given. The joint use of a surface temperature map with a map of vertical displacements of the Earth's surface obtained on the basis of radar data processing is demonstrated.

Keywords: radar data, multispectral data, coal mine, underground fires.

Введение. В настоящее время, несмотря на развитие альтернативных технологий, основным источником получения энергии является сжигание ископаемого топлива. Значительная его доля относится к твердым видам, которые наряду с несомненными достоинствами, обладают высокой пожароопасностью, в том числе связанной с их способностью к самовозгоранию [1]. Так, например, при благоприятных условиях температура угля повышается и начинает развиваться процесс самовозгорания, заканчивающийся эндогенным пожаром. Эндогенные пожары возникают в угольных шахтах, угольных карьерах, на складах угля, в породных отвалах. Эндогенные пожары представляют большую опасность для людей и окружающей природной среды. В шахтах очаги самовозгорания могут инициировать взрывы горючих газов, угольной пыли, что сопровождается гибелью людей, разрушениями. Чрезвычайно опасны токсические газы, образующиеся при окислении и термическом разложении горючих веществ. Так, основной причиной гибели людей при пожарах является отравление оксидом углерода. В процессе самовозгорания образуются такие газы, как углекислый газ, метан, выделение которых в атмосферу приводит к парниковому эффекту, вызывая потепление. Токсичные продукты, образующиеся в эндогенных подземных пожарах, а также тепловыделение от очагов самовозгорания вызывают угнетение и гибель растительности и животных. Для предупреждения негативного влияния подземных пожаров, возникающих на угольных месторождениях, следует регулярно проводить мониторинг.

Одним из современных способов мониторинга является использование спутниковых данных. Например, мультиспектральные данные позволяют получить температуру поверхности, а радарные данные – вертикальные смещения земной поверхности (просадки). В данной

работе мы рассмотрим комбинированное использование таких данных, предполагая, что подземные пожары могут быть в местах с повышенной температурой поверхности и в зонах просянок [2].

Исходные данные. В качестве объекта исследования была выбрана территория разреза «Бачатский». Для расчетов смещений земной поверхности было отобрано 8 радиолокационных изображений с космического аппарата Sentinel-1B за период с 01.05.2022 по 22.09.2022 гг. с периодичностью съемки от 12 до 24 дней. Для расчета температуры поверхности использовалось 2 мультиспектральных снимка с датами съемки 09.08.2022 и 22.07.2021. Второй снимок использовался для проверки расчетных значений температур и температур с метеостанции.

Обработка и результаты. На начальном этапе работы проводилась проверка корректности расчета температур поверхности по данным Landsat-8. Для этого было отобрано спутниковое изображение на территорию г. Киселевска. На данной территории расположена метеостанция, данные с которой были приняты за эталонные. Замеры осуществляются каждые 10 минут. Значения температуры поверхности (LST) были получены на основе мультиспектрального снимка Landsat-8 с датой съемки 22.07.2021, и местным временем съемки 12 часов 11 минут. Общая схема расчета температуры [3] поверхности представлена на рисунке 1.

В результате расчетов были получены следующие значения температуры (таблица 1).

Таким образом, разница температур, измеренных дистанционным и наземным способом составила 0,9 С°. Стоит учесть, что дистанционно измерялась температура поверхности, а наземным способом – температура воздуха на высоте 2 метра. Однако, все это показывает довольно высокую точность измерения с использованием спутниковых изображений Landsat-8.

Далее производился расчет вертикальных смещений земной поверхности на исследуемом полигоне. Для этого было обработано 8 радарных изображений с помощью метода SBaS. В результате была построена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (рис. 2).

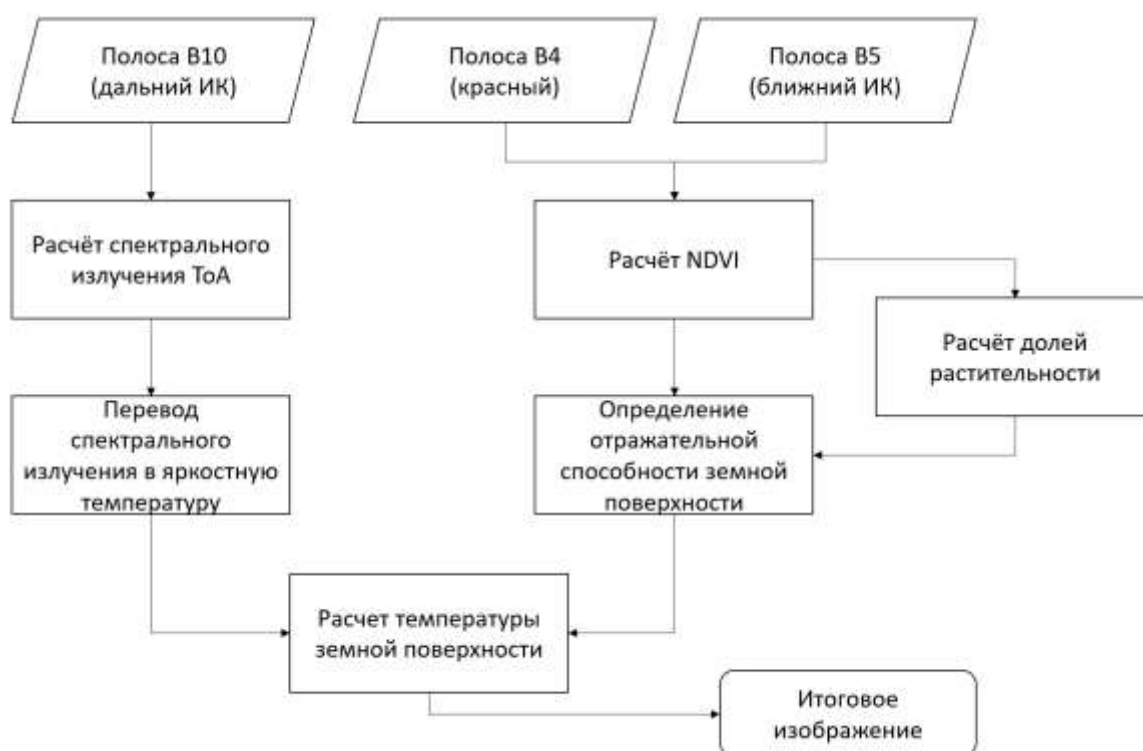


Рис. 1. Общая схема расчета температуры поверхности по данным Landsat-8

Табл. 1. Значения температуры в месте установки метеостанции.

По данным Landsat-8 (С°) 12:11	По данным метеостанции, 12:10	Температура воздуха (архив http://www.pogodaiklimat.ru) в 13:00
+26,56	+27,46	+26



Рис. 2. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений, разрез «Бачатский», 1.05.2022 – 22.09.2022 г.

Карта представляет собой точечный векторный файл, содержащий 64253 точки, каждая из которых имеет набор атрибутов. Например, значение скорости, географические координаты, когерентность, значение смещение на каждую дату исходного снимка и другие. Красным цветом отмечены точки, где регистрируются поднятия земной поверхности, синим – просадки, желтым – стабильные участки. Значения смещений (максимальные и минимальные) составляют от -366 мм/год до +299 мм/год.

После этого производился расчет температуры по данным Landsat-8 с использованием схемы, указанной на рисунке 1. Все расчеты производились в программе QGIS с помощью калькулятора растров. В результате была получена следующая карта температур (рис. 3).

Максимальные значения температур (30-31 С°) регистрируются на бортах отвалов. Минимальные (11-12 С°) – на территориях с растительностью.

Для определения зон возможных подземных пожаров карты температур и вертикальных смещений (рис.2-3) совмещались. Полученное комбинированное изображение представлено на рисунке 4.

В итоге было выявлено два участка (1 и 2 на рис. 4), где одновременно регистрируются просадки земной поверхности и высокие температуры. Оба участка находятся на бортах отвалов. Значения обоих показателей представлены в таблице 2.

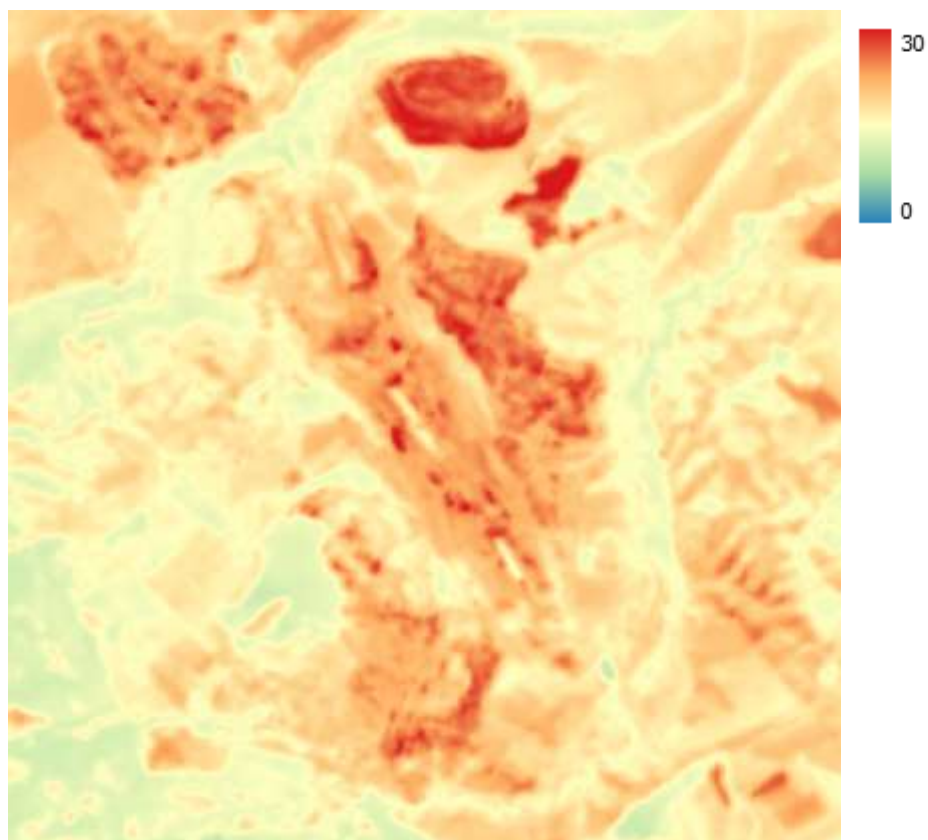


Рис. 3. Карта температур поверхности, разрез «Бачатский», 09.08.2022 г. (значения в градусах Цельсия).

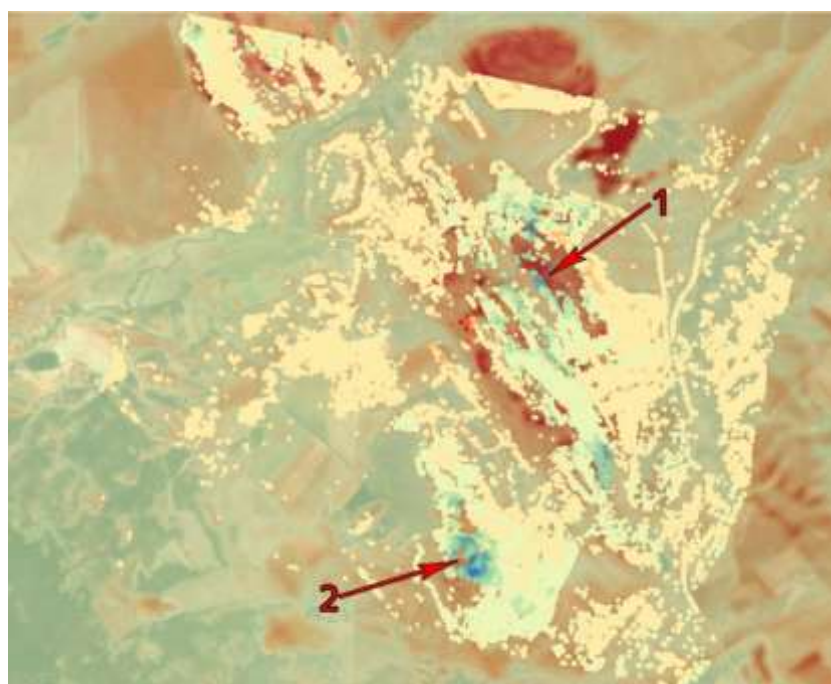


Рис. 4. Комбинированное изображение карты температуры и карты средних скоростей изменения вертикальных смещений. Разрез «Бачатский».

Табл. 2. Значения температуры и средний скорости изменения смещений.

№ участка	Температура (С°)	Средняя скорость изменения вертикальных смещений (мм/год)
1	29	-290
2	24	-350

Заключение. Таким образом комбинированное использование радарных и мультиспектральных данных позволяет получать новую информацию о процессах, происходящих в земной поверхности. В частности, предложенный подход позволяет определять зоны возможных подземных пожаров в местах угледобычи. В дальнейшем такой термо-геомеханический мониторинг может стать основой для разработки мероприятий, направленных на увеличение безопасности проводимых горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Стась Г.В., Волберг А.В., Смирнова Е.В., Ганин М.П.* Риск самовозгорания угля и опасность эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 93-103.
- [2] *Liu J., Wang Y., Yan S., Zhao F., Li Y., Dang L.* Underground Coal Fire Detection and Monitoring Based on Landsat-8 and Sentinel-1 Data Sets in Miqan Fire Area, XinJiang // Remote Sensing. 2021. 24 p.
- [3] *Avdan U., Jovanovska G.* Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data // Journal of Sensors. 2016. 8 p.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Ничепорчук В.В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Предложены новые подходы к оцениванию территориальных рисков. Реализация информационной поддержки управления безопасностью показана в виде элементов системной модели, описывающей свойства и отношения задач управления, информационных ресурсов, технологий и функций информационно-аналитических сервисов. Показана необходимость трансформации комплексного мониторинга обстановки и системы сбора данных о характеристиках защищаемых объектов для повышения эффективности мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: безопасность территорий; комплексный мониторинг; информационная поддержка управления; интеллектуальные технологии; многокритериальный анализ данных.

ORGANIZATIONAL PRINCIPLES OF COMPREHENSIVE MONITORING THE TERRITORIES SAFETY

Nicheporchuk V.V.

Institute of Computation Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

Effective management of territorial risks requires new method of information support. Conceptually, it is described by sets of elements of the system model. These are management tasks, information resources, technologies, functions of information and analytical services, properties and relationships of elements. Transformation of the structures of the collected data will allow to develop integrated analytical models, to describe in detail the business processes of emergency prevention.

Keywords: territorial safety; integrated monitoring; management information support; intelligent technologies; multi-criteria data analysis.

Введение. Информационное обеспечение управление природно-техногенной безопасностью базируется на результатах комплексного мониторинга состояния окружающей среды, контроля объектов техносферы. Оценка территориальных рисков включает данные о характеристиках защищаемых объектов, показатели социосферы [1]. В последние годы для обозначения объекта исследований безопасности широко используется термин «социально-природная система», подразумевающий рассмотрения трёх сфер и их взаимодействие [2]. Поскольку устоявшегося определения С-П-Т системы не существует, в настоящей работе используется следующая формулировка. С-П-Т система – отдельная территория, выделенная по административным, географическим, экономическим и иным признакам, состоящая из множества гетерогенных элементов, динамика которых может определяться системой иерархически организованных показателей, описывающих нормальные и экстремальные состояния элементов и использующихся для оценивания рисков. На основе оценивания рисков реализуются превентивные мероприятия по обеспечению безопасности С-П-Т системы, а соответствие значений рисков приемлемым уровням является необходимым условием устойчивого развития С-П-Т системы.

Из этого следуют задачи сбора, обработки данных комплексного мониторинга и их применение управления безопасностью сложных систем. Для объективной оценки территориальных необходимо интегрировать большой объём разноформатных междисциплинарных данных, большинство из которых имеет признаки субъективности. Это касается экспертных оценок, использующихся для приведения гетерогенных данных к единой шкале измерения, оценок масштабов и ущербов от чрезвычайных ситуаций (ЧС) и прочих опасных событий [3].

Даже данные о потерях имеют субъективный характер, поскольку не выработано единых критериев отнесения людей к пострадавшим и погибшим в ЧС, а критерии учёта периодически изменяются. Установление и продолжительное использование стандартов сбора и обработки данных позволяет повысить доверие к оценкам рисков, что является критически важным при принятии решений о проведении предупредительных мероприятий.

С точки зрения системного подхода цифровизация сферы обеспечения безопасности территорий информационная поддержка управления представляет собой замкнутый цикл. Основные его элементы – сбор данных о состоянии и характеристиках С-П-Т систем, расчёт рисков, обоснование и контроль проведения мероприятий по управлению рисками, оценка эффекта – логически увязываются с помощью аналитических и ситуационных моделей. На практике большинство работ ограничиваются сбором фрагментарных данных мониторинга с последующим расчётом и визуализацией территориальных рисков [4]. Получаемые при этом картограммы рисков, иллюстрирующие изотропное распределение опасностей в пределах административных границ далеки от реальности.

Преобладание субъективных факторов управления предупреждением ЧС, проведении мероприятий повышения безопасности населения и территорий в сопоставлении с объёмом расходуемых средств не даёт ожидаемый эффект. Причины сложившейся ситуации:

- ограниченная доступность данных комплексного мониторинга, невозможность воспроизведения расчётов рисков независимыми группами исследователей;
- общий характер рекомендаций о составе и объёме предупредительных мероприятий, сформированных по результатам расчётов рисков и не учитывающий специфику С-П-Т систем;
- отсутствие индикаторов оценки влияния на безопасность реализованных превентивных мер;
- дефицит научного обоснования процессов управления, отсутствие общепринятых моделей прогноза безопасности территорий на долгосрочный период, позволяющих более системно планировать стратегические мероприятия [5].

В работе представлены подходы к решению перечисленных проблем.

Проблемы применения мониторинговых данных для поддержки управления безопасностью территорий. Курс на цифровизацию управления, реализующийся на федеральном и региональном уровне, значительно изменили практику разработки и эксплуатации программных комплексов обработки данных мониторинга для поддержки управления. Централизация всех разработок в нескольких системах (Атлас рисков МЧС России, Аппаратно-программный комплекс «Безопасный город и др.) уменьшили возможность интеграции сервисов сторонних разработчиков. Изменения в законодательстве требуют получения статуса государственных для информационных систем территориального управления. Это является серьёзным препятствием внедрению разработок институтов РАН в практику управления безопасностью С-П-Т систем. Результаты оценки рисков, представленные в виде геопорталов, научных публикаций «принимаются к сведению», что слабо влияет на эффективность мер снижения рисков. В то же время, функционал государственных информационных систем направлен на сбор большого объёма информации, развитие средств динамической визуализации без увязки с потребностями предметной области.

Назрела необходимость в интеграции информационных ресурсов в федеральное хранилище данных и знаний. Это позволит:

- развивать независимые сервисы глубокой обработки данных мониторинга;
- верифицировать прогностические модели динамики безопасности территорий;
- воспроизводить оценки рисков независимыми группами исследователей;
- тиражировать лучшие практики управления с учётом особенностей С-П-Т систем.

Структура и функционал хранилища данных и знаний описываются с разной детализацией: концептуальный уровень – системная модель, затем поясняющие её уровни архитектуры, функциональных схем, описывающие процессы сбора, обмена, хранения и трансформации информационных ресурсов в управленческие решения.

Системная модель информационного обеспечения управления. Системное рассмотрение задач информационной поддержки управления территориями представляет собой многоэтапный процесс выделения элементов сложной системы с последующей их детализацией элементов и описанием логических связей. При этом используются разных методы проектирования, правила и ограничения.

Для описания бизнес-процессов подготовки управленческих решений, увязанные с ними информационные ресурсы, функции и технологии их трансформации разработана модель поддержки управления природно-техногенной безопасностью [6]. Синтаксически модель информационной поддержки управления представляется кортежем:

$$M = \langle T, L, R, IT, F, Y \rangle,$$

где T – задачи управления; L – множество лиц, принимающих решения с учётом их взаимодействия и полномочий; R – информационные ресурсы; F – функции обработки информации; IT – информационные технологии; Y – представления результатов работы систем и сервисов.

Выделены три ключевые задачи управления $T = \{t_1, t_2, t_3\}$: t_1 – выявление и реагирование на ситуации, требующих управленческих действий (повседневное управление); t_2 – реагирование на внештатные ситуации, критического и опасного характера (оперативное управление); t_3 – реагирование на оценки состояния территорий (стратегическое управление). Из элементов L строится граф ситуационного управления, большинство вершин которого являются лицами, принимающими решения, с определёнными полномочиями, ответственностью, располагаемыми ресурсами. Данные $R = O_1 \cup O_2 \cup O_3 \cup E \cup Des$, где O_1 – множество факторов реализации событий E ; O_2 – защищаемые объекты, изменяющие свои характеристики и функционирование в результате управленческих воздействий; O_3 – силы и средства, необходимые для реализации управленческих решений; Des – формализованное описание решений.

Табл. 1. Трансформация функций в зависимости от целей управления.

$F \backslash T$	Идентификация опасностей t_1	Оперативное реагирование t_2	Стратегическое планирование t_3
Сбор и актуализация данных f_1	f_{11} – получение данных мониторинга	f_{12} – ввод исходных данных для моделирования	f_{13} – получение дополнительных данных для оценки и управления безопасностью
Моделирование f_2	f_{21} – контроль выхода параметров за нормативные значения прогнозирование	f_{22} – оценивание динамики и последствий событий	f_{23} – оценка состояния безопасности территорий
Синтез решений f_3	f_{31} – формирование решений по переводу в повышенные режимы готовности	f_{32} – формирование рекомендаций по принятию экстренных мер	f_{33} – формирование рекомендаций по проведению долгосрочных мероприятий

Множество функций F систем поддержки управления: $F = \{f_1, f_2, f_3\}$, где f_1 – сбор, актуализация и предоставление доступа к данным; f_2 – вычислительное и аналитическое моделирование сложившихся ситуаций и их динамики моделирование; f_3 – синтез решений. Разнообразие задач информационной поддержки управления T приводит к необходимости использования различных информационных технологий, число которых в виду стремительного развития затруднительно определить. Ориентируясь на функции F , можно сгруппировать их по $IT = \{it_1, it_2, it_3\}$, где it_1 – технологии получения и хранения данных; it_2 – технологии анализа данных, it_3 – интеллектуальные технологии. Семантически информационная поддержка Y есть результат решения задач T с использованием информационных ресурсов R и информационных технологий IT , реализующих функции F . Реализации функций f_{ij} для задач управления t_i представлены в Таблице 1.

Информационные представления результатов работы систем Y включают тексты, таблицы; карты и графику. Их детализация зависит от T и L . Распространённые VI-платформы содержат десятки инструментов отображения результатов анализа [7]. Готовые же решения можно представить в виде множества логически связанных кортежей:

$$Des_i = \langle ID, Place, Period, O_3, Action \rangle,$$

где $Action$ – мероприятие из списка возможных; $Place$ – место проведения; $Period$ – график работ, O_3 – объекты управления – акторы; ID – идентификатор фрагмента решения для позиционирования его в общем процессе действий, выполняемых последовательно или параллельно. Такая упрощённая форма используется для протоколирования большинства решений территориальных комиссий по чрезвычайным ситуациям и пожарной безопасности. Модернизацию записи решений следует проводить с учётом баланса: с одной стороны это позволит учесть особенности управления в сложных ситуациях, с другой – усложнение форм сбора сопровождается ростом ошибочной и недостоверной информации.

Направления по совершенствованию мониторинга безопасности территорий. Принципиально процессы решения задач управления территориями не изменились с докомпьютерной эпохи. Ключевым фактором оперативного принятия решений является скорость передачи и обработки информации, а стратегического управления – объём и качество данных. Цель комплексного мониторинга заключается в интеграции разных систем наблюдений за состоянием окружающей среды, контроля функционирования объектов техносферы, сбора данных о произошедших событиях, актуализация характеристик объектов и инфраструктуры территорий с последующей трансформацией данных в элементы управленческих решений. Специфика предметной области предполагает наличие большого количества трудноизмеримых и вероятностных факторов, взаимовлияние которых можно оценить лишь экспертно. Расширение сферы применения нейронных сетей для генерации тестов делает актуальным создание обучающих выборок реальных решений различных задач управления [8].

Требования к составу первичных данных и содержание результатов их обработки показаны в Таблице 2. Они отражают состав элементов множества R .

Табл. 2. Распределение видов данных комплексного мониторинга в зависимости от задач управления.

№	Первичные данные	Содержание результатов обработки	Задача
1	Показания сенсоров	Оценка вероятности проявления факторов опасностей O_1	t_3
2	Характеристики защищаемых объектов O_2	Оценка последствий ситуации, обоснование объёмов мероприятий защиты	t_2
3		Интегральный показатель уязвимости	t_3
4	Характеристики объектов управления O_3	Оценка затрат ресурсов на ликвидацию ЧС и проведению мероприятий защиты	t_2
5		Интегральный показатель защищённости [3]	t_3
6	Реестр событий	Решения по экстренному реагированию	t_2
7		Значения опасных факторов-триггеров реализации ситуаций	t_3
8	Реестр проведённых предупредительных мероприятий	Решения по стратегическому управлению безопасностью С-П-Т систем	t_3
9	Экспертные оценки	Приведение разных показателей к единой шкале для интегральной оценки территориальных рисков	t_3

В таком виде требования к данным комплексного мониторинга представляются впервые. Например, использование только реестров событий (п.8) для оценивания территориальных рисков не снимает неопределённости принятия решений, а совместный анализ E , O_2 , O_3 позволяет сформировать конструктивные рекомендации для t_3 .

Получение данных о характеристиках защищаемых объектов O_2 , собираемых в виде паспортов безопасности территорий, возможно только через межсистемный обмен. В настоящее

время колоссальные затраты операторов дежурных смен на актуализацию информации не повышают её достоверность. Лица, принимающие решения в условиях дефицита времени, вынуждены перепроверять данные о последствиях произошедшей ЧС и прогнозе обстановки по альтернативным источникам.

Использование федерального реестра предупредительных мероприятий (п.8) в решении задачи t_3 позволит тиражировать положительные практики управления рисками. Доступность экспертных оценок (п.9) даст импульс развитию исследований по их уточнению и замещению на многокритериальный анализ больших данных. Приоритетом решения задачи t_1 является раннее предупреждение об угрозах и опасностях [8]. Несмотря на большое количество публикаций в области прогнозирования ЧС практика их применения ограничивается локальными моделями динамики конкретного показателя опасности на небольшой период. Создание федеральных облачных сервисов должно предусматривать помимо организации межведомственного информационного обмена интеграцию методик обработки мониторинговых данных.

Структурные схемы представления данных комплексного мониторинга подробно изложены в [9]. Стандартизация процессов сбора и хранения данных позволит избежать неверных решений при создании единого информационного пространства обеспечения территориальной безопасности. Процесс разработки сервисов поддержки управления и взаимодействия исследователей и структур, обеспечивающих безопасность С-П-Т систем, показан на Рисунке 1.



Рис. 1. Фрагмент жизненного цикла информационно-управляющих систем мониторинга.

Заключение. Оценка и управление рисками С-П-Т систем относятся к числу сложных беспрецедентных проблем, концентрации знаний, необходимости усвоения разноплановой информации для принятия решений. Практика создания больших систем, разрабатываемых длительное время не работает в современных условиях. Необходимы адаптивные, легко настраиваемые приложения, ориентированные на накопление и повторное использование интеллектуального капитала.

Подходы к проектированию систем, переформатированию комплексного мониторинга, внедрение компактных представлений объектов и процессов являются необходимыми элементами информационной поддержки задач управления и взаимодействия. Оперативному внедрению технологий в практику, мешают административный барьеры, слабая взаимоувязка цифровизации управления и обучения специалистов. Методы глубокой формализации данных, инструменты доступа к информационным ресурсам с многостадийным контролем их актуальности и достоверности апробированы в пилотных проектах.

Трансформация системы мониторинга требует дополнительных ресурсов для сбора и обработки новых данных. Высвобождение времени для сбора конструктивной информации на местном уровне управления возможно за счёт систематизации бизнес-моделей информационной поддержки деятельности экстренных служб. При организации оперативной работы следует придерживаться правила: если поступающая информация не используется непосредственно для принятия решений, то она складывается в формализованном виде, позволяющем извлекать знания, либо игнорируется. Гармоничное использование ведомственных управляющих систем в сочетании с общими информационными ресурсами позволит минимизировать ошибки управления в сложных ситуациях, обусловленные человеческим фактором.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН программы фундаментальных исследований Российской Федерации (рег. № 0287-2021-003).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Москвичёв В.В., Бычков И.В., Потапов В.П., Тасейко О.В., Шокин Ю.И. Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестник РАН, 2017. Т. 87. № 8. С. 696-705.
- [2] Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
- [3] Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г. Комплексный анализ факторов территориальных рисков // Проблемы анализа риска, 2019. Т.16. №4. С. 52-62. DOI:10.32686/1812-5220-2019-16-4-0-0.
- [4] Атлас природных и техногенных опасностей и рисков ЧС: науч. изд. М.: Феория: Объединённая редакция МЧС, 2011. 652 с.
- [5] Калач А.В., Ничепорчук В.В. Пенькова Т.Г., Арифиллин Е.З. Современные механизмы управления рисками социально-природно-техногенных систем / Сборник трудов междунар. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации». 2023. С. 1537-1542.
- [6] Ничепорчук В.В., Ножников А.И. Архитектура территориальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь, 2018. № 2. С. 35-41.
- [7] Громов С.Л. Исследование VI-круг Громова. М., 2022. 362 С.
- [8] Nicheporchuk V.V. Method of using hazard criteria for identifying hazardous situations // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2534. P. 427-433.
- [9] Ничепорчук В.В. Ресурсы и технологии региональных информационно-аналитических систем природно-техногенной безопасности. Дисс. ... докт. тех. наук. Новосибирск, 2022. 300 с.

ПРОБЛЕМЫ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Пилипенко Т.В., Ботвинков И.В., Калашников А.А.

ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск

В данной статье анализируются проблемы, связанные с проведением навигационно-гидрографического мониторинга в условиях антропогенного воздействия. Приводится описание опытов, проводимых в лаборатории Гидравлики, а также данные натурных исследований на реке Обь. Приводится сих сравнение и выводы.

Ключевые слова: навигационно-гидрографическое обеспечение, беспилотные летательные аппараты, мониторинг, русловые съемки, промеры глубин, безопасность судоходства.

PROBLEMS OF NAVIGATION-HYDROGRAPHIC MONITORING IN CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC IMPACT

Pilipenko T.V., Botvinkov I.V., Kalashnikov A.A.

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk

This article analyzes the problems associated with conducting navigation and hydrographic monitoring in conditions of anthropogenic impact. The description of experiments conducted in the laboratory of Hydraulics, as well as data from field studies on the Ob River is given. The following comparison and conclusions are given.

Keywords: navigation and hydrographic support, unmanned aerial vehicles, monitoring, channel surveys, depth measurements, navigation safety.

Введение. Российская Федерация имеет самую протяжённую сеть внутренних водных путей в мире, но далеко не все реки являются судоходными, да и многие участки крупнейших рек (как второстепенные рукава, протоки, и т. д.) являются труднодоступными для традиционных изыскательских судов. Для обеспечения безопасного судоходства, доставки жизненно важных грузов в труднодоступные районы, в первую очередь, в районы Крайнего Севера, а также расширения спектра пассажирских туристических перевозок, необходимо обеспечение специалистов навигационно-гидрографическими съемками.

Ежегодно, по заданию Росморречфлота, утверждается список участков внутренних водных путей, которые относятся к одной из 7 категорий внутренних водных путей, где будут проведены путевые работы, в том числе и навигационно-гидрографические.

Такие работы проводятся: на участках внутренних водных путей русловыми изыскательскими партиями (РИП), которые, с помощью эхолотов проводят съемку глубин и затем обрабатывают данную информацию в специализированных программах.

Стоит отметить, что РИП ФБУ «Администрация водных путей», выполняют данный вид работ, в основном, только на судовых ходах: с целью обеспечения судоходства, как было отмечено ранее.

Однако, стоит заметить, что в последние десятилетия стремительно возрастает освоение пойменной части рек и водоемов на урбанизированных территориях, осваиваются карьеры НСМ на пойменных территориях, возводятся гидротехнические сооружения: мосты, причалы и прочее, а также и возводятся объекты гражданского строительства [1]. Несомненно, развитие мегаполисов и улучшение качества жизни, необходимы, но существуют некоторые существенные недоработки в этой области. Зачастую, пойменные территории осваиваются без достаточно тщательного изучения и оценки воздействия строительства на гидроэкологический режим рек и водоемов. Хаотичная точечная застройка пойменных территорий несет непоправимый экологический ущерб. Для минимизации негативных последствий необходимо проводить научно-исследовательские работы и предусматривать компенсирующие мероприятия при освоении данных территорий.

Навигационно-гидрографический мониторинг в современных условиях. Для проведения навигационно-гидрографического мониторинга в условиях антропогенного воздействия необходимо на регулярной основе проводить русловые съемки, при этом стоит учесть, что прибрежные территории так же необходимо «захватывать» для создания единой карты местности. Данный вид работ удобнее всего было бы проводить с использованием плавающих беспилотных аппаратов (ПБА). Использование плавающих беспилотных аппаратов на водных объектах становится все более популярным в последние годы. Плавающие дроны - это беспилотные плавающие аппараты (БППА), которые могут использоваться для мониторинга и обследования водной среды. Они обеспечивают экономичный способ сбора данных и изображения подводной среды, исследования, а также составления карт.

Плавающие беспилотные аппараты обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами съемки водных объектов. Во-первых, они позволяют проводить более детальный мониторинг водной среды, чем традиционные методы, такие как: замеры глубин на катерах или лодках, привлечение водолазов и прочее. Использование плавающих беспилотных аппаратов также снижает риск человеческой ошибки или вмешательства в окружающую среду. Кроме того, используя ПБА, существенно сокращается время проведения работ, работы становятся менее затратны как с временной, так и с экономической точки зрения. В дополнение к возможности сбора данных и изображений подводной среды, плавающие беспилотные аппараты также могут использоваться и в других сферах: обнаружение подводных препятствий, контроль проведения гидротехнических работ под водой и прочее.

Современная отечественная практика в области навигационно-гидрографических изысканий имеет установившийся отработанный регламент. На текущий момент, основными средствами получения гидрологической информации в России являются стационарные гидропосты, различные оборудованные маломерные суда и, в отдельных случаях, специальные изыскательские теплоходы. Главной проблемой использования судов в исследовательских целях является дороговизна эксплуатации (топливо, техобслуживание, хранение, заработные платы и т.д.). Кроме того, в целом ряде случаев, использование даже самых небольших моторных лодок не представляется возможным.

Проведение навигационно-гидрографической съемки двумя способами. Для анализа качества выполняемой съемки и скорости проведения работ традиционным способом и с помощью БППА, рассмотрим следующий пример. Авторами была проведена работа по созданию навигационно-гидрографической съемки и созданию карты в Мочищенской протоке реки Обь, расположенную вблизи города Новосибирска (рисунок 1).

Протока является второстепенным рукавом реки Обь и номинально не является судоходной артерией, однако на её берегу расположена лодочная база и подавляющее большинство домовладений, расположенных в прибрежной зоне, имеют собственные причалы [2]. В то время, как судовой ход проходит левее острова Медвежий и, как следствие, весь трафик крупных судов проходит там, Мочищенская протока имеет весьма интенсивное движение маломерных судов: от гидроциклов и небольших рыбацких лодок до прогулочных яхт. С целью составления подробной навигационно-гидрографической съемки, авторы совершили изыскательский выезд на моторной лодке. Лодка была оборудована спутниковым приёмником, эхолотом, ультразвуковым расходомером. Протяжённость протоки составляет около 8,3 километра, а средняя ширина сезонно колеблется, но в среднем около 320 метров. Колебание глубин в период навигации очень значительное — максимальные в период весеннего половодья, минимальные в период летне-осенней межени. Если в период «большой воды» по протоке спокойно передвигаются достаточно крупные яхты, то в последующем даже для самой небольшой моторной лодки проход через протоку крайне затруднён ввиду недостатка глубин и постоянного риска повреждения лодки и мотора о крупные затопленные камни и стволы деревьев [3]. Для составления навигационно-гидрографической съемки протоки, авторы совершили более 160 поперечных проходов от берега — к берегу, с шагом между поперечниками в 50 метров. Данная работа непосредственно на воде заняла три дня и потребовала несколько десятков литров бензина. Поскольку измерение проводилось в меженный период, а именно в

конце сентября 2022 года, маневрирование на моторной лодке существенно осложнялось недостаточными глубинами на большой протяжённости протоки. В ряде случаев приходилось спешиваться в воду, чтобы сдвинуть лодку с очередной мели. Лодочный мотор, работая в режиме «Мелководье», приходилось периодически отключать, полностью поднимать из воды и переходить на вёсла. Таким образом, исследование малых рек сопряжено с огромными трудностями, если осуществляются вне периода половодья. Любая маломерная лодка имеет осадку и/или свисающий с кормы мотор. Более того — в случаях, когда лодка управляется непосредственно рычагом на моторе, для безопасного прохода по мелководной акватории, один человек не справится — необходим «вперёд смотрящий» который будет заранее предупреждать судоводителя о приближении подводных препятствий.

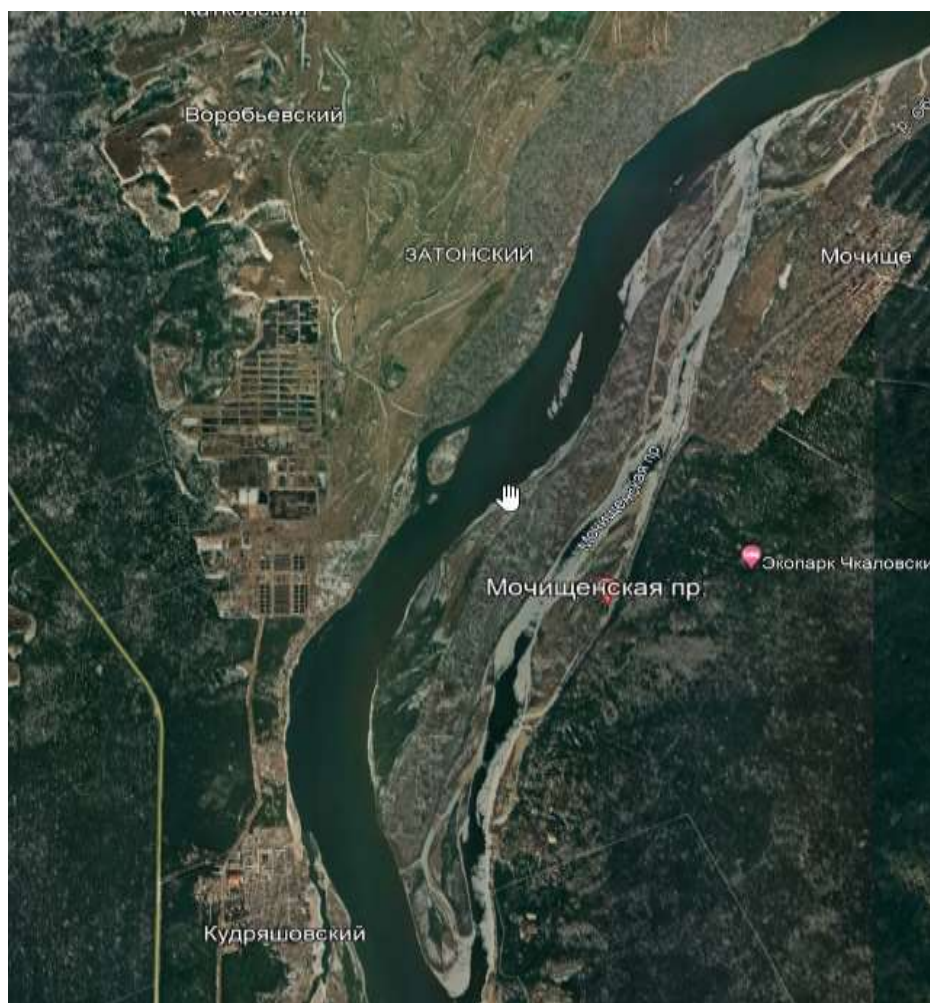


Рис. 1. Космосъемка рассматриваемого участка.

С целью ускорения и упрощения изыскательской работы, авторами доклада был разработан исследовательский дрон (рисунок 2). Данный дрон представляет собой лёгкий радиоуправляемый катер модульного типа, оснащаемый необходимой полезной нагрузкой в виде исследовательского оборудования. Оборудование размещается как внутри корпуса, так и на внешних частях. Кроме того, была отработана возможность буксировки плавучих платформ и отдельных датчиков. Катер оснащён быстро заменяемым аккумулятором и быстростъёмными винтами, а корпус и киль проклеены специальным демпфирующим материалом — защита от повреждений пластикового корпуса. Дрон управляется по радиоканалу с устойчивой связью в зоне видимости (не менее 500 метров). До испытаний непосредственно на реке, проводился ряд тестов и доработок в лабораторных лотках (рисунок 2). Схема гидравлического лотка приведена на рисунке 3. Краткие характеристики дрона: вес: 1,2-2 кг (в зависимости от оснащения); длина: 71 см; ширина: 20 см; Высота: 19 см; максимальная скорость: ограничена применяемыми электромоторами, винтами, мощностью АКБ. В текущих вариантах оснащения — до

70 км/ч; наличие заднего хода: до 5 км/ч; Дальность устойчивой радиосвязи: не менее 500 метров. Автономность: около 1 часа на полном заряде батареи, грузоподъёмность: 700-800 грамм полезной нагрузки, размещённой непосредственно на дроне или до 5 килограмм в случае буксировки. Без существенного снижения плавучести и остойчивости. Диаметр циркуляции: около 2 метров или до 8 метров с буксируемым грузом. На рисунке 3 приведено фото дрона в натурных испытаниях на реке Обь. Установлен спутниковый приёмник и буксируемый сонар.



Рис. 2. Лабораторные испытания БПЛА в гидравлической лаборатории.

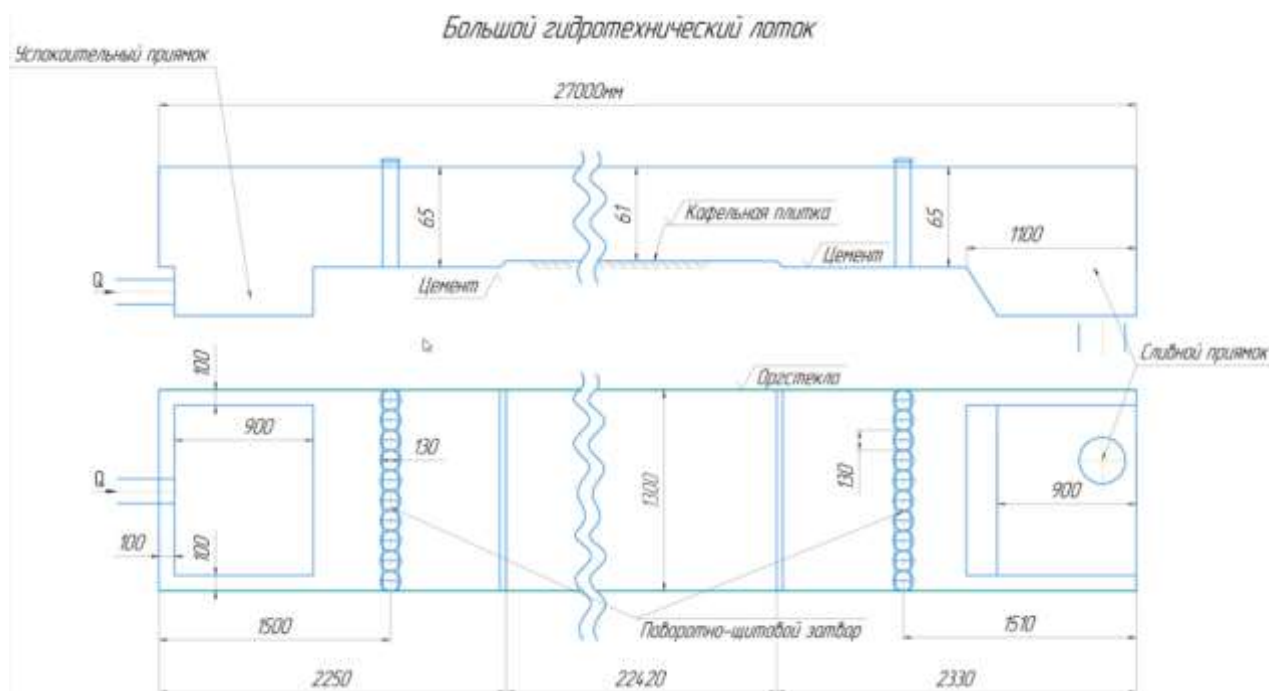


Рис. 3. Схема гидравлического лотка.

Сонар (эхолот) измеряет глубину 5 раз в секунду, измеряет температуру воды, с помощью ПО рисует двухмерный рельеф дна. Данные с сонара передаются оператору по WiFi в режиме реального времени (при удалённости до 50 метров), если же удалённость более 50 метров и связь с оператором утрачивается/прерывается, все данные записываются на карту памяти. Датчик GPS так же работает с помощью ПО, способен записывать весь пройденный маршрут и скорость перемещения. Тоже оснащён слотом для карты памяти для записи данных. По окончании работ, все данные с сонара и геопозиционного датчика синхронизируются и подвергаются последующей обработке на компьютере. На выходе получается достаточно подробная карта дна акватории. Авторы доклада, по завершению лабораторных тестов и отладки всех компонентов дрона, отправились на той же моторной лодке в район Мочищенской протоки.



Рис. 4. натурные испытания БПЛА на реке Обь.

На сей раз, моторная лодка играла лишь страхующую роль командно-наблюдательного пункта. Всю работу выполнял дрон посредством радиокоманд. Несмотря на первый подобный выезд, проход всё тех же 160+ поперечников протоки занял не более 4х часов и потребовал нескольких замен АКБ дрона. Была получена более подробная карта дна протоки с заходом в те участки, куда моторная лодка попросту не могла зайти из-за осадки. Таким образом, время проведения съёмки существенно сократилось, как и финансовые затраты на её проведение. А качество съёмки существенно возросло.

Заключение. Современные технологии вполне позволяют эффективное применение плавучих дронов на различных акваториях, и не только с целью проведения навигационно-гидрографического мониторинга. Спектр их применения огромен и постоянно расширяется. Номенклатура полезной нагрузки так же стремительно развивается и расширяется. Современный рынок всевозможных беспилотных аппаратов переживает стремительный рост во всём мире. В финансовом выражении, это не менее чем +30% в год, с дальнейшим оптимистичным прогнозом. Таким образом, инвестиции в область развития всей номенклатуры беспилотных аппаратов должны быть выдвинуты в приоритет со стороны государства и бизнеса. Уже сейчас за границей существуют морские порты полностью обследуемые (и, пока частично, обслуживаемые) группами плавучих дронов, работающих на сетицентричных принципах. Автоматизация и внедрение искусственного интеллекта вносит постоянные улучшения во взаимодействие дронов с операторами, существенно упрощая последним работу. Помимо прямых экономических выгод, массовое применение беспилотных аппаратов оказывает позитивное влияние на экологию акваторий и существенно снижает риск несчастных случаев среди людей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Pilipenko T.V., Kalashnikov A.A., Botvinkov I.V.* Influence of the slot configuration on its stability (on the example of the Ob river) https://www.researchgate.net/publication/359341965_Influence_of_the_Slot_Configuration_on_Its_Stability_On_the_Example_of_the_Ob_River.
- [2] *Pilipenko T.V., Mikhaylova T.N., Akhmatova N.P., Suslikov E.I.* Assessment of the impact of the development of the floodplain part of the Ob River on the safety of navigation https://www.researchgate.net/publication/359307830_Assessment_of_the_Impact_of_the_Development_of_the_Floodplain_Part_of_the_Ob_River_on_the_Safety_of_Navigation.
- [3] *Пилипенко Т.В., Калашников А.А.* Лабораторные исследования кинематики потока при устройстве дноуглубительной прорези // Речной транспорт (XXI век). 2021. № 4 (100). С. 52-55.

ОЦЕНКА ПОЛЕВОЙ ВСХОЖЕСТИ ПОДСОЛНЕЧНИКА И ОБНАРУЖЕНИЕ СОРНЯКОВ ПО RGB-ИЗОБРАЖЕНИЯМ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗНЫХ АГРОТЕХНИК (КЛАССИЧЕСКАЯ ПЛОСКОРЕЗНАЯ ОБРАБОТКА И СИСТЕМА «NO-TILL»)

*Пестунов И.А.¹, Овчарова Н.В.², Калашников Р.А.¹, Беляев В.И.³, Радчиков А.Н.⁴,
Рогозная А.О.¹*

¹ Федеральное исследовательское учреждение информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

² Алтайский государственный университет, Барнаул

³ Алтайский государственный аграрный университет, Барнаул

⁴ ООО «Беспилотные технологии», Новосибирск

Предложены и исследованы автоматизированные методы распознавания и подсчета количества всходов подсолнечника, а также построения карт сорной растительности по RGB-изображениям сверхвысокого пространственного разрешения, полученным с помощью беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: RGB-изображения, БПЛА, всходы подсолнечника, сверточная нейронная сеть, U-Net, DeepLabv3+, семантическая сегментация, обнаружение сорняков.

EVALUATION OF SUNFLOWER FIELD GERMINATION AND DETECTION OF WEEDS BY ULTRA-HIGH-RESOLUTION RGB IMAGES USING DEEP LEARNING FOR DIFFERENT AGRICULTURAL TECHNIQUES (CLASSICAL FLAT-CUTTING PROCESSING AND «NO-TILL» SYSTEM)

*Pestunov I.A.¹, Ovcharova N.V.², Kalashnikov R.A.¹, Belyaev V.I.³, Radchikov A.N.⁴,
Rogoznaya A.O.¹*

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

² Altai State University, Barnaul

³ Altai State Agrarian University, Barnaul

⁴ Unmanned Technologies LLC, Novosibirsk

Automated methods for recognizing and counting the number of sunflower seedlings, as well as constructing maps of weeds from RGB images of ultra-high spatial resolution obtained using an unmanned aerial vehicle, have been proposed and studied.

Keywords: RGB images, UAV, sunflower seedlings, convolutional neural network, U-Net, DeepLabv3+, semantic segmentation, weed detection.

Введение. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур и оценки качества выполнения технологических операций – актуальное направление в агробизнесе. Данные, получаемые с помощью БПЛА, позволяют обнаруживать нарушения технологического процесса, выявлять участки с сорной растительностью и с отставанием в развитии растений, а также пораженные посевы от вредителей и болезней [1-5].

В настоящей работе предлагаются методы автоматизированного распознавания и подсчета количества всходов подсолнечника, а также обнаружения сорняков по RGB-изображениям сверхвысокого разрешения, полученным с помощью БПЛА.

Объекты исследования и исходные данные. Исследования проводились на опытных полях в Приалейской агрохимической зоне Алтайского края, расположенных в двух хозяйствах Алтайского края (ООО «Золотая осень» (Алейский район), СПК «Знамя Родины» (Поспелихинский район).

На полях использовалась разная технология возделывания подсолнечника: классическая плоскорезная обработка (ООО «Золотая осень») и система «No-Till» (СПК «Знамя Родины»).

С помощью изображений, полученных с БПЛА, проводилась оценка многофакторного опыта посевов подсолнечника с разными нормами высева и дозами удобрений.

Схемы выделенных участков различного уровня естественного плодородия почвы по полям хозяйств для наблюдений по вегетации и реализуемые варианты сочетаний норм высева семян и доз внесения удобрений приведены на рисунке 1 и в таблице 1.

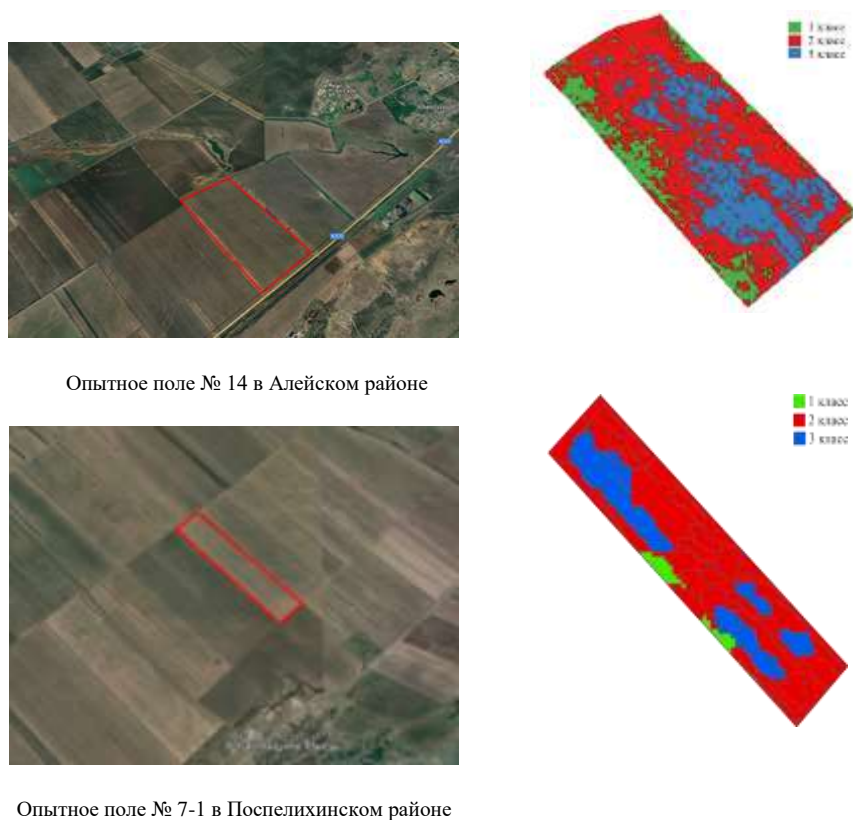


Рис. 1. Схемы выделенных участков различного уровня естественного плодородия почвы: 1-й класс – повышенное, 2-й класс – нормальное, 3-й класс – пониженное.

Табл. 1. Наблюдаемые варианты дифференцированного внесения семян и удобрений на посевах подсолнечника в хозяйствах.

Зона	СПК «Знамя Родины»		ООО «Золотая осень»	
	Норма высева семян, тыс.шт./га	Доза удобрения, (диаммофоска 10:26:26), кг/га / (КАС-32), кг/га	Норма высева семян, тыс.шт./га	Доза удобрения (сульфат аммония N21 S24), кг/га
Культура – подсолнечник на зерно				
I	50	70/112	55	70
II	40	50/112	45	50
III	30	30/112	35	30

Исходными данными для обработки служили 3000 RGB-изображений размером 5472×3648 пикселей, полученные с помощью цифровой фотокамеры 20 Мп, установленной на квадрокоптере DJI Phantom 4 Pro V2.0. Съёмка выполнялась с 21 по 23 июня 2023 года ООО «Беспилотные технологии». Высота съёмки – 10 метров, пространственное разрешение – 0.3 см/пикс. Пример исходного изображения представлен на рисунке 2.

Из исходных изображений было сформировано 19 ортофотопланов со средними размерами 12000×12000 пикселей. В дальнейшем вся обработка проводилась с использованием фрагментов этих ортофотопланов.



Рис. 2. Пример исходного изображения.

В СПК «Знамя Родины» технологии возделывания подсолнечника на опытных полях были следующие. Предшественники: яровая пшеница и горчица соответственно. Осенняя обработка почвы не проводилась. Весной выполнялось закрытие влаги на полях боронами. Высевались гибриды ЛГ-5462 сеялкой прямого посева EDX 12000 ТС 16 мая.

В ООО «Золотая осень» предшественником подсолнечника являлся овес. Осенью проводилась плоскорезная обработка почвы КПШ и КПГ соответственно на глубину 15-17 и 25-27 см. Высевались гибриды «Пионер ЛЕ 10» сеялкой «Horsch Maestro» 10 мая.

Краткое описание методов. Предлагаемые методы обеспечивают выполнение следующих основных этапов обработки.

1. Формирование маски подсолнечника с помощью семантической сегментации изображений.
2. Определение положения рядов посадок и междурядий с использованием алгоритмов, описанных в работе [2].
3. Определение количества всходов подсолнечника с использованием найденной регрессионной зависимости между числом растений, длинами их контуров и размерами прямоугольников, описанных вокруг масок этих растений.
4. Построение карты растительности с использованием вегетационного индекса $VEG = 2 * G - R - B$, который чувствителен к содержанию хлорофилла в листьях.
5. Построение карт сорной растительности на основе карт растительности и масок подсолнечника.

Наглядная схема обработки представлена на рисунке 3.

Семантическая сегментация производилась на два класса: подсолнечник и фон с помощью сверточных нейронных сетей DeepLabv3+ и модификации U-Net.

DeepLabv3+ – это расширение модели DeepLabv3, которая использует структуру кодер-декодер. Модуль кодирования обычно представляет собой предобученную модель сверточной нейронной сети (СНС) и обрабатывает многомасштабную контекстную информацию, применяя расширенную свертку в нескольких масштабах, в то время как модуль декодирования уточняет результаты сегментации по границам объекта. В данной работе в качестве энкодера использовалась предобученная модель ResNet-101. На рисунке 4 представлена схема архитектуры DeepLabv3+.

Схема использованной в работе модификации сети U-Net представлена на рисунке 5. Эта архитектура содержит 98 сверточных слоев для выделения высоко- и низкоуровневых признаков, что позволяет улучшить качество сегментации и обеспечить более точное выделение объектов на изображении. Введение параллельных блоков сверток и пулинга на разных глубинах СНС позволяет сохранять больше контекстной информации на разных уровнях разрешения, что в свою очередь позволяет модели работать с объектами разных размеров.

Для сравнения качества сегментации обе сверточные модели независимо друг от друга обучались на одном и том же наборе данных. В качестве функции активации использовалась функция $ReLU = \max(0, x)$. Последний слой декодера работает с функцией активации $Softmax$.

Для оценки эффективности обеих моделей использовалась метрика IoU :

$$IoU(P, T) = \frac{|P \cap T|}{|P \cup T|},$$

где P – множество пикселей, сегментированных сетью; T – множество пикселей маски, выделенной вручную.

В качестве функции потерь была выбрана функция Дайса-Серенсена (DSL):

$$DSL = 1 - \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|},$$

где X – множество пикселей маски, выделенной вручную; Y – множество пикселей, сегментированных сетью.

В качестве оптимизатора использовался Adam с параметром $lr=10^{-3}$ для модификации U-Net и $lr=10^{-4}$ для DeepLabv3+, а также мини-пакеты размером 8 и 16 соответственно.

Для получения репрезентативной обучающей выборки с каждого ортофотоплана был взят один или несколько фрагментов размером 2560×2560 пикселей. Ручная разметка производилась с использованием веб-сервиса Supervisely. Пример размеченного фрагмента изображения представлен на рисунке 6.

Размеченные изображения разделялись на фрагменты размером 256×256 пикселей. Таким образом было получено 3277 обучающих, 900 проверочных и 460 тестовых фрагментов. Примеры обучающих фрагментов и их масок представлены на рисунке 7.

Для увеличения объема обучающей выборки выполнялась аугментация обучающих данных. Она заключалась в выполнении следующих операций:

- 1) поворот изображений на углы $\alpha \in \{90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$;
- 2) перемасштабирование и случайные отображения относительно горизонтальной и вертикальной осей.



Рис. 6. Пример размеченного фрагмента изображения.



Рис. 7. Примеры обучающих фрагментов и их масок.

Попытка применения различных яркостных преобразований для аугментаций приводила к ухудшению результатов распознавания объектов, поэтому такие преобразования не использовались.

Обучение происходило на кластере ФИЦ ИВТ (HPE Apollo 6500 G10+, 2×AMD EPYC 7452 (32 Cores) 2,35 GHz, 1 TB RAM, 8×Nvidia A100 80GB SXM4) с использованием фреймворков Tensorflow и PyTorch.

При обучении обе модели показали высокую точность сегментации порядка 99%, при валидации – 98%, на тестовых данных точность U-Net составила ~96%, DeepLabv3+ – 97.5%.

Примеры результаты сегментации представлены на рисунках 8 и 9.

Стоит отметить, что СНС DeepLabv3+ справилась лучше с сегментацией всходов подсолнечника маленького размера.

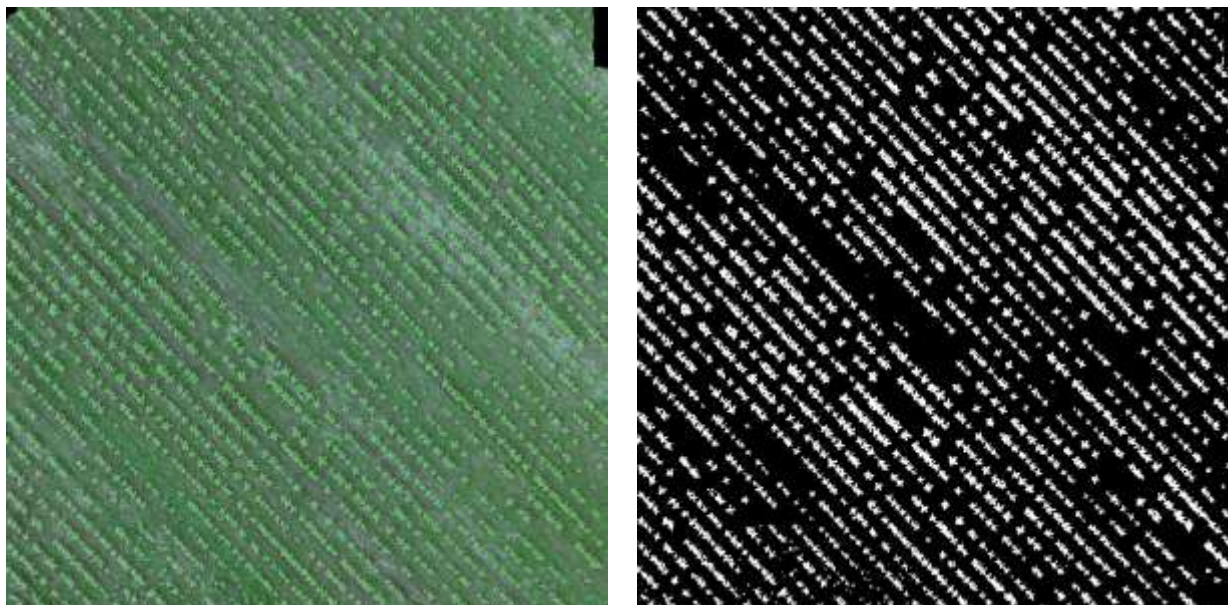


Рис. 8. Результаты сегментации фрагмента изображения поля №14 (Алейский район).

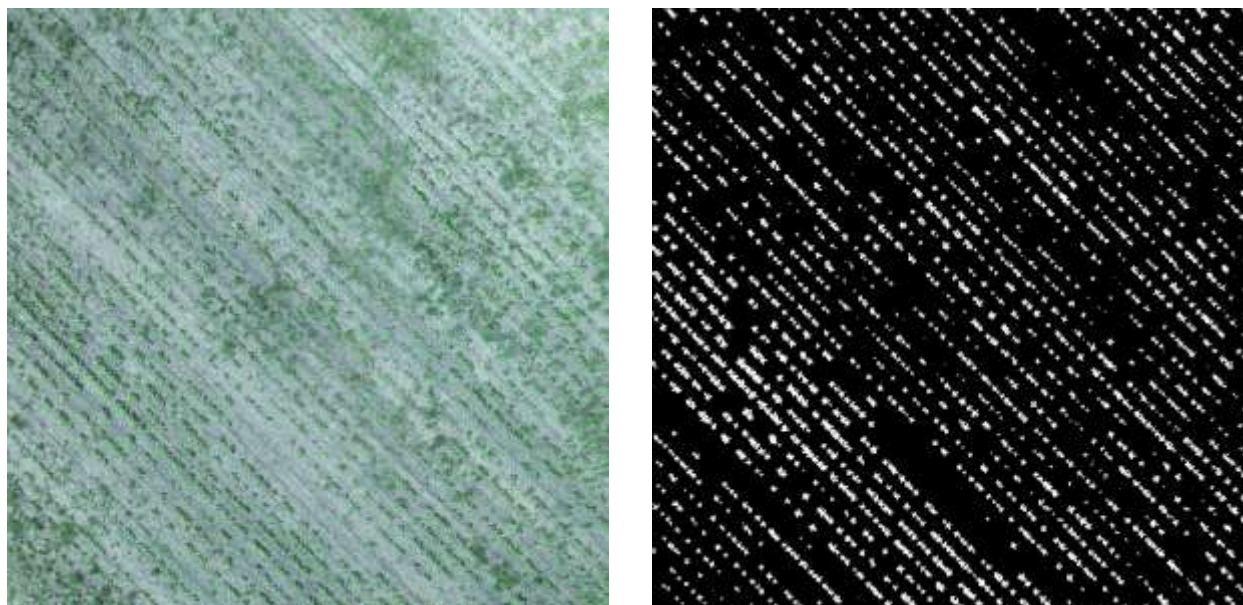


Рис. 9. Результаты сегментации фрагмента изображения поля №7.1 (Поспелихинский район).

Постобработка результатов сегментации. После выполнения процедуры семантической сегментации часто возникают излишне или ошибочно сегментированные области. Точность сегментации имеет критическое значение для подсчета числа всходов подсолнечника, наличие шумовых объектов может сильно исказить подсчет реального количества растений.

Для исключения мелких шумов была собрана статистика о длине контуров подсолнечника и эмпирически подобран порог длины контура, ниже которого объекты исключались с сегментационной карты.

Кроме мелких шумовых объектов ошибочно сегментировались сорняки (например, осот), которые близки по своим спектральным и текстурным характеристикам к подсолнечнику. Для исключения таких экземпляров, находящихся между рядами всходов подсолнечника, применялась процедура поиска рядов и междурядий, которая основана на алгоритме, описанном в работе [2].

Процедура удаления сорняков, попавших в междурядье, выполняется путем поиска расстояния от центральной линии ряда всходов до «центра масс» сегмента, соответствующего отдельному сорному растению. Если это расстояние больше некоторого эмпирически подобранного порога, то такой сегмент удаляется. Результат такой постобработки представлен на рисунке 10, где красным цветом выделены удаленные сорные растения (осот). Порог отклонения равен $1/5$ среднего расстояния между центральными линиями рядов. Так как ряды всходов не всегда образуют прямые линии, важно отметить, что такой способ постобработки позволяет удалить сорные растения в междурядье, не исключив при этом полезные культуры, которые могут быть немного смещены в сторону от центральной линии ряда всходов.

Построение регрессионной зависимости для оценки числа растений. Процедура оценки количества всходов подсолнечника производилась в несколько этапов:

1. Выделение подсолнечника.
2. Поиск контуров сегментов и определение их длин.
3. Построение минимальных описывающих прямоугольников возле каждого сегмента и поиск отношений ширины к высоте прямоугольника.
4. Построение регрессионной зависимости на основе собранной статистики между числом растений и отношениями ширины к высотам прямоугольников и длин контуров сегментов.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что наиболее удачными моделями регрессий для данной задачи являются линейная и логистическая регрессии.

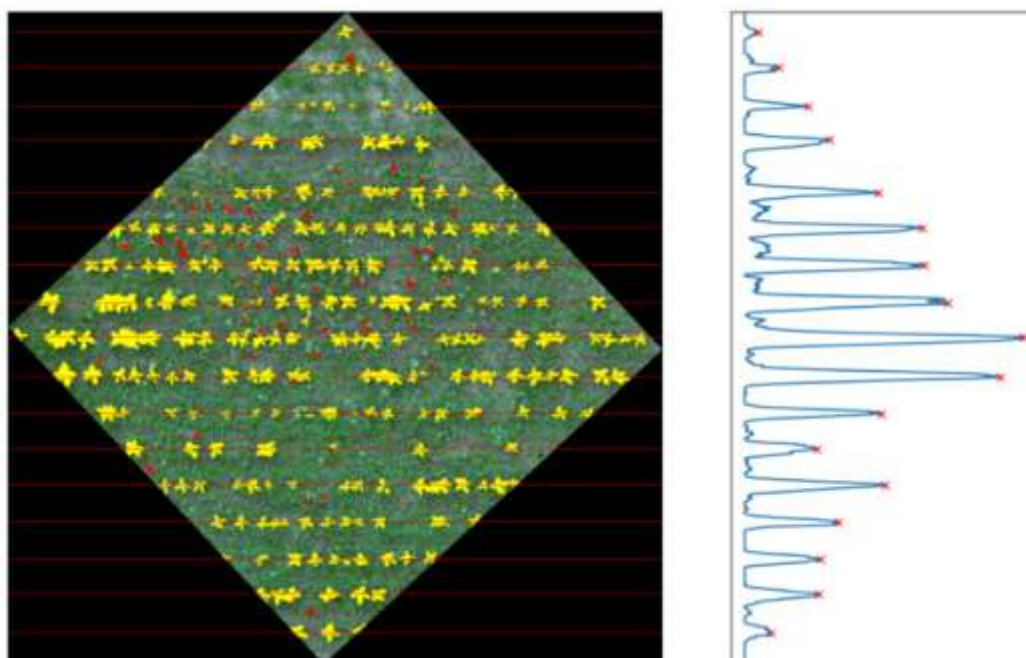


Рис. 10. Сегментированное изображение (поворот на 47°) с удаленными сорными растениями – осотом (выделены красным цветом) и гисторамма, указывающая на положения центров рядов.

Оценка точности подсчета количества всходов подсолнечника на тестовых полях с использованием регрессионной зависимости составила от 93% до 98% в зависимости от качества посадок и наличия сорной растительности. Процедура определения числа растений проиллюстрирована на рисунке 11.

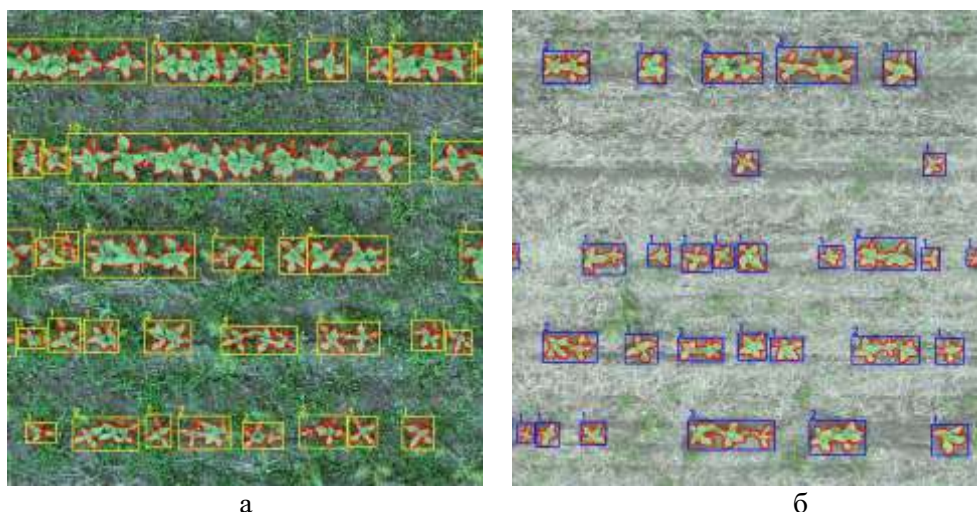


Рис. 11. Результаты работы процедуры определения числа растений на фрагментах изображений опытных полей в Алейском (а) и Пospelихинском районах (б). Красным цветом выделены контуры сегментов, желтым и синим цветом – минимальные описывающие прямоугольники для каждого сегмента, числами – количество растений в каждом сегменте.

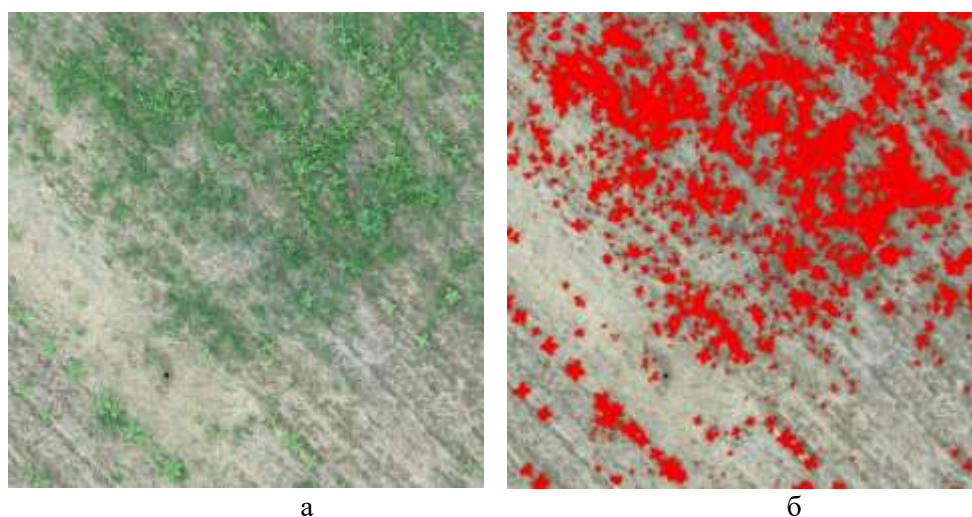


Рис. 12. Исходное изображение (а) и выделенная растительность с помощью индекса VEG (значение порога > 60) (б).

Построение карт растительности по RGB-изображениям. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что для решения данной задачи можно использовать простой пороговый метод на основе либо вегетационного индекса TGI (Triangular Greenness Index):

$$TGI = -0.5 \times ((\lambda_R - \lambda_B)(R - G) - (\lambda_R - \lambda_G)(R - B)),$$

либо на основе индекса, представляющего собой числитель в формуле индекса GLI (Green Leaf Index), который обозначим через VEG:

$$VEG = 2 \times G - R - B.$$

Однако дальнейшие исследования показали, что индекс TGI выделяет не только растительность, но и солому. С другой стороны, индекс VEG позволяет выделить растительность без соломы (рисунок 12).

Построение карт сорной растительности. На предыдущем этапе обработки мы уже получили маску подсолнечника, поэтому для получения карты сорной растительности достаточно с помощью индекса VEG получить маску растительности и исключить из нее маску подсолнечника.

Пример изображения и соответствующая карта сорной растительности представлена на рисунке 13.

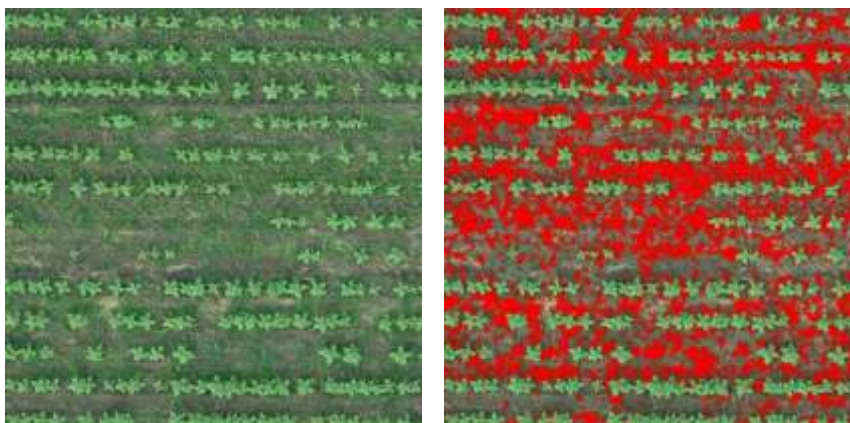


Рис. 13. Изображение и карта сорной растительности (выделена красным цветом).

Заключение. Предложены автоматизированные методы распознавания и подсчета количества всходов подсолнечника, а также обнаружения сорняков по RGB-изображениям сверхвысокого пространственного разрешения.

Валидация предложенных методов на основе результатов полевых исследований свидетельствует о высокой точности подсчета растений, которая составила от 93 до 98%.

Предложенная методика может быть использована для количественной и качественной оценки всходов сельскохозяйственных культур, а также для эффективного использования гербицидов в борьбе с сорной растительностью.

Работа поддержана средствами программы развития ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет» «Приоритет-2030».

Особая благодарность за сотрудничество и сопровождение научных работ руководителю фермерского хозяйства ООО «Золотая осень» (Алейский район Алтайского края) Вадиму Ивановичу Рябцеву и агроному Александру Константиновичу Закревскому, главному агроному СПК «Знамя Родины» (Поспелихинский район Алтайского края) Николаю Петровичу Белову.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gnadinger F., Schmidhalter U. Digital counts of maize plants by unmanned aerial vehicles (UAVs). Remote Sensing. 2017. Vol. 9(6). DOI:10.3390/rs9060544
- [2] Альт В.В., Пестунов И.А., Мельников П.В., Ёлкин О.В. Автоматизированное обнаружение сорняков и оценка качества всходов сельскохозяйственных культур по RGB-изображениям // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48. № 5. С. 52-60.
- [3] Xu B., Fan J., Chao J. et al. Instance segmentation method for weed detection using UAV imagery in soybean fields // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 211. Art. 107994.
- [4] Castaldi F., Pelosi F., Pascucci S., Casa R. Assessing the potential of images from unmanned aerial vehicles (UAV) to support herbicide patch spraying in maize // Precision Agriculture. 2017. Vol. 18. P. 76-94.
- [5] Xu B., Fan J., Chao J. et al. Instance segmentation method for weed detection using UAV imagery in soybean fields // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 211. Art. 107994.

РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АГРАРНОГО МОНИТОРИНГА

Пушкарев А.А., Кузнецова А.С., Якубайлик О.Э

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск

В статье будут представлены возможности аналитического модуля в системе аграрного мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН. А также некоторые особенности программной реализации данного модуля системы.

Ключевые слова: аграрный мониторинг, веб-гис, *chart.js*, *openlayers*, *react*, *javascript*, *typescript*.

DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL MODULE FOR AGRICULTURAL MONITORING SYSTEM

Pushkarev A.A., Kuznetsova A.S., Yakubailik O.E

Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk

The article will present the capabilities of the analytical module in the agrarian monitoring system of the FRC KSC SB RAS. As well as some features of the software implementation of this module of the system.

Keywords: agricultural monitoring, web-gis, *chart.js*, *openlayers*, *react*, *javascript*, *typescript*.

Введение. Современные технологии и информационные системы играют важную роль в сельском хозяйстве, обеспечивая работников аграрного сектора инструментами для получения более точной и полной информации о состоянии посевов, уровне урожайности, погодных условиях и других факторах, влияющих на производство сельскохозяйственной продукции [1]. В настоящее время все больше фермеров и сельхозпредприятий в различных странах мира используют системы аграрного мониторинга для повышения эффективности производства и увеличения урожайности [2]. Благодаря таким системам, сельское хозяйство становится более устойчивым, экономически выгодным и экологически безопасным [3].

Существует множество систем аграрного мониторинга, например система дистанционного контроля за сельскохозяйственными угодиями «Cropio» (<https://operations.cropwise.com>), предоставляет информацию о состоянии посевов, уровне урожайности, погодных условиях и других факторах, влияющих на производство сельскохозяйственной продукции, а также позволяет оптимизировать расходы на ресурсы и улучшить процессы принятия решений в сельском хозяйстве.

В России также активно разрабатываются системы аналитики в сельском хозяйстве. Например, компания «SmartAGRO» (<https://smartagro.ru>) предлагает решения для анализа почвы, воды, удобрений и растительности с использованием спектрометрии ближнего инфракрасного диапазона. Кроме того, в России существует множество стартапов, занимающихся разработкой систем аналитики для сельского хозяйства. Например, компания «AgroTechFarm» (<https://agrotechfarm.com>) создала устройства для контроля параметров растительности и автоматического управления поливом и подкормкой растений.

В данной статье пойдет речь о системе «АгроМониторинг» [4], разрабатываемой в ФИЦ КНЦ СО РАН, а именно будет рассмотрен функционал и некоторые технические особенности модуля аналитики сельскохозяйственных полей.

Данные. Основным источником данных в модуле выступают снимки с космических аппаратов Sentinel 2 и Landsat 8/9 [5]. Исходные изображения выкачиваются в автоматическом режиме в формате GeoTIFF, после чего запускается процесс расчета вегетационных индексов из исходных многоканальных изображений. Полученные в результате продукты размещаются

на сервере в заранее заданной структуре файлов и папок, а также каждому изображению выдётся уникальное имя [6].

Для визуализации изображений используется MapServer (<https://mapserver.org>) он позволяет разбить изображение на маленькие кусочки (тайлы) размером 256 на 256 точек, и по протоколу WMS отправлять запрашиваемые части изображения на клиентскую сторону.

Как было ранее сказано из исходные данных получается несколько продуктов, которые и представлены в системе, их можно разделить многоканальные изображения, такие как RGB и вегетационные индексы, всего в системе представлено 5 разных вегетационных индексов, а именно NDVI, GCI, VARI, SAVI, MSAVI2 [7]. Каждый из представленных индексов необходимо раскрасить в некоторую цветовую схему, т.к. они представляют из себя одноканальные изображения. Для этого в системе существует инструмент для создания цветовых схем, аналогичные инструменты, только с более продвинутым функционалом можно увидеть в таких программных продуктах, как QGIS (<https://qgis.org>) или ARCGIS (<https://esri.com>). За создание цветовых схем отвечает администратор системы, поэтому конечному пользователю предоставляется возможность выбрать цветовую схему из предложенных.

В свою очередь для RGB изображений в системе предусмотрена возможность изменять контрастность, т.к. в зимнее время года из-за наличия снега на полях изображения сильно яркие, в системе представлены два варианта контрастности (для ярких и тусклых изображений), также есть возможность включить автоматический режим, который будет подстраивать контрастность в зависимости от времени года, когда было получено изображение.

В качестве данных для построения трендов вегетационных индексов выступают все те же снимки Sentinel и Landsat, однако к ним добавляются ещё MODIS и VIIRS. В автоматическом режиме из исходных снимков рассчитываются усредненные значения описанных ранее вегетационных индексов для каждого отдельного поля, после чего вносятся в базу данных [8]. Посчитанные данные разбиты на 20 квартилей, указывающих на среднее значение в поле и возможный разброс значений, также каждое значение представлено как с учетом всех пикселей, которые попадают в контур поля, так и с вычетом облачных пикселей.

Также в системе представлены тренды по метеорологическим данным Global Forecast System (GFS) [9] и данным по осадкам Global Precipitation Measurement (GPM) [10], среди которых минимальная, максимальная и среднесуточная температура, накопленная температура выше 5 и 10 градусов, среднесуточные осадки, накопленные осадки и гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова.

Интерфейсы представления данных. В модуле предусмотрено 3 типа представления данных: на карте, в виде графиков и в виде текстовой информации о конкретном поле. За визуализацию данных на карте отвечает библиотека картографическая OpenLayers (<https://openlayers.org>). Для эффективной работы с данной библиотекой разработан набор компонентов оберток для React, которые можно переиспользовать в других проектах.

В данный момент в системе представлены данные по трем ОПХ ФИЦ КНЦ СО РАН (Мининское, Курагинское, Михайловское). Выбор ОПХ и конкретного поля для исследования может осуществляться двумя способами, непосредственно на карте, щелкнув по контуру требуемого объекта, либо из выпадающего списка, расположенного на боковой панели. Так как от года к году границы полей могут изменяться, то и контура полей меняются в зависимости от выбранного базового сезона.

На клиентской стороне за построение графиков отвечает библиотека Chart.js (<https://www.chartjs.org>). Для удобства использования данной библиотеки в React (<https://react.dev>) приложении для нее разработаны компоненты обертки по аналогии с OpenLayers, которые также позволяют удобно манипулировать данными, работать отдельно с каждым показателем, добавлять и удалять какие-либо данные с графика без полной перерисовки, что значительно увеличивает производительность и улучшает пользовательский опыт от использования приложения.

Отображение графиков на клиенте можно гибко настраивать в зависимости от нужд пользователя, например одной из функций является режим сравнения показателя в разные

годы. Для этого необходимо в настройках включить режим “Сравнить несколько сезонов”, после чего на выбранном в появившемся на панели инструментов выпадающем списке сезоны для сравнения.

Также в системе есть возможность просмотра нескольких показателей для выявления какой-либо корреляции между ними и прочей аналитики. Всего возможно выбрать до четырех различных показателей, эта цифра выбрана намеренно, т.к. у различных показателей меняется и шкала допустимых значений, таким образом при четырех показателях с различными шкалами они будут отображаться по две с каждой стороны от графика, однако если добавить ещё больше данных, то воспринимать такой график будет достаточно сложно.

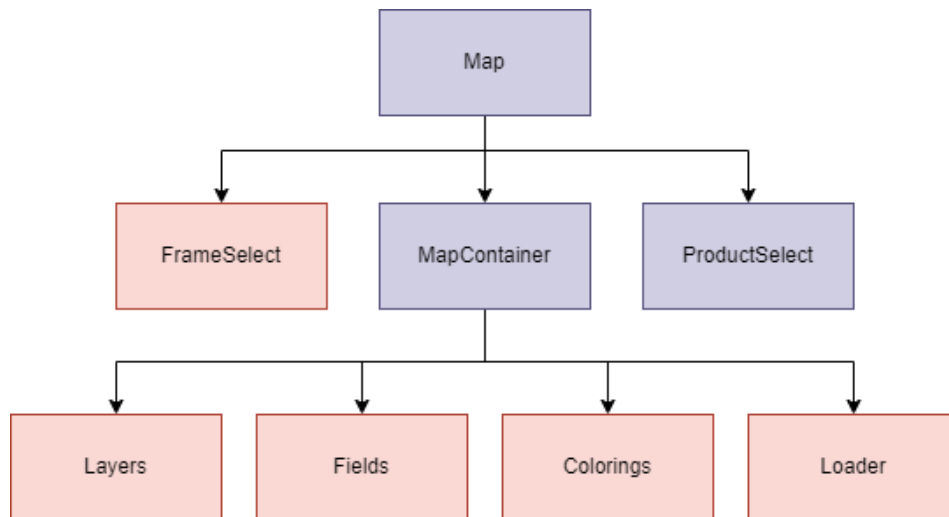


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов внутри картографического модуля.



Рис 2. Картографический интерфейс модуля.

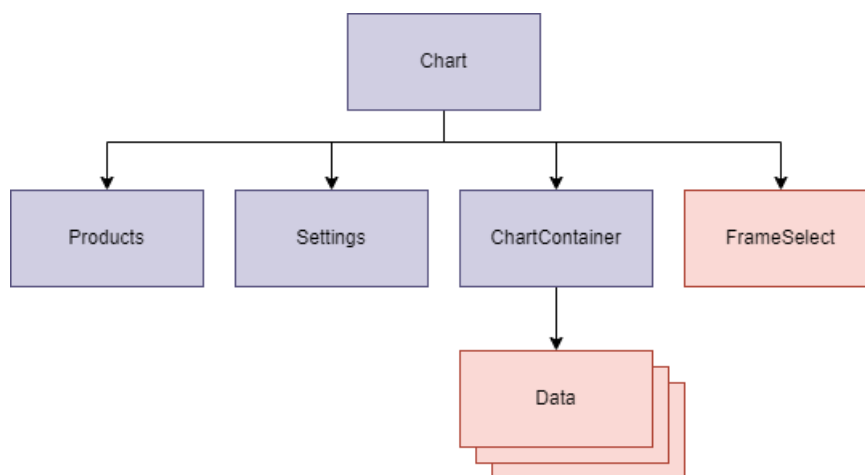


Рис 3. Схема взаимодействия компонентов внутри модуля, отвечающего за графики.

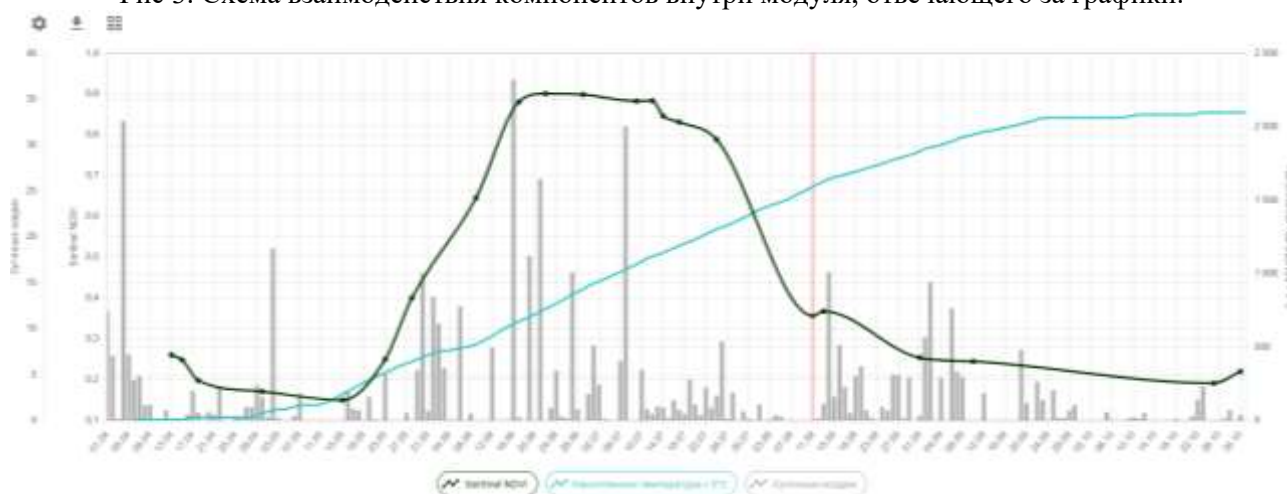


Рис. 4. Интерфейс отображения данных на графике.

Шкалу допустимых значений можно масштабировать в зависимости от теоретически возможных крайних значений показателей, которые заданы заранее администратором системы. Данный режим также включается в настройках графика, однако по умолчанию шкала масштабируется от крайних значений непосредственного самого графика.

Ещё одной немаловажной функцией является отображение квартилей на графиках вегетационных индексов, как было сказано ранее данные по вегетационным индексам, включают в себя разброс допустимых значений внутри одного поля, таким образом включив данный параметр на графике будут отображаться дополнительные области, показывающие разброс значений.

Снизу от графика расположена легенда, она является интерактивной, кликнув на название показателя он будет скрыт с графика, также в зависимости от режима просмотра при нажатии на крестик будет либо удаляться показатель (для режима просмотра нескольких показателей), либо же удаляться сезон (для режима просмотра нескольких сезонов).

Элементы управления. Справа расположен список доступных для просмотра дат. Он динамически обновляется в зависимости от выбранных настроек, также выбранная текущая дата дублируется на графиках полупрозрачной вертикальной красной линией.

Слева располагается панель, на которой расположены общие настройки данного раздела. К ним относятся выбор объекта исследования и конкретного поля, выбор основного сезона и настройка начала и конца сезона (по умолчанию сезон начинается 1 апреля и заканчивается 31 октября).

Также на панели общих настроек расположена регулировка облачности спутниковых данных. Она представляет из себя диапазон от 0% до 100% облачности с шагом в 10%. В за-

зависимости от выбранного процента облачности, дни в которые облачность была выше выбранного в данной настройке значения не будут отображаться в списке доступных дат и соответственно на карте и графике.

Также на этой панели можно выбрать спутник, данные с которого будут отображаться на карте. В данный момент в системе представлены данные Sentinel 2 и Landsat 8, 9.

Внешний вид всего раздела можно настраивать в зависимости от нужд и предпочтений пользователя. Всего существует 5 различных видов отображения, которые разделяют основную рабочую область на отдельные окна, в каждое окно можно поместить карту, график или карточку с информацией. Однако такие гибкие настройки нужны не всем, поэтому в системе предусмотрена возможность создавать заранее заготовленные конфигурации рабочей области и данных, отображаемых по умолчанию. Администратор системы конфигурирует рабочую область после чего сохраняет такую конфигурацию, которая будет отображаться у пользователей по умолчанию. Конфигураций может быть несколько и для переключения их необходимо выбрать соответствующую на панели настроек.

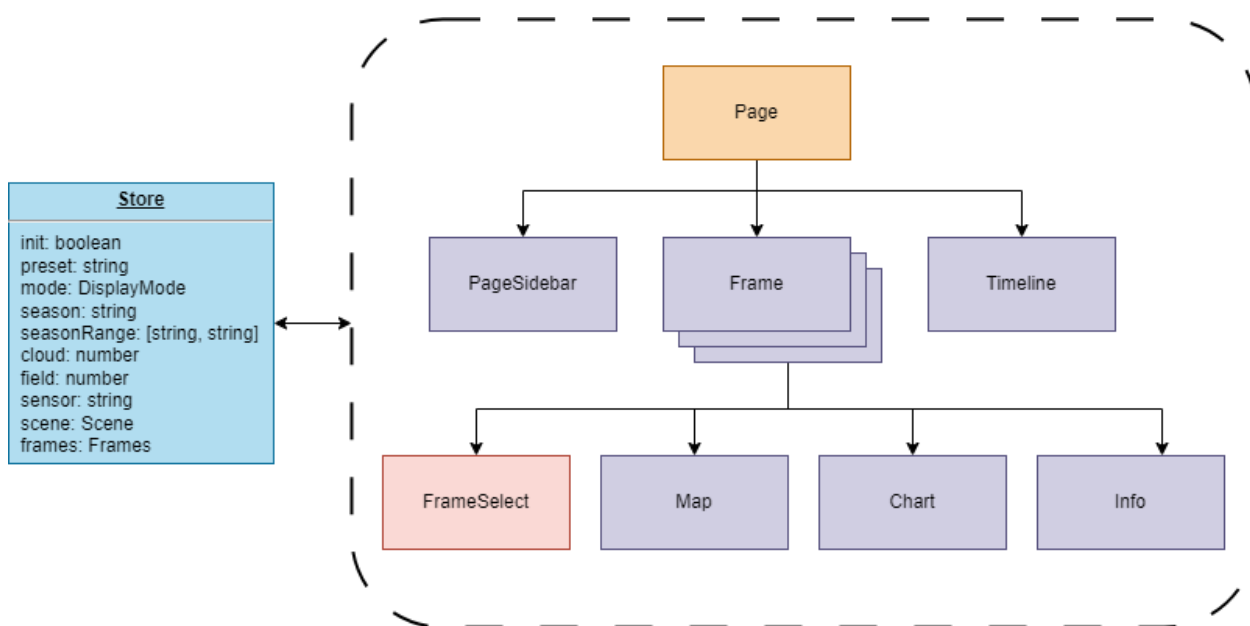


Рис. 5. Общая схема взаимодействия компонентов внутри всего модуля.

За хранение состояния приложения на клиенте отвечает библиотека Zustand, которая позволяет удобно хранить выборочные данные в SessionStorage, благодаря чему при обновлении страницы приложение не теряет своего состояния, а также позволяет делиться состоянием по ссылке.

Заключение. В данной работе был представлен модуль аналитики сельскохозяйственных полей в системе «АгроМониторинг». Продемонстрированы основные аналитические инструменты, такие как отображение космических снимков и вегетационных индексов на карте, построение трендов по различным вегетационным индексам, а также метеорологическим данным. Также представлены схемы взаимодействия компонентов в данном модуле. В будущем планируется разделить данный модуль на несколько более мелких, чтобы разгрузить интерфейс приложения и улучшить пользовательский опыт.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mendas A., Delali A. Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria // Computers and Electronics in Agriculture. 2012. № 83. С. 117-126.
- [2] Khazaei M., Hamzeh S., Samani N.N., Muhuri A., Goita K., Weng Q. A web-based system for satellite-based high-resolution global soil moisture maps // Computers & Geosciences. 2023. № 170.

- [3] *Feng Q., Flanagan D.C., Engel B.A., Yang L., Chen L.* GeoAPEXOL, a web GIS interface for the Agricultural Policy Environmental eXtender (APEX) model enabling both field and small watershed simulation // *Environmental Modelling & Software*. 2020. № 123.
- [4] *Pushkarev A.A., Yakubailik O.E.* A web application for visualization, analysis, and processing of agricultural monitoring spatial-temporal data // *CEUR workshop proceedings*. 2021. № 3006. С 231-237.
- [5] *Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D., Nendel C., Erasmi S., Hostert P.* Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 269. P. 112831. DOI:10.1016/j.rse.2021.112831.
- [6] *Kadochnikov A.A.* Software and technological support of geoinformation web system for the operative processing and visualization of satellite DATA // *CEUR workshop proceedings*. 2019. N 2534. P. 309-315.
- [7] *Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ларько А.А., Мальчиков Н.О., Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Шевырногов А.П.* Оценка пространственного распределения урожайности ярового ячменя (Красноярский край) по наземным и спутниковым спектрофотометрическим данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 183-193. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193.
- [8] *Якубайлик О.Э., Ромасько В.Ю., Павличенко Е.А., Ерунова М.Г., Кузнецова А.С.* Автоматизация расчета NDVI по спутниковым данным Landsat/Sentinel // *Материалы IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования земли»*. Красноярск 2022. С. 174-177.
- [9] The Global Forecast System (GFS) Documentation Retrieved from: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php.
- [10] *Hou A.Y. et al.* The Global Precipitation Measurement Mission // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014. V. 95, no. 5. P. 701-722. DOI:10.1175/BAMSD-13-00164.1.

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ В РАЙОНЕ КУЛУНДИНСКОЙ СТЕПИ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

Родионова Н.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино

Сделана оценка влажности почвы на станции SLAVGOROD сети ISMN по радарным данным Sentinel 1 на основе множественной регрессии для 2019 г. Регрессионные модели построены на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы, в качестве которых выбраны измерения на двух станциях сети ISMN в Германии. Построены множественные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. В модели использованы помимо радарных, метеоданные, что позволило увеличить коэффициент детерминации и уменьшить стандартную ошибку регрессии. Для возможного распространения регрессий на другую территорию предложены два критерия: близость значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) и схожесть текстуры почвы.

Ключевые слова: наземные и спутниковые измерения, объемная влажность почвы, коэффициент корреляции Спирмена, множественная регрессия.

SOIL MOISTURE ESTIMATION IN THE AREA OF THE KULUNDA STEPPE BY RADAR DATA BASED ON MULTIPLE REGRESSION

Rodionova N.V.

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino

An assessment of soil moisture at the SLAVGOROD station of the ISMN network made using Sentinel 1 radar data based on multiple regression for 2019. Regression models base on the correlation of radar data with ground measurements of soil moisture. Measurements at two stations of the ISMN network in Germany selected as ground measurements. Multiple regressions with the coefficient of determination up to 0.91 are constructed. The model uses not only radar, but also meteorological data, which allowed increase the coefficient of determination and reduce the standard error of regression. Two criteria proposed for the possible spread of regressions to another territory: the proximity of the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient and the similarity of the soil texture.

Keywords: ground and satellite measurements, volume soil moisture, Spearman correlation coefficient, multiple regression.

Введение. Методы восстановления влажности почвы по радарным данным (РД) можно классифицировать на три типа:

- основанные на использовании аналитических моделей [1, 2]; могут быть сложными и их трудно инвертировать;
- полуэмпирические модели, например, модели Oh [3] и Dubois (1995) [4], учитывающие некоторые электромагнитные свойства среды, но упрощенные с помощью эмпирически полученных параметров;
- чисто эмпирические модели, такие как модели, основанные на регрессии [5].

В данной работе рассматривается построение и возможное использование регрессионных моделей на основе корреляции РД с наземными измерениями объемной ВП. При наличии высокой корреляции строится регрессия, позволяющая с той или иной точностью оценить по РД объемную ВП на определенной территории, а также на других территориях при близких параметрах текстуры почвы, напочвенного покрова и климатических условий. Для построения регрессии требуются наземные измерения ВП и РД на исследуемую территорию. РД с высоким пространственным разрешением (ПР) имеются в открытом доступе на территорию России, однако наземных измерений ВП – только единичные локальные данные и, как правило, не в открытом доступе. Во всемирной сети данных по наземным измерениям ВП ISMN

(International Soil Moisture Network) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>) информация о наземных измерениях параметров почвы на станциях России ограничивается в лучшем случае 1998 годом.

Регрессионная модель. В результате для построения регрессионных моделей были выбраны две станции сети ISMN MOL-RAO Falkenberg и TEREÑO Gevenich в Германии с разной текстурой почвы. В качестве РД использовались находящиеся в открытом доступе (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) Sentinel 1 (S1) данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Станция Falkenberg (120 км к югу от Берлина) имеет координаты 52.16694° с.ш., 14.12417° в.д. Расположение станции показано на рисунке 1 (указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение 0.43 ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$), глина-6%, песок-73%, ил-21%, organic carbon-0.9%, пастбища/сельхозугодья/трава. В наземные измерения входят осадки (Pr), температура воздуха (Ta), влажность почвы (sm) на глубине 8, 15, 30, 45 и 90 см, температура почвы (Ts) на глубине 5, 10, 15, 20, 30, 45, 50, 60, 90, 100, 120, 150 см.

Координаты станции Gevenich 50.9892° с.ш., 6.32355° в.д. (отмечена красной стрелкой на рисунке 1). Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение: 0.43 ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$), глина – 22%, песок – 41%, ил – 37%, organic carbon – 0.74%, пахотные земли, богарные. В наземные измерения входят температура воздуха, осадки, влажность и температура почвы на глубине 5, 20, 50 см.

Графики коэффициента обратного рассеяния (КОР) (дБ) VV и VH поляризаций (угол съемки $\approx 35^\circ \div 39^\circ$) и наземных измерений объемной влажности почвы sm ($\text{м}^3/\text{м}^3$) на глубине 8 см для Falkenberg и 5 см для Gevenich и температуры воздуха Ta ($^\circ\text{C}$) на время пролета спутника над исследуемыми территориями в 2019 г приведены на рисунке 2.



Рис. 1. Место расположения станций Falkenberg и Gevenich.

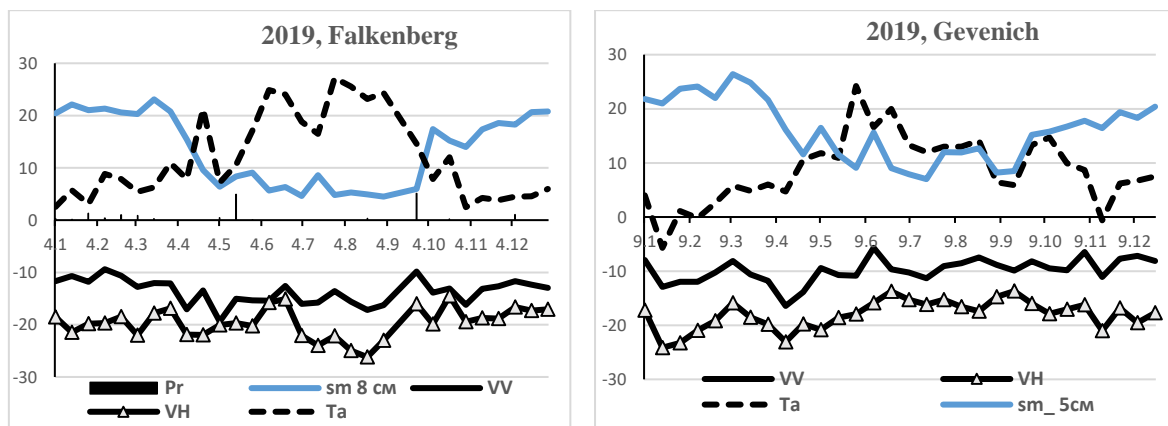


Рис. 2. Графики наземных и радарных измерений для Falkenberg и Gevenich в 2019 г.

В таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) ρ_s между КОР S1 и наземными измерениями температуры воздуха, влажности почвы на глубине 5, 8, 15 и 20 см и температуры почвы (T_s) на глубине 5 см для двух рассматриваемых станций. Значения ККС определялись с помощью программы Attestat, находящейся в открытом доступе.

Табл. 1. ККС между КОР (N=30) и наземными измерениями T_a и T_s и ВП для 2019 г.

Falkenberg				
	sm_0.08 м	sm_0.15 м	T_s _0.05 м	T_a
VV	$\rho_s=0.69$; $p=1*10^{-5}$	$\rho_s=0.72$; $p=4*10^{-6}$	$\rho_s=-0.61$; $p=2*10^{-4}$	$\rho_s=-0.38$; $p=0.017$
VH	$\rho_s=0.37$; $p=0.02$	$\rho_s=0.42$; $p=0.01$	$\rho_s=-0.32$; $p=0.04$	$\rho_s=-0.29$; $p=0.056$
Gevenich				
	sm_0.05 м	sm_0.2 м	T_s _0.05 м	T_a
VV	$\rho_s=0.02$; $p=0,5$	$\rho_s=-0.21$; $p=0,13$	$\rho_s=0.26$; $p=0.08$	$\rho_s=0.37$; $p=2*10^{-3}$
VH	$\rho_s=-0.51$; $p=2*10^{-3}$	$\rho_s=-0.65$; $p=5*10^{-5}$	$\rho_s=0.71$; $p=5*10^{-6}$	$\rho_s=0.53$; $p=1*10^{-3}$

Значительное отличие ККС для Falkenberg и Gevenich в 2019 году для согласованной поляризации скорее всего объясняется разной текстурой почвы для этих станций, а именно, содержанием глины и песка. Корреляции между КОР и влажностью почвы выше для песчаных почв из-за большего содержания свободной воды [6].

Наличие умеренной корреляции между наземными измерениями ВП и значениями КОР позволяет построить регрессионные соотношения, определяющие вклад отдельных независимых переменных. В регрессионном соотношении, помимо РД, предлагается использовать в качестве независимых переменных метеоданные: температуру воздуха и осадки. Тогда формула для 4-х факторной регрессии такова:

$$y=a+b*x_1+c*x_2+d*x_3+f*x_4, \quad (1)$$

где y -зависимая переменная; a - константа; x_1 - x_4 - независимые переменные ($x_1=\sigma^0_{VV}$ (дБ) – КОР VV поляризации, $x_2=\sigma^0_{VH}$ (дБ) – КОР VH поляризации, $x_3=T_a$ (°C)- температура воздуха, $x_4=Pr$ (мм)- осадки) в вариации зависимой переменной (sm -soil moisture, $m^3*m^{-3}*100$).

Значения констант в (1) приведены для обеих станций в [7]. Регрессия вычисляется с помощью вкладки Excel 'Анализ данных'. Для оценки качества уравнения регрессии (близости рассчитанных по регрессии и фактических значений y) используются две величины: коэффициент детерминации R^2 и стандартная ошибка регрессии Se_y , показывающая среднее расстояние, на которое наблюдаемое значение отклоняется от линии регрессии. При использовании регрессии в целях прогноза Se_y может быть более полезной, чем R^2 , поскольку дает понимание того, насколько точными будут прогнозы. Так, для станции Falkenberg изменение R^2 и Se_y при изменении числа независимых переменных в (1) от 1 до 4 такие: R^2 — 0.395, 0.397, 0.82, 0.91; Se_y —6.5, 5.5, 3.03, 2.15. Увеличение в 2 раза R^2 и одновременное уменьшение в 2 раза Se_y произошло при добавлении в (1) метеоданных.

Пример возможного использования регрессионной модели. Для того, чтобы распространить регрессионные соотношения, полученные для одной территории, на другую, необходимо выполнить ряд условий, среди основных – это сходные климатические данные, сходные типы подстилающих поверхностей, близкая по текстуре почва, и другие.

Одним из важнейших факторов является схожесть климатических условий. Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [8], [9]. Определяется ГТК так: $ГТК=10*\Sigma P/\Sigma T$, где ΣP - сумма осадков за вегетационный период (период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°C), ΣT - сумма среднесуточных температур за этот же период. Значения ГТК (май-сентябрь) для станций Falkenberg и Gevenich в 2019 году равно, соответственно, 0.37 и 0.74.

Славгород. На сайте ISMN информация о наземных измерениях на станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD ограничена периодом с 1972 по 1985 гг. Координаты станции 52.97° с.ш., 78.65° в.д. Состав почвы (0-30 см): насыщение 0.45 (m^3*m^{-3}), глина-21%, песок-

37%, ил-42%, растительность-трава. Наземные измерения ВП на глубине 0- 10 см и 0- 100 см. На рисунке 3 показано расположение станции и приведены графики наземных измерений влажности почвы на глубине 0-10 см с 1982 по 1985 гг. (месяцы апрель-октябрь).

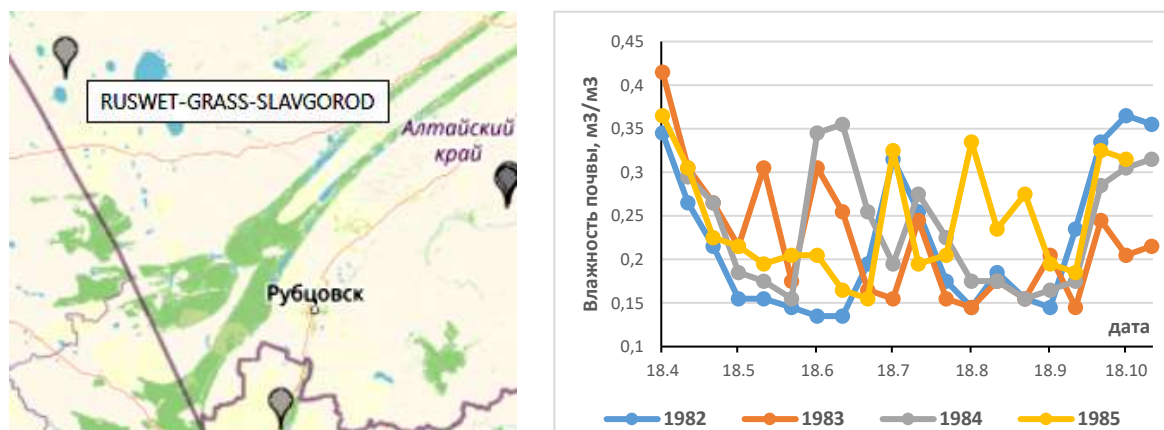


Рис. 3. Место расположения станции и графики наземных измерений влажности почвы на глубине 0-10 см с 1982 по 1985 гг. (апрель-октябрь) для станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD.

Радарные данные для исследуемой территории представлены значениями измерений аппаратом S1B для 2019 г. по находящимся в открытом доступе данным спутника на сайте Earthdata. Угол съемки $\sim 37^\circ$. Значения КОР для станции для 2019 г. представлены на рисунке 4 ($N=23$, N -число сеансов съемки). На рисунке 4 приведен также график температуры воздуха для станции Славгород по данным метеостанции Славгород WMO ID 29915 на сайте rp5.ru. Температура взята на момент пролета спутника над исследуемой территорией.

В таблице 2 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) между КОР и температурой воздуха (T_a) и значения ГТК для 2019 года для станции Славгород.

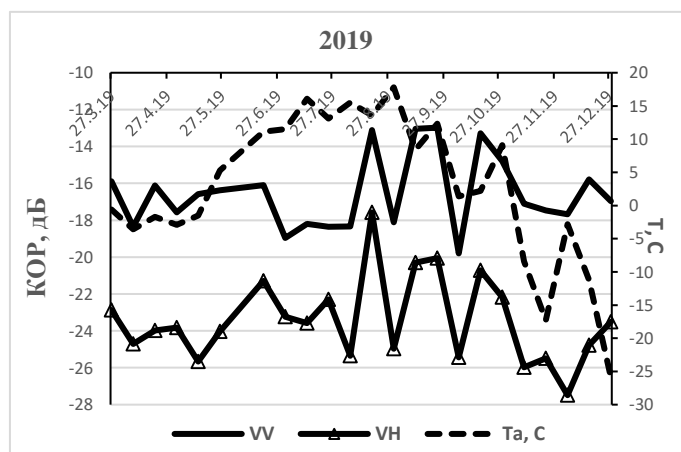


Рис. 4. Графики значений КОР и температуры воздуха для станции SLAVGOROD.

Табл. 2. ККС между КОР и T_a и значение ГТК для станции Славгород.

	VV	VH	ГТК	N
2019	$\rho_s=-0.04$; $p=0.43$	$\rho_s=0.436$; $p=0.02$	0.54	23

Значение ГТК для Славгорода в 2019 году находится между значениями ГТК для Gevenich и Falkenberg. Значения текстуры почвы более близки к Gevenich. Воспользуемся 3-х факторной регрессией Gevenich sm-5 см и Falkenberg sm -8 см (2019 год) для оценки влажности почвы для Славгорода. Подставив значения КОР и T_a , показанные на рисунке 4, в формулу (1) для трехфакторной регрессии, получаем графики оценки значений объемной влажности почвы в приповерхностном слое на станции Славгород в 2019 году по регрессии для Gevenich (глубина почвы 5 см) и по регрессии для Falkenberg (глубины 8 см) (рисунок 5, слева).

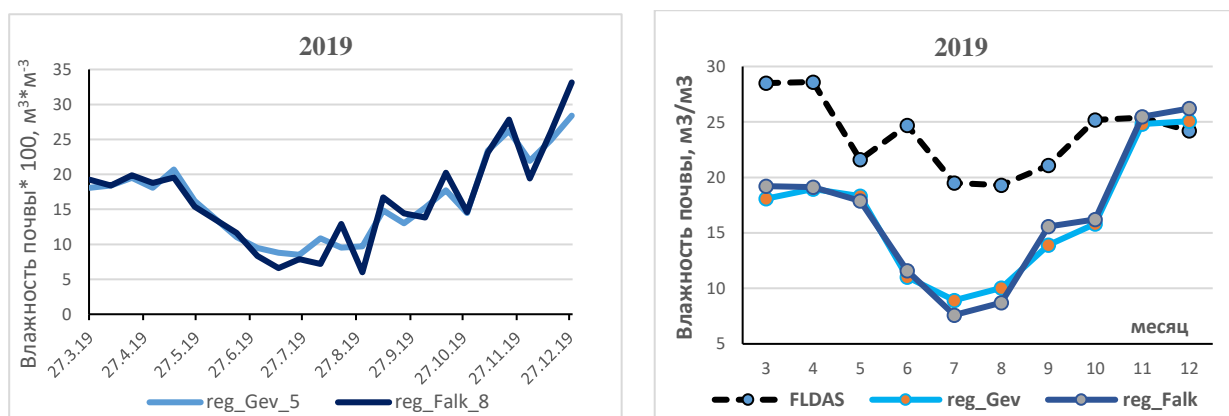


Рис. 5. Графики значений объемной влажности почвы (глубина 5 см и 8 см) на станции Славгород в 2019 году по регрессионной модели.

При отсутствии возможности сравнить полученные оценки влажности почвы по регрессии с наземными измерениями, предлагается сравнить графики на рисунке 5 с данными модели FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/ldas>) для станции Славгород. FLDAS обычно используется для получения информации о многих переменных, связанных с климатом, включая содержание влаги в почве, влажность воздуха, испарение, среднюю температуру почвы, общую норму осадков и т.д., в полусухих районах [10]. Модель поверхности суши Noah 3.6 от FLDAS [11] основана на наземных и спутниковых данных об осадках CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data) [12] и современном ретроспективном анализе метеорологического воздействия MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application Version 2) [13]. Ежемесячные результаты моделирования FLDAS за более чем 30 лет с 1982 года по настоящее время находятся в открытом доступе. Дополнительной особенностью FLDAS является то, что эти данные могут быть визуализированы с помощью онлайн-инструмента Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>).

Предварительно выясним наличие корреляции между наземными измерениями ВП в Славгороде за период 1982-1985 гг. и данными модели FLDAS (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, ежемесячные значения объемной ВП (м³/м³) на глубине 0-10 см, $PP=0.1^\circ$). ККС между ежемесячными значениями ВП по наземным и модельным FLDAS данным за 1982-1985 гг. ($N=28$) равен $\rho_s=0.77$ ($p=1 \cdot 10^{-7}$). На рисунке 6 показаны графики ежемесячных значений объемной влажности почвы по наземным измерениям на станции Славгород и по модели FLDAS для глубины (0-10 см) за 1982-1985 гг. (апрель - октябрь). Среднее отклонение значений составляет 0.032, СКО~0.02.

Значение корреляции наземных измерений объемной ВП и среднемесячных значений, полученных по модели FLDAS для станции Славгород, дает возможность использовать модельные данные FLDAS для оценки ВП для станции Славгород настоящего времени. На рисунке 7 приведен график значений ВП для станции Славгород по данным модели FLDAS для 2000, 2008, 2012, 2018-2021 гг. (апрель-октябрь). Абсолютный минимум ВП принадлежит августу 2012 года, максимум – апрелю 2018 года.

Для данного региона Алтайского края годы 2000, 2008, 2012 и 2020 отличались минимальными значениями NDVI с абсолютным минимумом в 2012 году [14]. На рисунке 8 приведены карты усредненных за июль значений NDVI для района Славгорода для 2012 года и для сравнения для 2018 года. Карты получены на основе измерений аппаратом MODIS спутника Terra и представлены в системе анализа и визуализации данных Giovanni ($PP=0.05^\circ$, продукт MOD13C2 v006). Красной звездочкой на картах отмечено положение тестового участка в Славгороде.

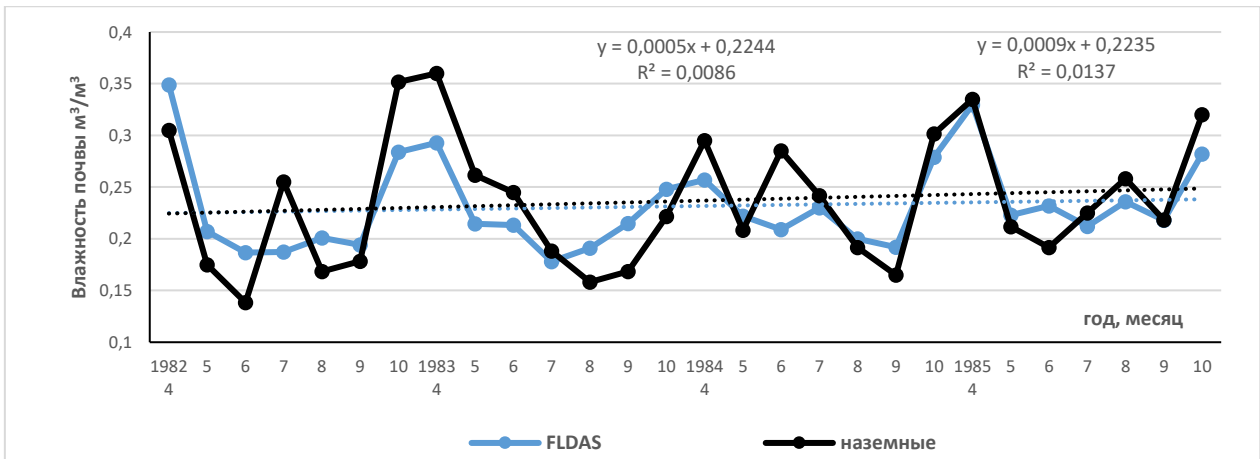


Рис. 6. Графики ежемесячных значений объемной влажности почвы по наземным измерениям на станции Slavgorod и по модели FLDAS для глубины (0-10 см) за 1982-1985 гг. (апрель - октябрь).

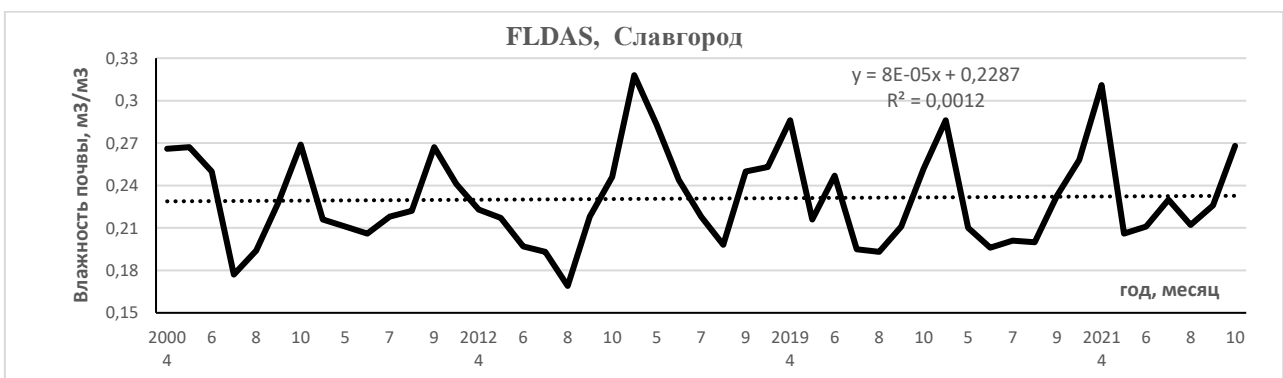


Рис. 7. График значений ВП для станции Славгород по данным модели FLDAS для 2000, 2008, 2012, 2018-2021 гг. (апрель-октябрь).

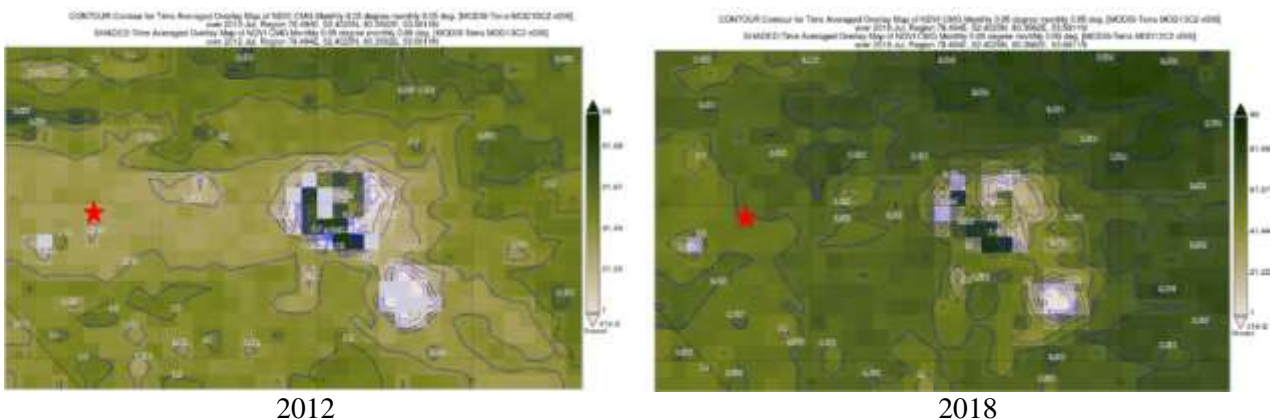


Рис. 8. Карты значений NDVI для июля 2012 и 2018 гг. для района Славгорода.

Сравнение графиков оценки среднемесячных значений ВП по регрессионной модели и по модели FLDAS для Славгорода в 2019 году показано на рисунке 5 (справа). Среднее отклонение для разности значений по абсолютной величине и СКО равны, соответственно, 7.46 и 4.38. Максимальные отклонения приходятся на летние месяцы. По радарной регрессии получаются заниженные значения ВП в сравнении с модельными FLDAS. ККС между значениями ВП по регрессии и значениями ВП, полученными по модели FLDAS, равен 0.71 ($p=1 \cdot 10^{-5}$) для регрессии reg_Gev и $\rho_s=0.75$ ($p=2 \cdot 10^{-5}$) для reg_Falk .

Итак, для оценки ВП для Славгорода по регрессионной модели, полученной для другой территории, требуется соблюдение ряда условий. Оценка значений ВП по регрессии получилась заниженной относительно наземных измерений, что показано, при отсутствии в открытом доступе наземных измерений ВП для данной станции, с помощью модели FLDAS.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wu T.-D., Chen K., Shi J., Fung A. A. Transition model for the reflection coefficient in surface scattering// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. 39. P. 2040-2050.
- [2] Chen K., Wu T.-D., Tsang L., Li Q., Shi J., Fung A. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. 41. P. 90-101.
- [3] Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces// IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 1992. 30. P. 370-381. DOI:10.1109/36.134086.
- [4] Dubois P., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. 33. P. 915-926.
- [5] Beale J., Snapir B., Waine T., Evans J., Corstanje R. The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar // Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License. DOI:10.5194/hess-2019-294.
- [6] Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokononko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // Rem. Sens. Environm. 2000. V. 71. P. 309-319.
- [7] Родионова Н.В. Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии // ИЗК, 2023 (в печати).
- [8] Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165-177.
- [9] Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. 1958. С. 7-14.
- [10] McNally A., Arsenault K., Kumar S. et al. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications // Scientific Data. 2017. 4. 170012. DOI:10.1038/sdata.2017.12.
- [11] Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. Atmos. 2003.108. 8851. DOI:10.1029/2002JD00 3296.
- [12] Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Michaelsen J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes// Sci. data. 2015. 2. 150066.
- [13] Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J.Clim. 2017.30(14). P. 5419-5454.
- [14] Плуталова Т.Г., Романов А.Н. Анализ процессов аридизации территорий в Западной Сибири и Центральной Азии на основе спутниковых и наземных данных // Материалы 20-й Межд. конф. «Совр. пробл. ДЗЗ из космоса». Электр. сб. матер. конф. ИКИ РАН. М., 2022. С. 328. DOI:10.21046/20DZZconf-2022a.

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ НА УГОЛЬНЫХ КОТЛАХ ТЭЦ

Фаворский В.С.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева», Красноярск

Экологическую нагрузку на атмосферу современных городов в значительной степени определяют процессы эффективного сжигания и минимизация выбросов городских угольных ТЭЦ. В работе рассмотрен способ повышения эффективности системы очистки от зольных осадков угольных котлов пароперегревателей с использованием генератора пульсирующего потока на встречных сверхзвуковых струях. В случае неполной очистки пароперегревателей существенно снижается теплоотдача от горячего потока продуктов горения к трубам пароперегревателя, производительность котла и увеличивается количество зольных выбросов.

Ключевые слова: экология, газовые выбросы, очистки пароперегревателей.

TECHNOLOGY FOR CLEANING SUPERHEATERS ON COAL-FIRED BOILERS OF CHPP

Favorskiy V.S.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

The environmental impact on the atmosphere of modern cities is largely determined by the processes of efficient combustion and minimization of emissions from urban coal-fired thermal power plants. The paper considers a method for increasing the efficiency of the system for cleaning coal-fired superheater boilers from ash sediments using a pulsating flow generator on counter supersonic jets. In the case of incomplete cleaning of superheaters, the heat transfer from the hot flow of combustion products to the superheater pipes, the productivity of the boiler are significantly reduced and the amount of ash emissions increases.

Keywords: ecology, gas emissions, cleaning of superheaters.

Для поддержания на постоянном уровне выходной температуры топочных газов и очистки загрязнений топочных экранов отопительных котлов применяется водяная обдувка. При очистке топочных экранов котлов с помощью водяной обдувки имеет место интенсивное термическое воздействие струи на экранные трубы. Образующийся при сгорании топлива в угольных котлах пепел налипают на поверхности нагрева, накапливается в трубах, оседает на конвективные змеевики [1]. Кроме пепла в процессе сгорания образуются частицы минералов с большим количеством химических веществ. Под воздействием высоких температур, минералы затвердевают и образуют твердую корку на нагревательных поверхностях котлоагрегатов. Загрязнения негативно влияют эффективность эксплуатации всей котельной: уменьшают мощность, «тормозят» работу теплогенераторов, горелок и так далее. Образуется большое количество серы, которая, сгорая, практически полностью превращается в диоксид серы. Пепел вместе с прочими продуктами сгорания «эволюционируют», сначала соединяется в виде отложений, потом накапливается на поверхностях, образуя твердый, практически нерушимый слой осадков. Именно поэтому, все загрязнения стоит удалять вовремя, для этого и необходимы парообдувочные аппараты. Для эффективной очистки поверхности котлов от угольных отходов, необходимо использовать полновыдвижной сажеобдув, выдвижные аппараты обдувки для очистки пароперегревателей, труб и экономайзеров. При очистке топочных экранов котлов с помощью водяной обдувки имеет место интенсивное термическое воздействие струи на экранные трубы. Эффективность работы котла зависит от качества очистки. Суммарная эффективность очистки топочных экранов парообдувочными аппаратами оценивалась по изменению температуры газов в поворотной камере до и после очистки.

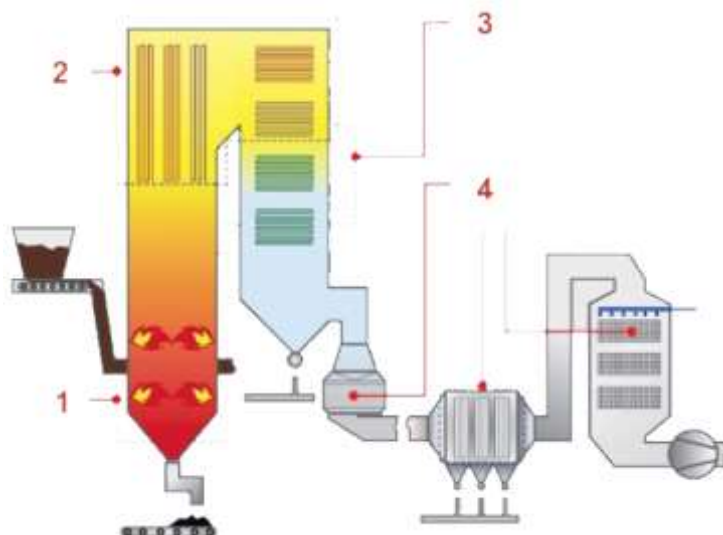


Рис. 1. Схема угольного котла: 1- топка, 2. Пароперегреватель, 3 – Экономайзер, 4 – Воздухоподогреватель.

Рабочим агентом обдувочного аппарата служит вода парогенератора или питательная вода. Аппарат представляет собою сопла, установленные между трубами экранов. Вода в сопла подается под давлением, и в результате падения давления при прохождении через сопла из нее образуется пароводяная струя, направленная на противоположно расположенные участки экранов, фестонов, ширм. Высокая плотность пароводяной смеси и наличие недоиспарившейся в струе воды оказывают эффективное разрушающее действие на отложения шлака, который удаляется в нижнюю часть топki.

Вибрационная очистка основана на том, что при колебании труб с большой частотой нарушается сцепление отложений с металлом поверхности нагрева. Наиболее эффективна вибрационная очистка свободно подвешенных вертикальных труб, ширм и пароперегревателей. Для вибрационной очистки преимущественно применяют электромагнитные вибраторы. Для эффективной работы виброочистки необходимо, чтобы силы, вызванные колебательным движением очищаемой поверхности, были больше сил сцепления между частицами золы и поверхностью труб.

Для удаления отложений с поверхности нагрева давление струи должно составлять примерно 200-250 Па для рыхлых золовых отложений; 400-500 Па для уплотненных золовых отложений; 2000 Па для оплавленных шлаковых отложений. Расход обдувочного агента для перегретого и насыщенного пара, кг/с,

$$G = c \mu d_k^2 \sqrt{\frac{p_1}{v_p}}$$

где $c = 519$ для перегретого пара, $c = 493$ для насыщенного пара; $\mu = 0,95$; d_k -диаметр сопла в критическом сечении, м; p_1 - начальное давление, МПа; v_p - начальный удельный объем пара, м³/кг [2].

Обдувочные аппараты для конвективных поверхностей нагрева имеют многосопловую трубу, не выдвигаются из газохода и только вращаются. Число сопел, расположенных с двух сторон обдувочной трубы, соответствует числу труб в ряду обдуваемой поверхности нагрева. Для регенеративных воздухоподогревателей применяются обдувочные аппараты с качающейся трубой. Пар или вода подводится к обдувочной трубе, и вытекающая из сопла струя очищает пластины воздухоподогревателя.

Одновременное использования обдувки и вибрационного воздействия для очистки пароперегревателей возможно в случае организации пульсирующей струи. На рис. 2 представлены ориентировочные диапазоны излучающих частот и рабочих давлений акустических генераторов. Наименьшими частотами колебаний и приемлемыми рабочими давлениями обладает пульсатор на встречных струях.

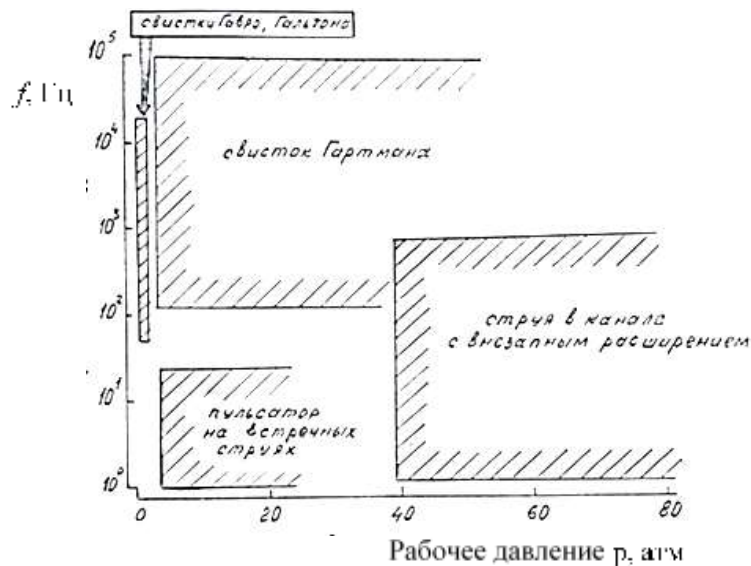


Рис. 2. Частотные характеристики различных акустических генераторов.

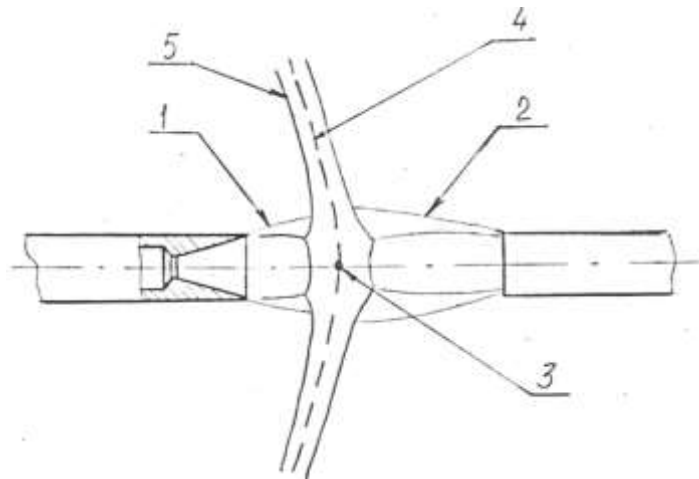


Рис. 3. Структура встречных сверхзвуковых струй, 1- левая струя, 2 – правая струя, 3 – центр контактной поверхности, 4 – контактная поверхность, 5 – расходящаяся веерная струя.

Идея пульсатора на встречных сверхзвуковых струях (рис. 3), основывается на исследованном явлении неоднозначности газодинамической структуры (рис. 4) и положения результирующей веерной струи [3]. При встречном взаимодействии сверхзвуковых струй картина течения обладает множественными конфигурациями устойчивых асимметричных конфигураций (рис. 5).

Для усиления эффекта лавинообразной перестройки ударно-волновой структуры взаимодействующих струй взаимодействующие встречные сверхзвуковые струи помещены в резонатор, разделенный диафрагмой с центральным отверстием (рис. 6).

Дальнейшее развитие пульсирующей обдувки возможно с использованием особенностей не осесимметричного взаимодействия встречных сверхзвуковых струй, когда оси сопел лежат в одной плоскости и направлены под углом от 180 до 60 градусов.

В работе [4] показано, что спектр колебаний веерной струи имеет широкополосный характер, частота колебаний по увеличению угла между осями сопел смещается из области высокочастотных колебаний сторону низкочастотных колебаний.

Использование переменного угла взаимодействия позволит воздействовать на обдуваемые трубы пароперегревателя на разных частотах, что будет способствовать повышению эффективности обдувки. Проектирование технологических установок основывается на выявленных областях существования неоднозначных конфигураций газодинамической структуры, обладающих гистерезисными характеристиками и склонностью к возникновению автоколебательных режимов [5].

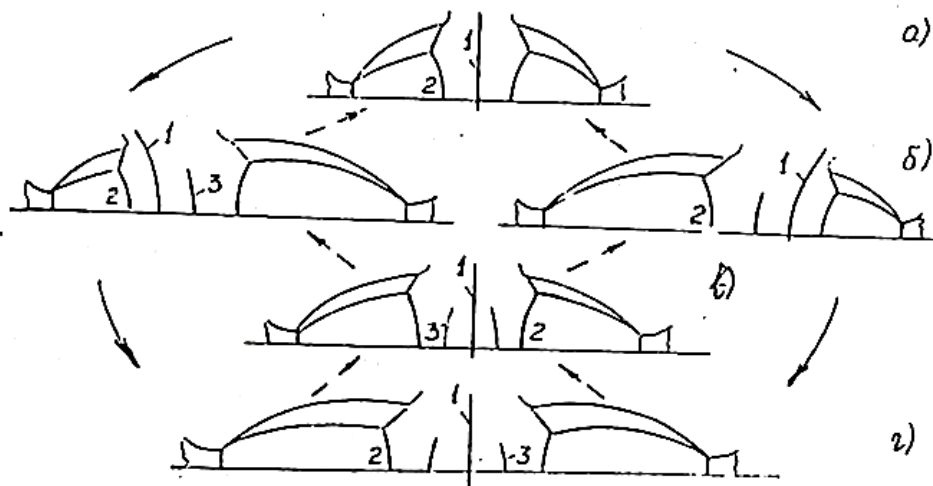


Рис. 4. Изменение волновой структуры встречных недорасширенных сверхзвуковых струй с равными параметрами при увеличении и уменьшении расстояния между срезами сопел; 1 – контактная поверхность, 2 – центральный скачок в первой бочке струи, 3 – скачок уплотнения перед контактной поверхностью.

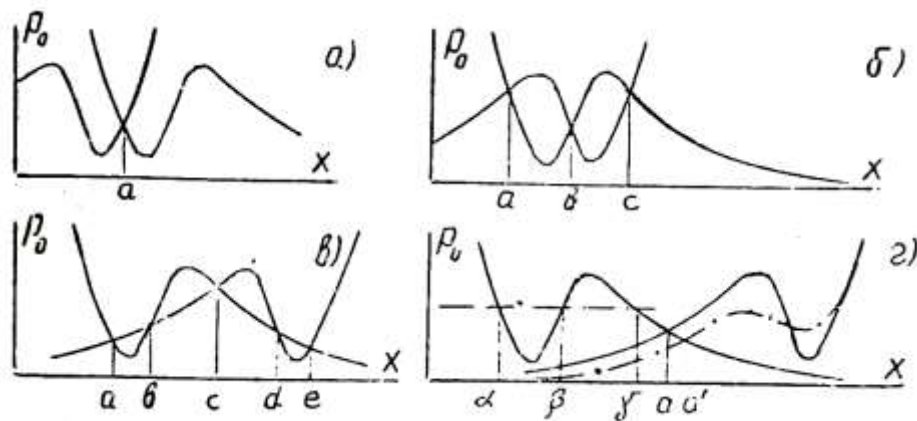


Рис. 5. Условия равновесия по давлению в центре контактной поверхности p_0 для равновесных состояний a, b, c, d, e, f , когда давления от левой и правой струй равны: а) ближнее взаимодействие – одна равновесная точка; б) три равновесные точки; в) пять равновесных точек; г) дальнее взаимодействие – одна равновесная точка.

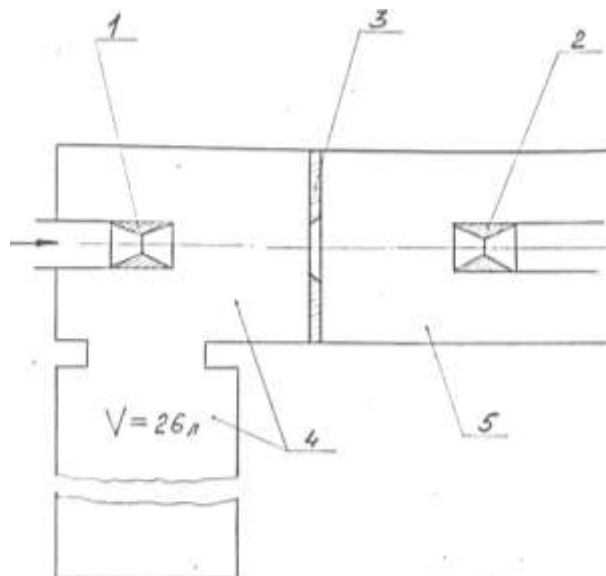


Рис. 6. Конструкция пульсатора на встречных струях с резонансной полостью: 1 – левое сопло, 2 – правое сопло, 3 – диафрагма, 4 – резонатор, 5 – выходной канал пульсирующего потока.

Рассмотренный физический феномен широкополосных колебаний веерной струи может применяться в различных областях промышленности, в том числе, и в условия низких давлений и разреженных сред. Возможность возникновения автоколебательных режимов приводит к повышению интенсивности технологических процессов и эффективности производства [6].

При проведении анализа моделей, лежащих в основе рассматриваемых явлений [7] необходимо отметить возможность применения математических методов потери статической и динамической устойчивости, представленной в работе [8].

Конструкция пульсатора на встречных струях показала работоспособность и проходит отработку энергетических и геометрических характеристик конструкции. Использование пульсирующего потока при обдувке пароперегревателей парового угольного котла позволит повысить эффективность котла и снизить количество выбросов в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Герасимова Н.П., Буйнов Н.Е. Оценка абразивного износа конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов // Вестник ИрГТУ. 2011. № 7 (54). С. 117-120.
- [2] Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. Котельные установки и парогенераторы. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.
- [3] Фаворский В.С., Соколов Е.И., Шаталов И.В. Неоднозначность газодинамической структуры при взаимодействии встречных соосных сверхзвуковых недорасширенных струй // Нестационарные течения газов с ударными волнами, Сб. статей Физико-технич. ин-та им. А.Ф. Иоффе, Л., 1991, С.351-358.
- [4] Favorskiy V.S., Sokolov E.I., Shatalov I.V., Influence of the angle between nozzle axes on the interaction of two identical supersonic jets, Thermophysics and Aeromechanics, 1:1 (200), P. 47-53.
- [5] Фаворский В.С. Выявление области неоднозначности структуры пространственного взаимодействия встречных неодинаковых сверхзвуковых струй // Тезисы Решетневских чтений, СибГУ, 2022, С. 36-37.
- [6] Favorskiy V.S., Savin A.V., Sokolov E.I., Shatalov I.V. Influence of rarefaction on the unsteady impingement process of an underexpanded supersonic jet onto a perpendicular obstacle, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 32:6 (1991), P. 893-897.
- [7] Фаворский В.С. Анализ устойчивости структуры и гистерезиса сверхзвуковых струйных взаимодействий по критерию Неймана // XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Балтийский государственный технический университет (Военмех), Санкт-Петербург, июнь 2022, С.186-187.
- [8] Сиромская Т.В., Фаворский В.С. Эффективность применения теории катастроф для исследования состояния структуры направленных сверхзвуковых недорасширенных струй // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (10-14 апреля 2017 г., Красноярск): в 3 т. Т. 1. – под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017, С. 92-94.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФАХ

Фаворский В.С.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева», Красноярск

Физическое моделирование распространения газовых выбросов и твердых загрязнений в микрорайонах городской застройки в аэродинамической трубе позволяет верифицировать результаты численных методов расчета. Физический эксперимент проводился с использованием дозвуковой аэродинамической трубы УЛАК-1 СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Ключевые слова: физический эксперимент, аэродинамическая труба, газовые выбросы, техногенные катастрофы.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DISTRIBUTION OF GAS EMISSIONS IN MAN-MADE DISASTERS

Favorskiy V.S.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

Physical modeling of the spread of gas emissions and solid pollution in urban areas in a wind tunnel makes it possible to verify the results of numerical calculation methods. The physical experiment was carried out using the subsonic wind tunnel ULAK-1 of the Siberian State University named after M.F. Reshetnev

Key words: physical experiment, wind tunnel, gas emissions, man-made disasters.

В России имеется несколько тысяч промышленных сооружений, разрушение которых может привести к загрязнению местности и массовому поражению людей. За последние десятилетия количество аварий возросло вдвое, число человеческих жертв увеличилось более, чем в пять раз, на порядок увеличился экономический ущерб от таких аварий. Перечень производимых промышленностью и используемых в стране химических веществ насчитывает более 70 тыс. наименований. Химически опасными являются все объекты, на которых в той или в иной мере применяются химические технологии и которые производят, перерабатывают, используют, транспортируют, обрабатывают, хранят или удаляют опасные (вредные) вещества. К таким объектам относятся: химические, нефтехимические и подобные им заводы, где осуществляется получение, использование и хранение аварийно химически опасных веществ (АХОВ), а также предприятия, близкие к химическим производствам, на которых применяются вредные химические вещества и в технологических процессах предусматриваются химические превращения.

Одной из приоритетных проблем обеспечения промышленной безопасности является прогнозирование возможных сценариев развития аварий на химических и нефтехимических производствах, связанных с выбросами опасных газов и паров. Дать адекватное описание динамики и характера распространения опасных газов посредством упрощенных полуаналитических и полуэмпирических моделей, как это делается в практических расчетах, весьма сложно, так как характер атмосферной турбулентности и поле скорости в области источника выброса определяется множеством факторов. Проблема экспериментальных исследований выбросов и последующих загрязнений опасными веществами осложняется трудностью моделирования движения воздушных масс вблизи поверхности земли с учетом географического рельефа и городской застройки.

Численные исследования позволяют для отдельных конфигураций городской застройки воспроизвести детальное распределение концентрации выброса при сносе ветром (рис. 1).

Для проведения эксперимента необходимо создать условия, аналогичные реальной ситуации катастрофы. Например, для исследования выбросов газов при аварии на химическом предприятии можно создать макет соответствующего объекта, заполнить его смесью газов и

провести выброс с заданными параметрами, что позволит верифицировать результаты численного расчета (рис. 2).

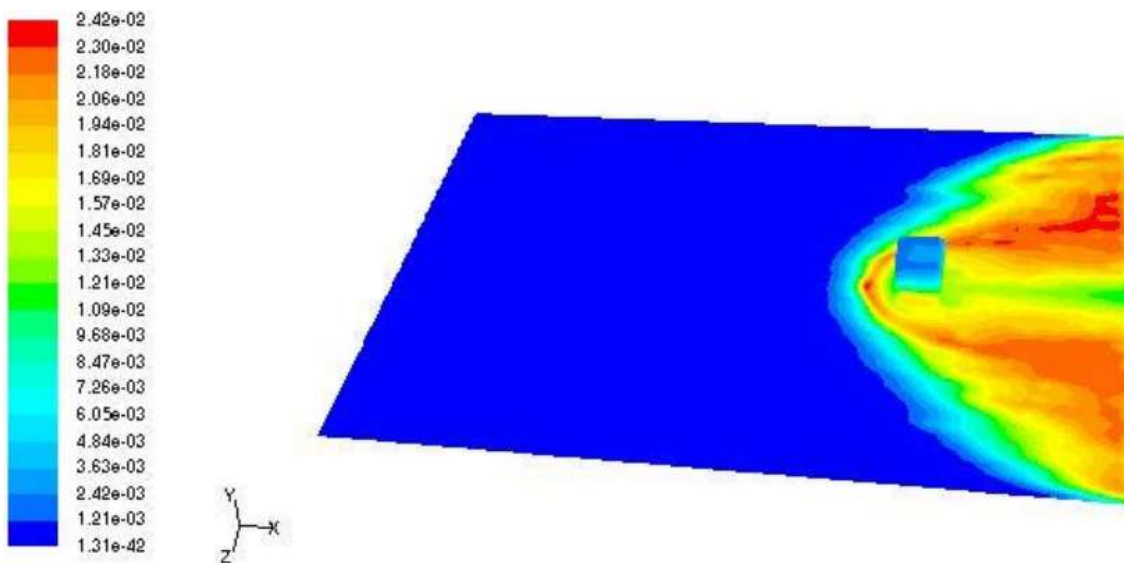


Рис. 1. Процент объемной концентрации газа через 35 секунд от начала рассеивания при скорости 5м/с и устойчивом состоянии атмосферы [1].



Рис. 2. Натурный эксперимент на острове Тони по исследованию распределения концентрации при обтекании строения после выброса газа из верхнего люка цилиндрического хранилища [1].

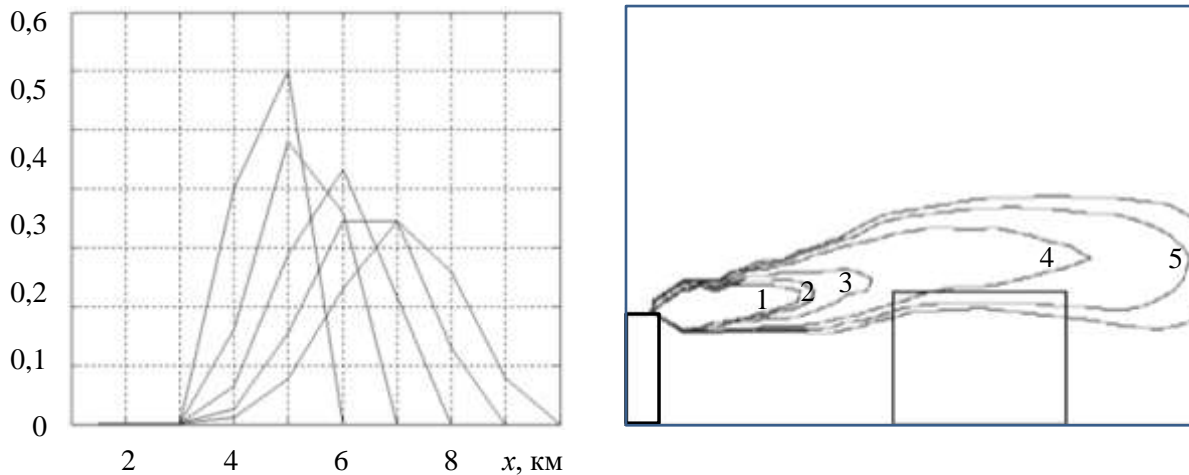


Рис. 3. Зависимость концентрации кг/м^3 и размеров облака вредного выброса от расстояния до места аварии в различные моменты времени [2].

Результаты эксперимента могут быть использованы для разработки планов эвакуации и мер по снижению последствий катастроф. Кроме того, эти данные могут быть использованы для уточнения и корректировки математических моделей распространения газовых выбросов, которые используются в рамках систем предупреждения и прогнозирования техногенных катастроф [2]. При проведении физического эксперимента для измерения распространения газов в окружающей среде можно использовать различные методы, такие как лазерная индикация, инфракрасная камера, детекторы газов и т.д. Полученные данные позволяют оценить скорость распространения облака вредного выброса, его концентрацию и характеристики.

Для определения зон риска и разработки мероприятий предотвращения и снижению последствий катастроф используют приближенные методы оценки распространения опасных выбросов [3].

Характер загрязняющего вещества, его физические свойства существенно влияют на процесс распространения и загрязнения местности. Большинство из них представляет определенную опасность для здоровья людей и экологии, однако к опасным химическим веществам (ОХВ) согласно ГОСТ Р 22.05-94 относят только те вещества, прямое или опосредованное воздействие которых на человека может вызвать острые или хронические заболевания людей или их гибель [4].

Согласно ГОСТ 12.1.007-76 по опасности воздействия на организм человека все ОХВ подразделяются на четыре класса [5]:

- 1) чрезвычайно опасные (I класс) – соединения ртути, свинца, кадмия, цинка; цианистый водород, синильная кислота и ее соли, нитриты; соединения фосфора; галогеноводороды; хлор, фосген и т.д.;
- 2) высокоопасные (II класс) – кислоты; щелочи (аммиак, едкий натр); серосодержащие соединения (сульфиды, сероуглерод и др.); спирты и альдегиды (формальдегид, метиловый спирт) и т.п.;
- 3) умеренно опасные (III класс) – оксиды железа, магния и т.д.;
- 4) малоопасные (IV класс) – бензин, аммиак и т.д.

Значительная часть из перечисленных выше веществ может стать причиной тяжелого поражения людей при авариях на объектах, где осуществляется их хранение и использование в технических процессах. Как известно, чем ниже температура, тем меньше давление паров. Например, Аммиак, охлажденный до температуры $-33,4$ °С, будет иметь давление паров, близкое к атмосферному. Для пропана эта температура составляет -42 °С. Высококипящие АХОВ могут храниться при температуре окружающей среды в закрытых емкостях.

Развитие химических аварий оказывает определяющее влияние на масштабы последствий аварии, так как от особенностей попадания АХОВ в атмосферу зависят дальность распространения газовой волны и время поражающего действия. Большинство АХОВ при аварийных ситуациях сравнительно легко переходит из одного агрегатного состояния в другое, чаще всего из жидкого в парообразное (газообразное), из твердого в аэрозольное и наносят массовые поражения людям, животным и растениям.

Возможный выход облака зараженного воздуха за пределы территории химически опасного объекта, в случае аварии на нем, обуславливает химическую опасность для административно-территориальной единицы, где такой объект расположен. Аналогично химически опасным объектам в основу классификации административно-территориальных единиц (района, города, области, края, республики) также положена опасность поражения населения АХОВ. Критерием для отнесения административно-территориальной единицы к той или иной степени опасности в этом случае является процент населения, проживающего в зоне возможного заражения в случае аварии на химически опасном объекте.

Наземные резервуары, как правило, располагаются группами. По периметру территории, где они располагаются, предусматривается обвалование или ограждения из устойчивых материалов. Несмотря на предпринимаемые меры в области промышленной безопасности (многие потенциально опасные производства спроектированы так, что вероятность крупной аварии на

них оценивается величиной порядка 10^{-4}) полностью исключить вероятность возникновения аварии практически невозможно. Одна из возможных причин аварий – стихийные бедствия.

Моделирование рассеяния атмосферных загрязнителей в промышленной и городской застройке неизбежно связано с моделированием ветровых потоков [8]. Скорость ветра оказывает значительное влияние на локальные рассеивающие факторы и, следовательно, на структуру полей концентраций. Это связано с тем, что между скоростью ветра и концентрациями примесей существует весьма четкая обратная корреляция, в основе которой лежит разбавление газов воздушными массами. Описание структуры ветровых потоков с использованием стандартных подходов, основанных на решении уравнения турбулентной диффузии, в городской застройке достаточно сложно. Это связано с недостаточным качеством входных данных, сложностью определения характеристик турбулентности в условиях города, длительностью выполнения расчетов. Дополняющими для полного численного и натурального экспериментов рассматривается упрощенное описание процессов переноса и рассеяния загрязнителей ветровыми потоками в городской застройке [3]. В городской застройке можно выделить горизонтальную и вертикальную составляющие турбулентного потока. Для описания вертикальной составляющей потока необходимо учитывать, что в приземной атмосфере в городской застройке может наблюдаться термическая и динамическая турбулентность. Термическая турбулентность связана с конвективными движениями. Основной причиной развития динамической турбулентности в приземном слое является деформация воздушного потока при его движении над шероховатой подстилающей поверхностью, причем, чем больше шероховатость, тем больше деформируется воздушный поток.

Для оценки вертикальной компоненты потока учитываются термическая w_t , и механическая составляющие скорости. Величина вертикальных смещений частицы определяется начальным перегревом и температурной стратификацией. Поэтому вертикальная скорость частиц w_t , обусловленная конвективными движениями, может быть найдена из соотношения [10]:

$$w_t(h) = \frac{g}{T} [(T'_0 - T_0) + (\gamma - \gamma_a)h_c] t$$

где T'_0 – температура выброса, T_0 – температура окружающего воздуха у земной поверхности, γ, γ_a – фактический и адиабатический вертикальные градиенты температуры до высоты застройки, T – средняя температура слоя, g – ускорение силы тяжести, h_c – высота подъема примеси, t – время подъема примеси до высоты h_c .

Механическая составляющая вертикальной скорости вследствие выполнения условия непрерывности возникает в результате снижения горизонтальной скорости потока, обеспечиваемого препятствиями в виде городских каньонов, поэтому ее значение будет зависеть от характеристик окружающей территории. Механическая скорость w_m в работе определяется горизонтальной скоростью и, длиной перемешивания L_c и длиной сопротивления каньона L_c . Длина перемешивания является фактически вертикальным размером вихря, и в пограничном слое атмосферы эта величина может расти до высоты 200-300 м. Но в городской застройке с достаточно высокой плотностью длина перемешивания корректируется параметрами каньона, и ее размер становится значительно меньше. Застройка с низкой плотностью и невысокими зданиями не может изменить структуру турбулентности и, следовательно, длину перемешивания.

Эффекты сопротивления турбулентному потоку, создаваемого различными препятствиями, обычно учитываются через длину шероховатости. Такое моделирование эффективно для многих приложений, но имеет свои ограничения. Во-первых, этот метод не дает информации о характеристиках потока между отдельными элементами застройки. Во-вторых, этот параметр определяется только в случае логарифмического профиля ветра над застройкой, а в других условиях определить размер параметра шероховатости однозначно довольно сложно. Поэтому для характеристики сильно неоднородной территории, какой является городская застройка, используется параметр сопротивления среды «городской застройки» K_f [3].

$$K_f = \sqrt{\left[C_{ds} + 0.5 C_{dh}(1 - \eta) P_B \sum \frac{h}{b} \right]}$$

Суммирование в формуле выполняется для всех строений на окружающей каньон территории. Значения констант $C_{ds} = 0.6$ и $C_{dh} = 0.003$ определены с помощью экспериментов в аэродинамической трубе [9].

Плотность застройки P_B определяется как отношение площади, занимаемой зданиями, к общей площади рассматриваемой территории. Параметр проницаемости территории применяется для оценки продуваемости городской застройки относительно набегающего ветрового потока. Проницаемость $\eta = \eta(\varphi)$ является функцией угла направления ветра относительно городской застройки, что требует проведение измерений в аэродинамической трубе продувок для различных углов ориентации модели относительно вертикальной оси [9].

Методика оценки проницаемости городской застройки при распространении облака загрязнения АХОВ позволяет прогнозировать масштабы зон поражения при авариях на технологических емкостях и хранилищах, при транспортировке железнодорожным, трубопроводным и другими видами транспорта, а также в случае разрушения химически опасных объектов. Она распространяется на случаи выброса АХОВ в атмосферу в газо-, парообразном и аэрозольном состоянии. При этом масштабы заражения АХОВ в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния рассчитывают по первичному и вторичному облаку, например для сжиженных газов – отдельно по первичному и вторичному облаку; для сжатых газов – только по первичному облаку, для ядовитых жидкостей, кипящих при температуре окружающей среды и только по вторичному облаку [3].

В качестве исходных данных для прогнозирования масштабов заражения АХОВ используются следующие параметры:

- общее количество АХОВ на объекте. Данные по размещению их запасов в емкостях и технологических трубопроводах;
- количество АХОВ, выброшенных в атмосферу, и характер их разлива на подстилающей поверхности («свободно», «в поддон», или «обваловку»);
- высота поддонов или обваловки складских емкостей;
- метеорологические условия: температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м, степень вертикальной устойчивости воздуха.

Самопроизвольное развитие турбулентности в атмосфере связано с гравитационной устойчивостью атмосферы. Процессы стратификации атмосферы характеризуются величиной критерия Ричардсона. Тепловая турбулентность связана с наличием флуктуаций тепловых потоков. Облачный покров уменьшает или увеличивает потери тепла, способствуя стабилизации приземного слоя атмосферы. Сильные ветры также способствуют нейтральной устойчивости. Ночью при ясном небе и слабом ветре атмосфера становится устойчивой, в то время как в дневное время параметры атмосферы становятся нестабильными. В дневное время требуются дополнительные измерения или оценки солнечной радиации для определения классов устойчивости. В ночных условиях можно использовать радиометры полного излучения. Среднее квадратичное отклонение колебаний направления ветра определяются с помощью измерений термоанемометром. Колебания направления ветра, масштабы и периодичность колебаний направления ветра являются функциями интенсивности турбулентности (размера вихрей) [11]. На практике для описания стабильности атмосферы используют число Ричардсона Ri , являющееся одним из основных параметров, учитываемых в ряде экспериментов по атмосферной дисперсии и отражающее степень стратифицированности атмосферы [10]:

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right)}{\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2}$$

где g – ускорения силы тяжести (m/c^2); T – температура (K); γ_a – адиабатический вертикальный градиент (K/m); U – средняя скорость ветра (m/c); z – высота над уровнем моря (m).

Табл. 1. Степень вертикальной устойчивости воздуха в зависимости от метеорологических условий.

	Ночь		Утро		День		Вечер	
Скорость ветра, м/с	Ясно, переменная облачность	Сплошная облачность	Ясно, переменная облачность	Сплошная облачность	Ясно, переменная облачность	Сплошная облачность	Ясно, переменная облачность	Сплошная облачность
< 2	ИН	ИЗ	ИЗ	ИЗ	К	ИЗ	ИН	ИЗ
2...4	ИН	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ
> 4	ИН	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ	ИЗ

Примечание. ИН – инверсия; ИЗ – изотермия; К – конвекция

Однако, как правило для измерения $\frac{\partial u}{\partial z}$ требуется точная и чувствительная аппаратура, поэтому расчет Ri общепринятым методом может оказаться затруднительным. Объемное число Ричардсона определяется по формуле:

$$Ri_g = \frac{\frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) z^2}{U_z^2},$$

где U_z скорость ветра на среднегеометрической высоте, которой замеряется температура для получения температурного профиля ($м/с^2$).

Параметр Ri_g , измеряется проще, чем Ri , поскольку для его определения не требуется знание градиентов скорости ветра. На практике U_z можно определить с помощью анемометра, установленной на метеорологической башне. При $Ri < 0$ и градиенте температуры $\frac{dT}{dh} < \gamma_a$, то стратификация атмосферы неустойчивая; если $Ri > 0$ и $\frac{dT}{dh} > -\gamma_a$ то стратификация устойчивая; и безразличная в случае $Ri = 0$, $\frac{dT}{dh} = \gamma_a$. Здесь γ_a - сухоадиабатический вертикальный градиент температуры сухой воздушной частицы, адиабатически вертикально перемещающейся в атмосфере. При сухоадиабатическом подъеме воздух, расширяясь охлаждается приблизительно на один градус на каждые сто метров.

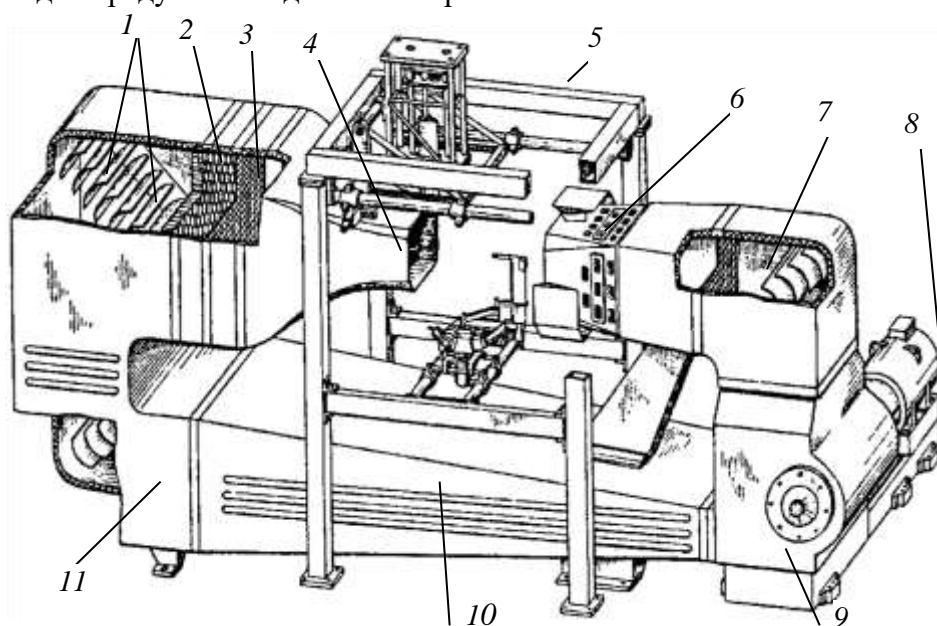


Рис. 4. Аэродинамический комплекс УЛАК-1: 1 – направляющие лопатки; 2 – хонейкомб; 3, 7 – сетки; 4 – сопло; 5 – координатное устройство; 6 – диффузор; 8 – электродвигатель; 9 – вентиляторная установка; 10 – α -, β -механизм для изменения угла атаки и угла скольжения; 11 – воздушный канал.

Годовой ход скорости ветра в тропосфере в большой степени определяется годовым ходом горизонтальных градиентов давления. По характеру движения воздушных масс тропосферу делят на слои:

- 1) приземный слой (высота 50-100 м, турбулентность ограничивается процессами трения о поверхность Земли, зависит от ее состава, рельефа и застройки);
- 2) пограничный слой высотой до 1000-1500 м;
- 3) свободная атмосфера.

Наибольший вертикальный градиент скорости ветра наблюдается в нижнем 200-метровом слое (1-1,5 м/с на каждые 100 м высоты).

Для проведения экспериментальных исследований используется аэродинамический комплекс УЛАК-1 СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, представленный на рис. 4 [12]. Размеры рабочей части аэродинамической трубы 400x600x800 мм, скорость потока до 60 м/с.

Для моделирования в рабочую часть устанавливается модель промышленных зданий и примыкающей к ней городской застройки. Для регистрации параметров потока в аэродинамическом комплексе имеется трехкоординатный приемник параметров потока, позволяющий измерять распределение скоростей с точностью, до 0,1 м/с и скоса потока в вертикальной и горизонтальной плоскости с точностью до 0,5 градуса, для измерения концентрации примесей используется газоанализатор [13]. Измерительная система позволяет регистрировать силы и моменты, действующую на модель городской застройки, установленной в рабочей части аэродинамической трубы и провести уточнение коэффициента проницаемости модели K_f , зависящего от C_{ds} , C_{dh} .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Davies M.E., Singh S.* The Phase II Trail: A data set the effect of obstructions // *Journal of Hazardous Materials*, V. 11, 1985, P. 301-323.
- [2] *Ортина М.Н., Купцов А.И., Гимранов Ф.М.* Математическое моделирование рассеивания облаков тяжелых газов в условиях промышленной застройки: влияние метеоусловий // *Вестник технологического университета*, 2017. № 10. С. 115-118.
- [3] *Захаров Ю.В., Михайлюта С.В., Суховольский В.Г., Тасейко О.В.* Техногенное загрязнение атмосферы, моделирование и идентификация источников // *Труды VII Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых. Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф.* Красноярск, 13-17 окт. 2003 г. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. С.124-125.
- [4] ГОСТ Р 22.0.05-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации.
- [5] ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
- [6] *Купцов А.И., Исламхузин Д.Я., Гимранов Ф.М.* Экспериментальная установка для имитации процессов распространения облаков газов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. №11. С. 166-168.
- [7] *Ньюстадт Ф.Т.М., Ван Дон Х.* Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Гидрометеоиздат, Л. 1985. 350 с.
- [8] *Raupach M.R.* Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plan displacement height as functions of canopy height and area index // *Boundary-Layer Meteorology*. 1994. № 71. P. 211-216.
- [9] *Воронцов П.А.* Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 296 с.
- [10] Анализ процессов и явлений при распространении газовых выбросов в атмосфере
- [11] *Афанасьев Ю.А.* Мониторинг и методы контроля окружающей среды: учеб, пособие: в 2 ч. М.: Изд-во МНЭПУ, 1998.
- [12] *Фаворский В.С.* Исследование аэродинамических характеристик модели перспективного самолета на УЛАК-1 // *Тезисы Решетневских чтений, СибГУ, 2022, с.36-37.*
- [13] Газоанализатор взрывоопасных газов и паров многоканальный Сигма-1М. Руководство по эксплуатации. ООО «Политехформ-М», Москва 2010. 35 с.

ТОЧНОСТЬ ОПИСАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ ГЛОБАЛЬНЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ АРХИВОМ CRU TS НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Якубайлик Т.В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В работе проведен сравнительный анализ метеорологических характеристик на нескольких территориях Красноярского края по данным глобального сеточного архива CRU TS с многолетними данными метеостанций Красноярского края за период 2006-2021 гг. Проведено сопоставление среднегодовых значений температуры воздуха и годовых сумм осадков. Показано, что на рассмотренных территориях Красноярского края данные для осадков архива CRU TS 2.1 воспроизводят данные наблюдений с существенными погрешностями. Температура же воспроизводится с гораздо большей точностью.

Ключевые слова: данные метеонаблюдений, гидрометеорология, глобальные сеточные архивы, температура воздуха, атмосферные осадки, пространственные данные, мониторинг природных процессов.

ACCURACY OF AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION DESCRIPTION BY THE CRU TS GLOBAL CLIMATE ARCHIVE ON AGRICULTURAL TERRITORIES OF THE KRASNOYARSK REGION

Iakubailik T.V.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

The paper presents a comparative analysis of meteorological characteristics in several territories of the Krasnoyarsk Region according to the data of the CRU TS global grid archive with long-term data from meteorological stations in the Krasnoyarsk Region for the period 2006-2021. A comparison of the average annual values of air temperature and annual precipitation is carried out. It is shown that in the considered territories of the Krasnoyarsk Region, the data for precipitation from the CRU TS 2.1 archive reproduce observational data with significant errors. The temperature is reproduced much more accurately.

Keywords: meteorological data, hydrometeorology, global grid archives, air temperature, precipitation, spatial data, monitoring of natural processes.

Введение. Сельское хозяйство по своей природе подвержено ряду рисков и воздействию факторов неопределенности. Многие из этих факторов риска имеют климатическую составляющую. При исследовании климатических изменений часто используются глобальные сеточные архивы, полученные интерполяцией данных наблюдений на метеостанциях, либо путем модельного реанализа. Использование таких климатических архивов объясняется в первую очередь их доступностью в условиях недостаточной плотности сети метеостанций и сложностью получения имеющихся данных. Наиболее распространенные помесечные сеточные архивы университета Восточной Англии CRU TS и университета Делавера, основанные на интерполяции данных наблюдений, а также два архива, полученные при помощи модельного реанализа (ERA-40 и NCEP-1), были рассмотрены в работе [1]. Авторы показали, что все они воспроизводят данные наблюдений температуры и осадков на территории России с существенными погрешностями, причем имеют характерные неравномерные пространственные распределения.

В работе [3] отмечается практическое совпадение глобальной величины осадков архивов W&M и CRU TS, тогда как в [2] указывается, что точность этих архивов на территории России заметно меньше, чем в среднем по всему миру.

В данной работе проведена оценка качества глобального сеточного архива CRU TS 2.1 приземной температуры воздуха и атмосферных осадков применительно к сельскохозяйственным территориям Красноярского края, входящим в ФИЦ КИЦ СО РАН в рамках пилотного

проекта по цифровизации сельского хозяйства Красноярского края. Для анализа сельскохозяйственного производства предыдущих лет и для прогнозирования урожайности необходимы различные метеорологические данные. Из них температура воздуха и осадки являются наиболее важными, так как на их основе вычисляются многие сельскохозяйственные индексы.

В пилотном проекте изучаются три сельскохозяйственных территории: ОПХ (Опытное-производственное хозяйство) Михайловское, ОПХ Курагинское и ОПХ Минино. Если в Курагино и Минино есть действующие метеостанции, то в Михайловке ее нет. Поэтому приходится изыскивать возможности получения метеоданных из других источников.

Материалы и методы. Архив погоды метеостанций был взят с сайта [r5](http://r5.ru) [4]. Ближайшие метеостанции к Курагино расположены в Каратузском, Идринском и Минусинске. Минино расположено в окрестностях Красноярска., но из всех метеостанций доступен только архив погоды на метеостанции Опытное Поле. Ближайшие метеостанции к Михайловке находятся в Назарово, Ужуре, Шарыпово и Балахте.

Проведен анализ временных рядов среднегодовой температуры воздуха и суммарного за год количества осадков. Для этого климатические характеристики самой близкой ячейки сетки архива CRU TS [5] сравнивались с данными наблюдений на близлежащих метеостанциях. Данные архива расположены на сетке размером в $0,5^\circ$. При этом в данных указаны середины ячеек сетки. При этом метеостанции Курагино и Каратузское оказались в одной ячейке. Аналогично в одной ячейке находятся метеостанции Минино и Опытное Поле.

Для обработки данных использовался язык Python. Данные агрегировались по годам. После проверки ряда на стационарность, из него убирался тренд и сезонность. После этого вычислялся коэффициент корреляции [6,7].

Обсуждение результатов. Сравнительный анализ среднегодовых температур воздуха показывает, что существует тесная связь между рядами температуры воздуха, полученными из данных метеорологических станций и архива CRU TS (см. таблицу). Корреляционная связь между данными температуры воздуха сеточного архива и метеорологическими станциями составляет 0,78 – 0,96. В то же время в некоторые годы, например, в 2010 г. и 2011 г. согласованность хода температур воздуха нарушается (рис. 1). Чаще всего температура по данным CRU TS завышена. Наибольшая разница температур воздуха между наблюдаемыми на метеостанции и архивом имеет место в Ужуре, где среднегодовые температуры воздуха архива CRU TS 4.06 за период 2006...2021 гг. были завышены от 0,7 °С (в 2007 г.) до 2,92 °С (в 2013 г.). Среднегодовые температуры воздуха архива завышены в Балахте от 0,27 до 2,67 °С, Идринском до 2 °С. Следует отметить, что наибольшие различия температуры воздуха в Минино, Назарово и Шарыпово приходятся на один и тот же год (2010 г.). В то же время на метеостанции Шарыпово данные CRU TS занижены от 0,17 до 2 °С. На метеостанции Каратузское среднегодовая температура воздуха архива CRU TS занижена в 2009-2011 гг. от 0,5 °С до 2 °С.

Что касается годовых сумм осадков, то неплохая корреляция прослеживается только по двум метеостанциям – Идринское и Минусинск (0,75 и 0,73 соответственно). На метеостанции Балахта корреляция 0,67, на метеостанции Минино – 0,59. На остальных метеостанциях корреляция ниже 0,5.

Завышенные годовые суммы осадков архивом CRU TS 4.06 по сравнению с метеоданными наблюдаются на большинстве метеостанций – в Каратузском от 159 до 1020 мм, в Минино, от 109 до 296 мм, в Опытном Поле от 13 до 333 мм, в Ужуре от 54 до 212 мм (рис. 2).

В Назарово, Шарыпово, Балахте и Курагино в разные годы мы наблюдаем как завышение, так и занижение данных. В Назарово наибольшее занижение 86 мм в 2020 году, наибольшее завышение 175 мм в 2013 году. В Шарыпово наибольшее занижение 44 мм в 2012 году, наибольшее завышение 132 мм в 2013 году. В Балахте наибольшее занижение 145 мм в 2017 году, наибольшее завышение 94 мм в 2014 году. В Курагино наибольшее занижение 206 мм в 2018 году, наибольшее завышение 379 мм в 2015 году.

На метеостанции Идринское годовые суммы осадков по данным архива CRU TS 4.06 завышены на 372-531 мм, а в Минусинске 358-531 мм. То есть почти в 2 раза. Тем не менее эти

данные могут быть скорректированы по разнице математических ожиданий [7]. На тех же метеостанциях, где корреляция маленькая, такая коррекция не приведет к положительному результату.

Корреляционная связь осадков и температуры воздуха между метеорологическими станциями и климатическими данными архива CRU TS 2.1, координаты метеорологических станций и соответствующих им ячеек.

Название метеостанции	Координаты метеостанции	Координаты соответствующей ячейки архива CRU_TS	Коэффициент корреляции для осадков	Коэффициент корреляции для температуры воздуха
Курагино	53,88° с.ш.; 92,67° в.д.	53,75° с.ш.; 92,75° в.д.	0,03	0,82
Каратузское	53,6° с.ш.; 92,85° в.д.	53,75° с.ш.; 92,75° в.д.	-0,24	0,8
Идринское	54,37° с.ш.; 92,13° в.д.	54,25° с.ш.; 92,25° в.д.	0,75	0,91
Минусинск	53,7° с.ш.; 91,7° в.д.	53,75° с.ш.; 91,75° в.д.	0,73	0,96
Минино	56,06° с.ш.; 92,7° в.д.	56,25° с.ш.; 92,75° в.д.	0,59	0,89
Опытное Поле	56,03° с.ш.; 92,7° в.д.	56,25° с.ш.; 92,75° в.д.	0,48	0,78
Назарово	56° с.ш.; 90,4° в.д.	56,25° с.ш.; 90,25° в.д.	0,32	0,92
Ужур	55,32° с.ш.; 89,85° в.д.	55,25° с.ш.; 89,75° в.д.	0,28	0,91
Шарыпово	55,53° с.ш.; 89,2° в.д.	55,75° с.ш.; 89,25° в.д.	0,25	0,94
Балахта	55,38° с.ш.; 91,63° в.д.	55,25° с.ш.; 91,75° в.д.	0,67	0,91

Заключение. Данные по температуре сеточного архива CRU TS пригодны для использования в тех районах, где отсутствуют стационарные метеорологические станции. Однако, необходимы дальнейшие исследования точности воспроизведения температуры воздуха и в других районах Красноярского края. Использование осадков архива CRU TS 4.06 для данной территории могут давать ошибочные результаты, например, в долгосрочном прогнозировании. Данные по осадкам требуют поиска дополнительных источников, либо тщательной проверки измерений на существующих метеостанциях. По рисункам видно лучшее совпадение примерно до 2014 года. Результаты, представленные в данной работе, следует считать предварительными, так как только на основе глубоких оценок точности данных архива CRU TS применительно к территории Красноярского края, с использованием всех имеющихся данных архива (в том числе и месячных), в узлах регулярной сетки можно сделать конкретные выводы. Тем не менее, на основе предварительных результатов, очевидно, что точность воспроизведения температуры воздуха на территории Красноярского края глобальным климатическим архивом CRU TS 4.06 более высокая, чем у осадков.

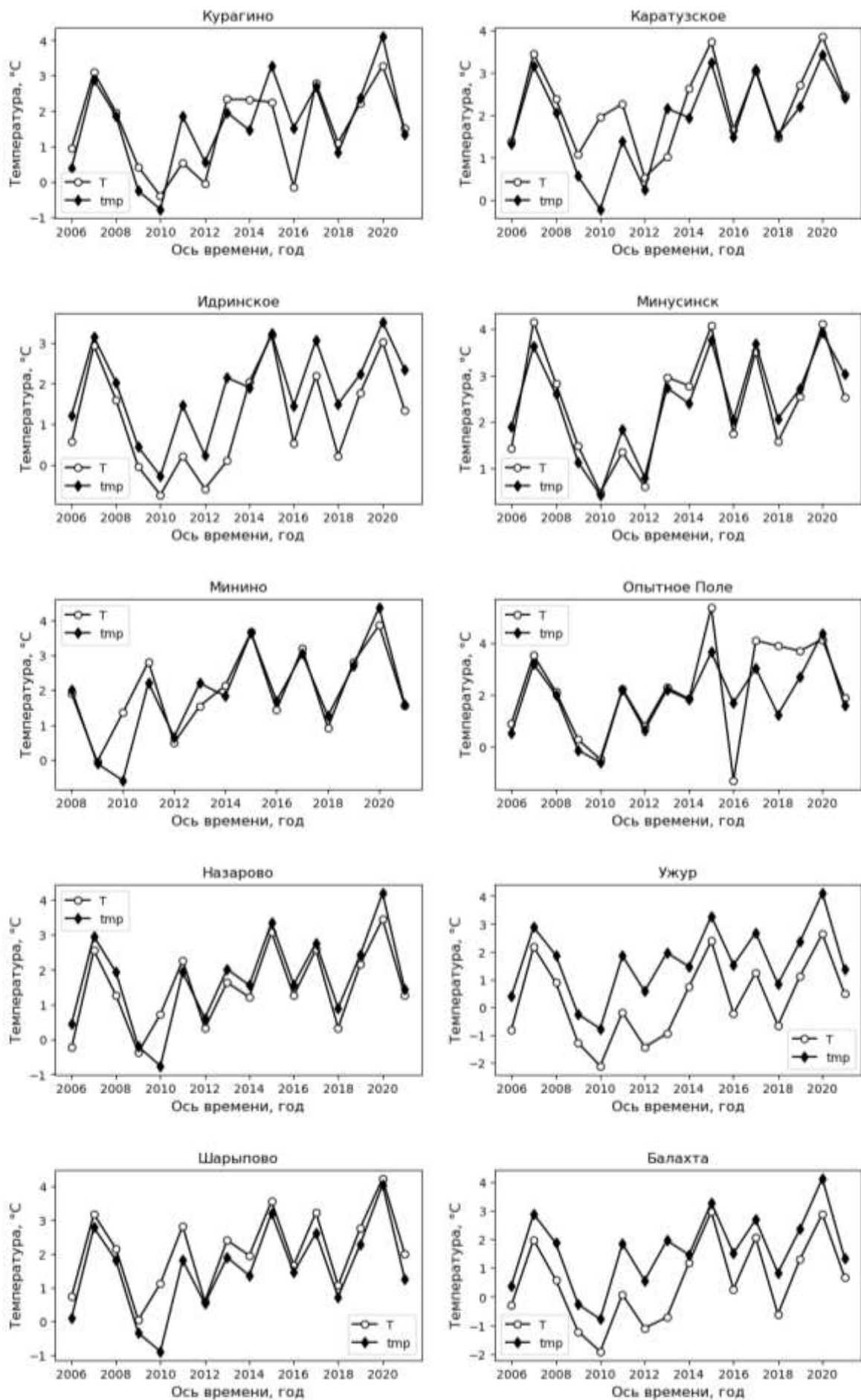


Рис. 1. Среднегодовые температуры воздуха с 2006 по 2021 год: Т – данные архива погоды гр5 с метеостанций, tmp – из архива CRU TS 4.06.

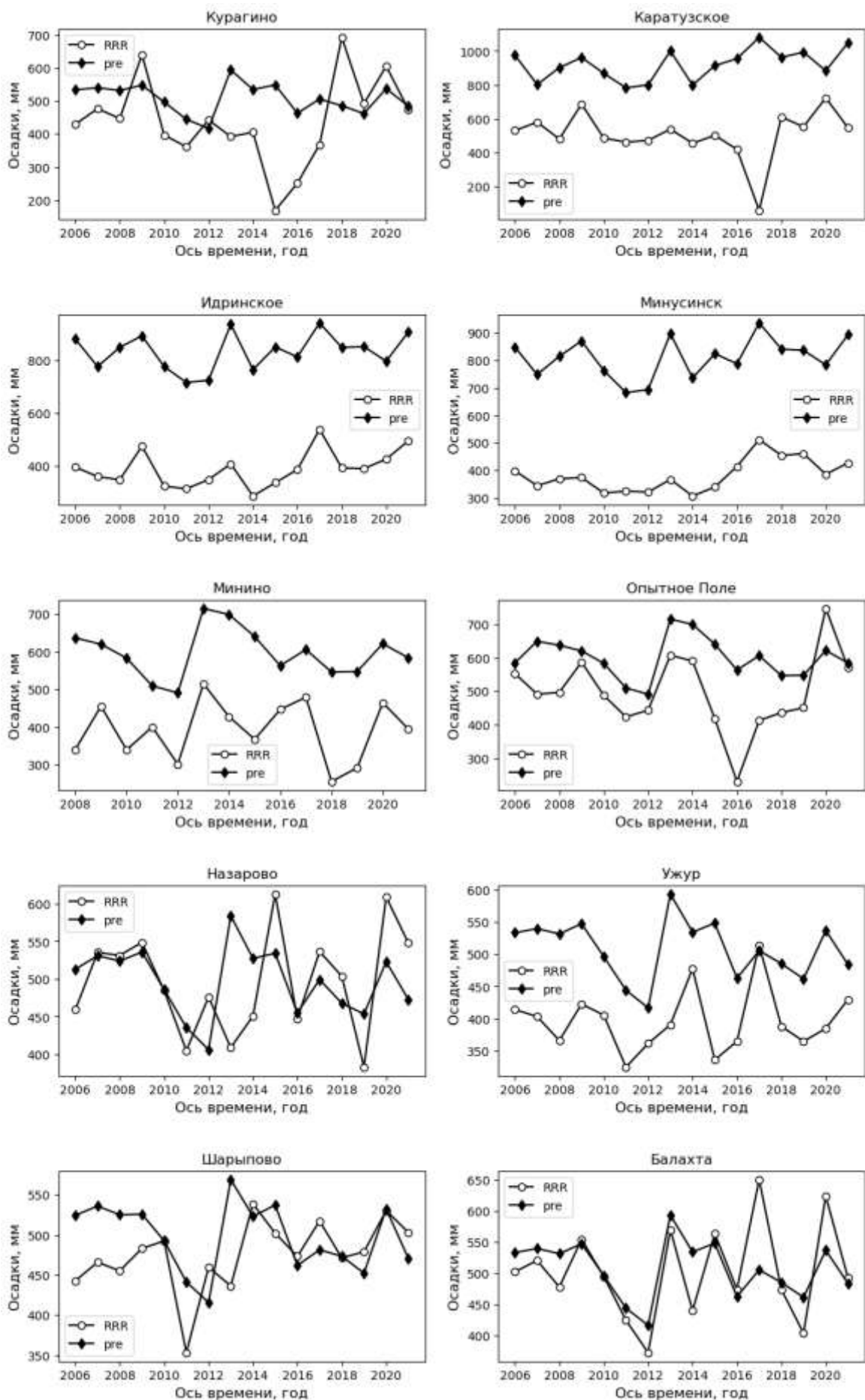


Рис. 2. Годовые суммы осадков с 2006 по 2021 год: RRR – данные архива погоды гр5 с метеостанций, pre – из архива CRU TS 4.06.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.* О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальным климатическим архивом // *Метеорология и Гидрология*. 2009. № 10. С. 79-89.
- [2] *Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клеценко Л.К.* О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России. // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 10. С. 5-23.
- [3] *Переведенцев Ю.П.* Теория климата: Учебное пособие. 2 изд. перераб. и доп. Казань: Казан. гос. ун-та, 2009. 504 с.
- [4] <http://gp5.ru> (дата обращения 05.07.2023).
- [5] *Harris I., Osborn T.J., Jones P. et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. // *Sci Data*. 2020. №7(109). <https://www.nature.com/articles/s41597-020-0453-3> (дата обращения 05.07.2023).
- [6] *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. М.: «Мир», 1976. 756 с.
- [7] *Мишулина О.А.* Статистический анализ и обработка временных рядов. М.: МИФИ. 2004. С. 180.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО
МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ
БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БПТ

Брагинская Л.П.¹, Григорюк А.П.¹, Ковалевский В.В.¹, Семинский И.К.²

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Институт Земной коры СО РАН, Иркутск

В работе представлена разработанная авторами цифровая платформа (ЦП) «Геофизический мониторинг опасных геологических процессов», предназначенная для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ).

Платформа построена по клиент-серверной архитектуре. Хранение, обработка и анализ данных осуществляется на сервере, к которому пользователи могут обращаться через интернет посредством веб-браузера. Удобный пользовательский интерфейс позволяет синхронно визуализировать результаты анализа данных, полученных на разных станциях мониторинга различными методами в выбранном пользователем интервале времени.

ЦП включает семантическую подсистему для решения задач семантического поиска, классификации, структуризации и интеграции информации по геофизическому мониторингу Байкальской природной территории.

Ключевые слова: геофизический мониторинг, цифровые платформы, предвестники землетрясений, онтологии.

INFORMATION SUPPORT FOR INTEGRATED GEOPHYSICAL MONITORING OF THE BNT

Braginskaya L.P.¹, Grigoruk A.P.¹, Kovalevsky V.V.¹, Seminsky I.K.²

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk

² Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

The paper presents a digital platform (DP) «Geophysical monitoring of hazardous geological processes» developed by the authors, designed to integrate and analyze data coming from several polygons located within the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory (CEZ BNT). The platform is based on client-server architecture. Data storage, processing and analysis are performed on the server, which users can access via the Internet with a web-browser. The user-friendly interface allows synchronous visualization of the results of data analysis obtained at different monitoring stations by different methods in a time interval selected by the user.

DP includes a semantic subsystem for solving problems of semantic search, classification, structuring and integration of information on geophysical monitoring of the Baikal natural territory.

Keywords: geophysical monitoring, digital platforms, earthquake precursors, ontologies.

Введение. Байкальская природная территория (БПТ) располагается в южной части Восточной Сибири на территории республики Бурятия, Иркутской области, Забайкальского края. В ее состав входят озеро Байкал с островами, прилегающая к озеру водоохранная зона, водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, а также особо охраняемые природные территории, расположенные на берегах озера Байкал, и прилегающая к озеру территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него. Площадь БПТ составляет 360750 кв. км, в том числе площадь озера Байкал – 31500 кв. км.

Байкальская природная территория характеризуется комплексом исключительных природных особенностей, многие из которых не имеют аналогов на планете. В 1996 г. озеру Байкал был присвоен статус «Объект всемирного природного наследия» в соответствии с Конвенцией ЮНЕСКО «Об охране всемирного культурного и природного наследия» [10].

В последние годы многие эксперты, и население Байкальского региона отмечают ухудшение экологической ситуации вследствие участвовавших природных катаклизмов и усиления антропогенного воздействия на окружающую среду. [3]

К одним из наиболее опасных экологических рисков Байкальского региона можно отнести сейсмические риски. Озеро Байкал заполняет котловину, являющуюся частью Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Тектонический процесс формирует БРЗ и инициирует активизацию связанных с ее развитием опасных геологических явлений (землетрясений, селевых потоков, обвалов, оползней и др. процессов), которые в свою очередь приводят к нарушению экологического равновесия в системе оз. Байкал и на окружающей территории. Кроме того, в 2020–2023 годах фиксируется смещение сейсмоактивности в густонаселённую южную и центральную части Байкальского рифта. Последним разрушительным землетрясением было Цаганское ($M_w \approx 7,5$), произошедшее в дельте реки Селенги 12 января 1862 года. В результате катаклизма интенсивностью в эпицентре не менее 10 баллов, под воды оз. Байкал ушел участок суши площадью около 230 кв. км, ныне — залив Провал. Вместе с суши под воду ушли три бурятские деревни и погибли тысячи голов скота и трое человек. Очевидно, что, если бы эпицентр землетрясения находился ближе к урбанизированному кластеру, не удалось бы избежать тысяч человеческих жертв.

Свидетельством неослабевающей сейсмической активности Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) являются инструментально зафиксированные землетрясения различной интенсивности и энергетического класса, произошедшие в последние десятилетия в Байкальском регионе и на сопредельных территориях — Тыва, Монголия. В год на территории БРЗ регистрируется до нескольких тысяч землетрясений, в основном слабых. Ощутимые события с магнитудой 5.0 и более происходят в Прибайкалье со средней периодичностью в 5 лет. За последние 300 лет здесь зарегистрировано более 15 крупных сейсмособытий, интенсивность которых была выше семи баллов. К наиболее сильным относятся: — Южно-Байкальское (25.02.1999 г.) с магнитудой $M = 6.0$; — Кичерское (21.03.1999 г.) с $M = 5.8$; — Уоянское (16.09.2003 г.) с $M = 5.9$; — Чаруодинское (10.11.2005 г.) с $M = 5.9$; — Култукское (27.08.2008 г.) с $M = 6.3$. Кударинское землетрясение магнитудой 5.5, произошло 10 декабря 2020 года в байкальском заливе Провал, который сам образовался в результате сильного землетрясения в 1862 году. 8 июня 2022 года на юге Байкала произошло землетрясение, эпицентр которого находился в акватории в 18 км от поселка Большое Голоустное. Магнитуда предварительно оценивалась в 5.7.

Важным элементом мониторинга и прогнозирования экологической обстановки БПТ является организация систематических наблюдений, а также получение и анализ цифровой информации об активности опасных геологических процессов с целью выявления предвестников их экстремальных проявлений для создания моделей прогнозирования.

Комплексный геофизический мониторинг БПТ базируется на организации сети непрерывных долговременных наблюдений за параметрами геофизических полей на исследуемой территории [8]. Институтом Земной коры СО РАН создана сеть геофизического мониторинга, состоящая из полигонов, расположенных на территории БПТ: «Приольхонье», «Бугульдейка», «Листвянка», «Зун-Мурино» [8]. Мониторинг включает регистрацию, а также дальнейшую оперативную обработку и интерпретацию данных с выходом на прогнозные оценки.

В представленной работе рассматривается организация информационной поддержки комплексного геофизического мониторинга БПТ. Цифровая платформа (ЦП), разработанная авторами, осуществляет функции хранения, обработки и анализа данных, а семантическая подсистема решает задач семантического поиска, классификации, структуризации и интеграции информации.

Архитектура и компоненты цифровой платформы геофизического мониторинга БПТ. Разработанная цифровая инфраструктура представляет собой электронную онлайн-платформу для интеграции данных и знаний комплексного мониторинга опасных геодинамических, инженерно-геологических и гидрогеологических процессов, протекающих в регионе интенсивного природопользования центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ).

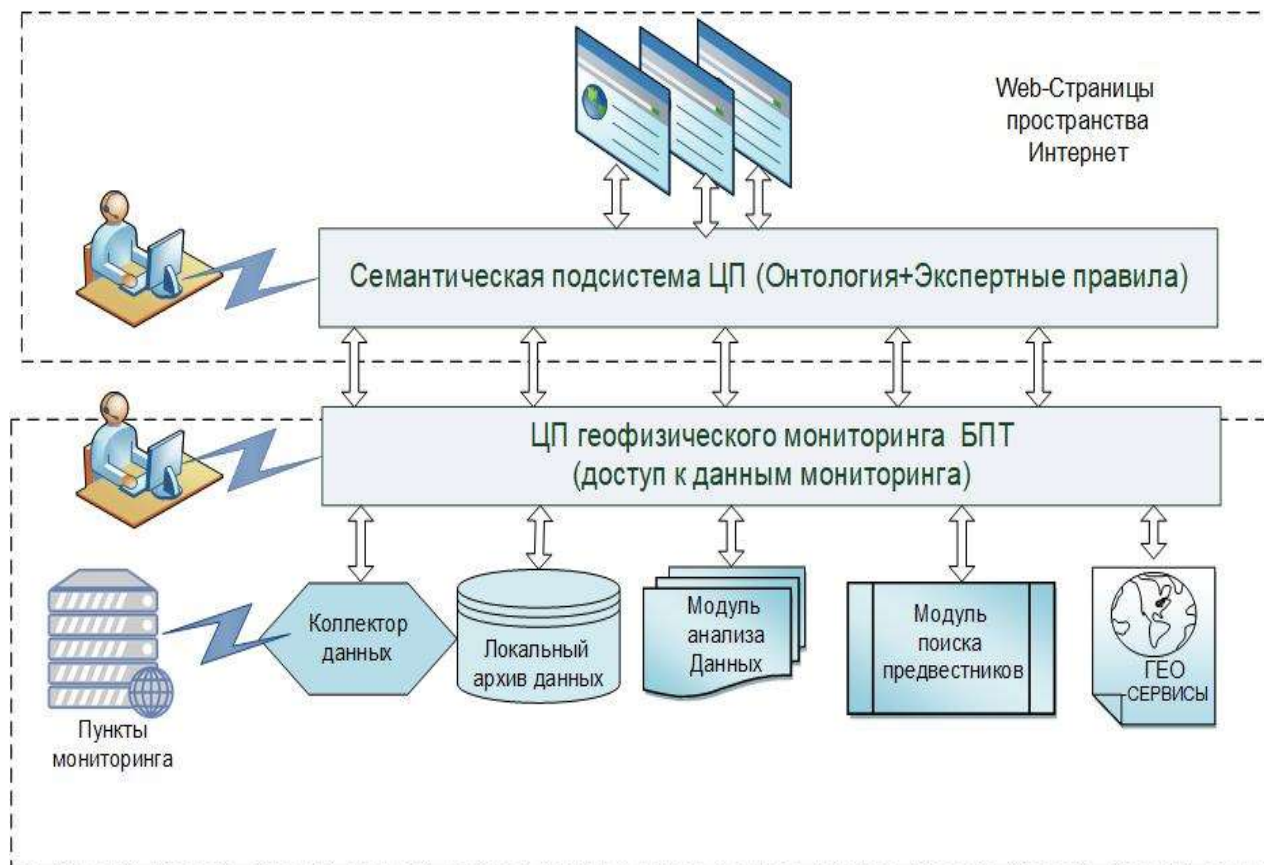


Рис. 1. Структурная схема ЦП.

На рис. 1. Представлена структурная схема ЦП. Она состоит из двух взаимодействующих подсистем: ЦП доступа и анализа данных и Семантической подсистемы. Каждая из подсистем имеет свой пользовательский интерфейс. Пользователь может обращаться как непосредственно к стартовой странице пользовательского интерфейса ЦП, так и воспользоваться сервисами Семантической подсистемы.

В состав ЦП входит Коллектор данных, который периодически загружает данные с датчиков, расположенных в пунктах мониторинга в Локальное хранилище. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие с пользователями Рабочих станций. Модуль анализа данных предоставляет сервисы по предварительной обработке данных, включая заполнение пропусков данных, удаление выбросов и различные методы фильтрации (линейная частотная, Савицкого-Голея, обработка в скользящем окне и другие), а также набор методов анализа данных: различные виды спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, поляризационный анализ. Все процедуры выборки данных, математической обработки, фильтрации, анализа и прогнозирования выполняются библиотеками языка Python.

В состав ЦП входит ГИС на базе Python-библиотеки Folium и карт OSM. В интерактивном режиме доступны следующие ГИС-слои (рис. 3):

- активные геологические разломы [7];
- землетрясения за период 1862-2012 гг., вызвавшие косейсмические события;
- землетрясения из каталога Байкальского филиала ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>);
- пункты мониторинга.

Взаимодействие с ЦП осуществляется посредством панели управления, которая представляет собой пользовательский графический веб-интерфейс (Рис. 2). Пользователь формируют запросы к серверу, выбирая интересующий интервал времени, пункты мониторинга, виды мониторинга и каналы, виды обработки и анализа данных. В соответствии с запросом серверный сценарий извлекает нужные данные из Локального хранилища, производит их анализ и визуализацию и возвращает результат пользователю. При создании ЦП использовалось только свободно распространяемое программное обеспечение.

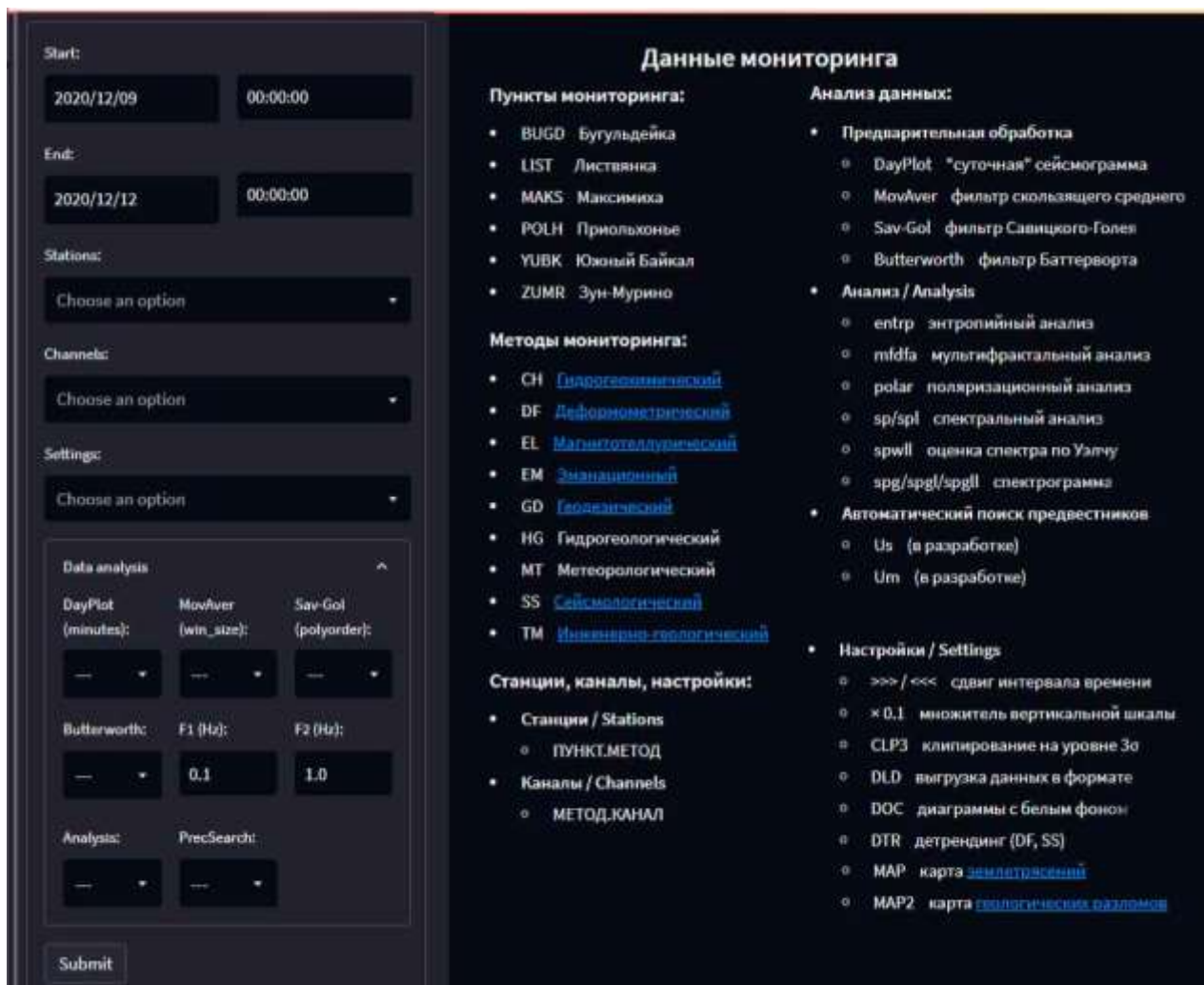


Рис. 2. Стартовая страница ЦП.

Результаты испытаний ЦП. Тестовые испытания ЦП начались в феврале 2022 года. В настоящее время ЦП доступна в интернете по адресу <https://izk.sccc.ru>.

Благодаря возможности ЦП обеспечивать комплексное наблюдение на единой временной сетке результатов различных видов геофизического мониторинга (эманационного, деформометрического, геодезического, инженерного-геологического, гидрогеологического, электротеллурического, сейсмологического) удалось повысить оперативность обработки и эффективность взаимодействия исследователей различных направлений мониторинга.

Так, с помощью поляризационного анализа в скользящем окне удалось обнаружить краткосрочные предвестники Кударинского землетрясения (9 декабря 2020 года в 21:44:33, магнитуда $M_w=5.5$) [4, 9]. На рис. 3 верхняя диаграмма показывает изменение во времени углов поляризации в горизонтальной и вертикально плоскостях, нижняя – соответствующие коэффициенты линейности. Видно, что 9 декабря с 10 до 14 часов углы поляризации застabilизировались на уровне 120 градусов по горизонту и 90 градусов по углу места, а коэффициенты линейности по обеим плоскостям возросли до 0.8-1.0. При этом возрос уровень микросейсмического фона на низких частотах (рис. 4). Это свидетельствует о появлении волн Лява, которые были обнаружены и перед другими землетрясениями.

К первым результатам комплексной обработки и сопоставления данных можно отнести выявление краткосрочных предвестников Кударинского землетрясения и в данных электротеллурического мониторинга полигона Бугульдейка (ряд наблюдений вертикальной компоненты электротеллурического поля — E_z для линии 11 м).

На рис. 5 представлены данные электротеллурического мониторинга в период подготовки Кударинского землетрясения.

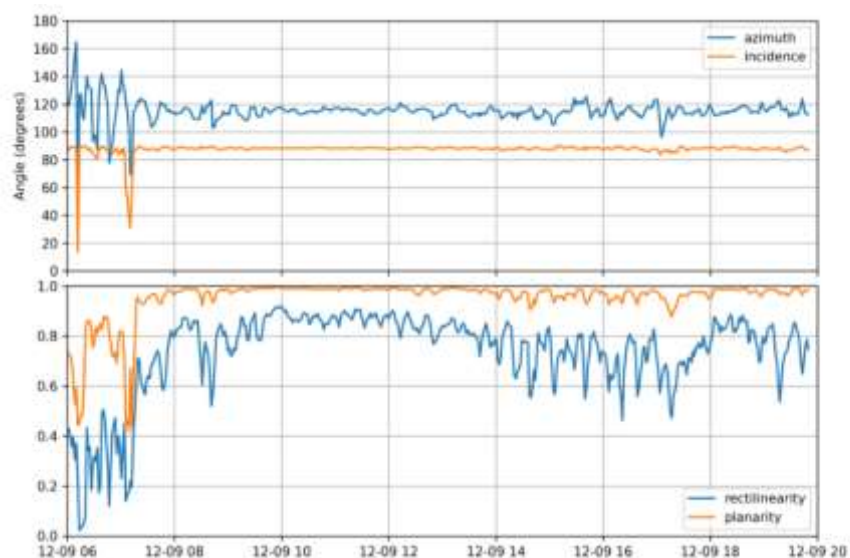


Рис. 3. Интерфейс ЦП. Результаты поляризационного анализа.

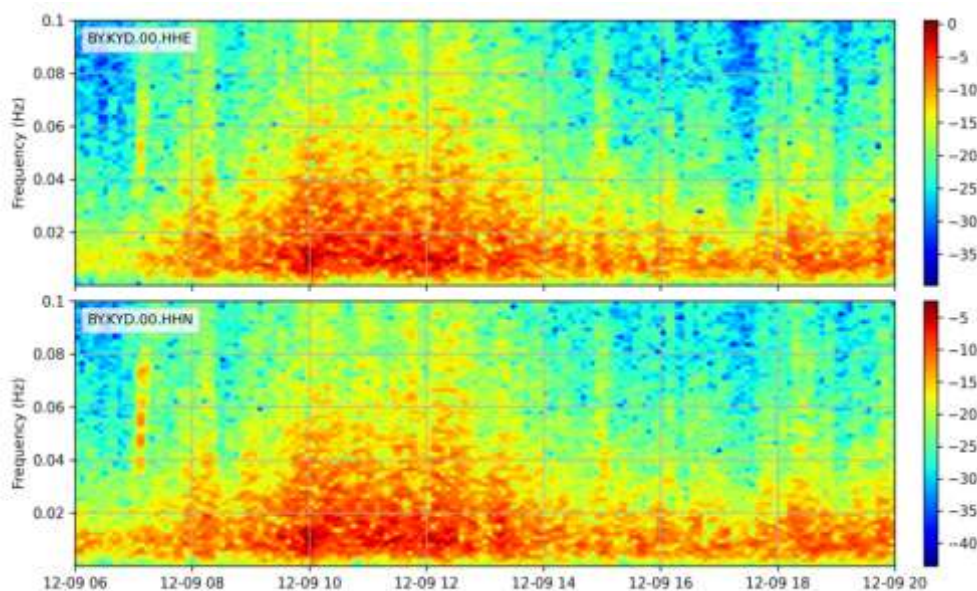


Рис. 4. Интерфейс ЦП. Спектрограммы горизонтальных компонент.

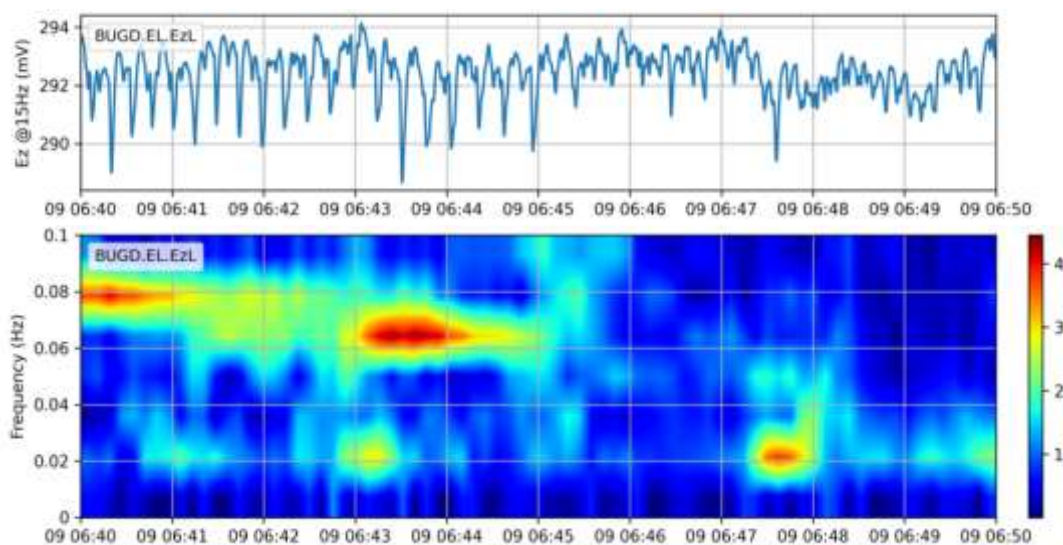


Рис. 5. Интерфейс ЦП. Ряд наблюдений Ez (вверху) и спектрограмма (внизу).

На спектрограмме Ez отчетливо выделяется изменение спектра сигнала примерно за 16 часов до землетрясения. Характер флуктуаций ряда Ez существенно изменился — вместо хаотичных колебаний появились отчетливые U-образные колебания с частотой 0.06–0.08 Гц и относительной амплитудой 1.5–2.5 мВ. В течение около 1.5 ч после их появления амплитуда вариаций несколько увеличивалась, а частота уменьшилась до 0.03 Гц. Важно отметить, что подобные флуктуации не наблюдаются за весь период магнитотеллурических наблюдений.

На рис. 6 показана карта, на которой отображаются пункт мониторинга Бугульдейка, информация по Кударинскому землетрясению и по одному из активных геологических разломов.

Организация семантической подсистемы. Одной из основных научных задач в сфере информационных технологий на сегодняшний день является разработка механизмов анализа и обработки информации в гетерогенных источниках с целью надления информационных систем способностями логического анализа информации и генерации выводов, которые станут основой выполнения процедур накопления и обработки знаний. Интеграция знаний из различных источников может проводиться на основе онтологии, требования к разработке которой будут находиться в заранее сформированных спецификациях [6].

Разработана семантическая подсистема ЦП, предназначенная для решения задач семантического поиска, классификации, структуризации и интеграции информации по геофизическому мониторингу Байкальской природной территории. Интеграция знаний из различных гетерогенных источников проводится на основе онтологии предметной области, разработанной авторами данной работы. Также онтология описывает данные, представленные в ЦП, методы обработки, признаки предвестников и способы их обнаружения. Подсистема может рассматриваться как интеллектуальный ассистент, повышающий эффективность взаимодействия пользователя с ЦП. На формальном уровне онтология представляет собой систему, состоящую из набора понятий предметной области и набора утверждений об этих понятиях, на основе которых можно понятия объединять в классы и строить между ними отношения. Онтология создана в редакторе Protege, семантическая подсистема строится средствами, разработанными в ИСИ СО РАН [5]. В настоящее время семантическая подсистема развернута на локальном сервере Лаборатории геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН.

На рис. 6 представлена страница семантической подсистемы, содержащая описание магнитотеллурического сигнала, которые характеризуются экспертами как индикатор землетрясения. По представленному на странице URL можно перейти к визуализации сигнала на ЦП.

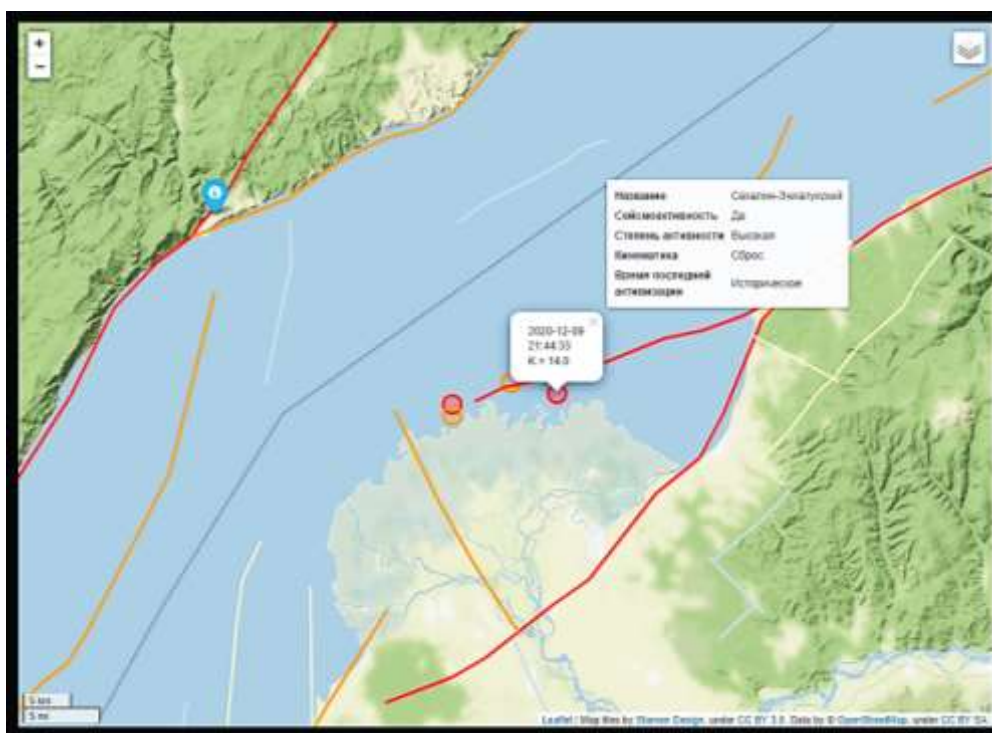


Рис. 5. Интерфейс ЦП. Подсистема ГИС.

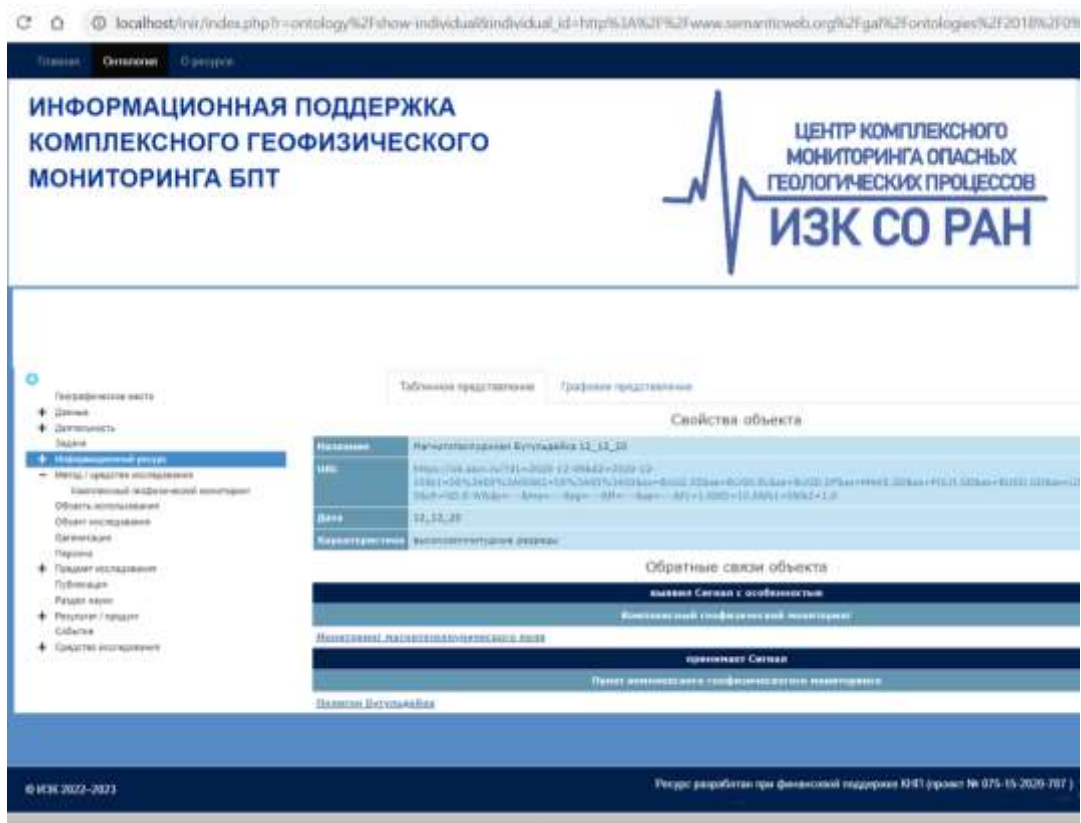


Рис. 6. Страница Семантической подсистемы.

Заключение. Разработана цифровая инфраструктура информационной поддержки комплексного геофизического мониторинга БПТ. ЦП геофизического мониторинга БПТ предоставляет возможность исследователю визуализировать результаты анализа сигналов от разных видов геофизического мониторинга на единой временной сетке, что позволяет выявить согласованность в различных аномальных проявлениях параметров. Не менее важны сервисы, позволяющие алгоритмически выявлять корреляции между рядами наблюдений, что может существенно повысить эффективность исследований. Семантическая подсистема ЦП строится на основе разработанной базы знаний, которая включает в себя онтологию предметной области и экспертные правила прогноза сейсмической активизации. Интерфейс семантической подсистемы будет обеспечивать содержательный доступ к информационным ресурсам. В подсистему будут интегрированы сервисы логического вывода, позволяющих на основе экспертных правил извлекать из онтологии знания, не представленные явно. Подсистема может рассматриваться как интеллектуальный ассистент, повышающий эффективность взаимодействия пользователя с ЦП. Дальнейшее развитие ЦП авторы связывают не только с развитием алгоритмических методов обработки многомерных рядов, но и с формализацией экспертных правил и машинным обучением, что позволит автоматизировать поиск трендов и корреляции аномалий параметров полей различной физической природы.

При разработке ЦП был использован опыт работы над созданием НИС «Активная сейсмология» [2,9].

Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» и проекта НИР ИВМиМГ СО РАН 0251-2022-0004. Авторы благодарны руководителям и участникам проекта чл.-корр. Д.П.Гладкочубу, д.г.-м.н. К.Ж. Семинскому, к.г.-м.н. С.А. Борнякову, к.ф.-м.н. А.А. Добрыниной, к.г.-м.н. В.А. Санькову, д.г.-м.н. А.В. Поспееву, к.г.-м.н. А.А. Боброву и другим специалистам, обеспечившим проведение геофизического мониторинга в Прибайкалье, а также полезные советы, высказанные при создании цифровой платформы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е., Салко Д.В. Новый подход к прогнозу сильных землетрясений в Южно-Байкальском регионе на основе данных мониторинга деформации горных пород: методология и результаты. Геодинамика и тектонофизика. 2022;13(2). DOI:10.5800/GT-2022-13-2-0588.
- [2] Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В. Научная информационная система «Активная сейсмология» для комплексных геофизических исследований // Вестник КРАУНЦ, Науки о земле, 2015, № 1, Выпуск № 25. С. 94-98
- [3] Данилова З.А. Экологические риски на побережье озера Байкал // Вестник Томского государственного университета Философия. Социология. Политология. 2019. № 50, DOI:10.17223/1998863X/50/13.
- [4] Добрынина А.А., Перевалова Н.П., Саньков В.А., Едемский И.К., Лухнев А.В. Анализ сейсмических и ионосферных эффектов Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. Геодинамика и тектонофизика. 2022;13(2). DOI:10.5800/GT-2022-13-2s-0622.
- [5] Загорюлько Ю.А., Загорюлько Г.Б., Боровикова О.И. Технология создания тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, базирующихся на онтологии// Программная инженерия-2016, №2. Vol. 7. С.51-60.
- [6] Кравченко Ю.А., Марков В.В. Онтологический подход формирования информационных ресурсов на основе разнородных источников знаний // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7(144). С. 116-120.
- [7] Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. с. 407–434
- [8] Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: Организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022;13(5). DOI:10.5800/GT-2022-13-5-0677.
- [9] Braginskaya L.P., Grigoruk A.P., Kovalevsky V.V. Integration of knowledge and data in active seismology // CEUR Workshop Proceedings. 2019. 2569, P. 6-12.
- [10] http://irkipedia.ru/content/baykalskaya_prirodnaya_territoriya.

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

Гладкочуб Д.П., Саньков А.В., Саньков В.А., Добрынина А.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

С 2020 года на территории Байкальской рифтовой системы начала работу сеть полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов в составе 4 полигонов – «Приольхонье», «Бугульдейка», «Листвянка» и «Южный Байкал». Полигоны оснащены современным высокоточным оборудованием для непрерывного мониторинга скоростей современных движений, деформаций горных пород, сейсмического и микросейсмического режима, эманаций радона, магнитотеллурического поля Земли, метеопараметров и температурного режима грунтов. Основной задачей мониторинга является поиск предвестников и создание фундаментальных основ прогноза опасных геологических процессов.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, землетрясение, комплексный мониторинг, предвестники.

INTEGRATED MONITORING OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES IN SOUTHERN PART OF THE BAIKAL RIFT SYSTEM

Gladkochub D.P., Sankov A.V., Sankov V.A., Dobrynina A.A.

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

Since 2020, on the territory of the Baikal rift system, a network of polygons for complex monitoring of dangerous geological processes has been launched, consisting of 4 polygons – «Priolkhonie», «Buguldeika», «Listvyanka» and «Southern Baikal». The polygons are equipped with modern high-precision equipment for continuous monitoring of the velocities of modern movements, rock deformations, seismic and microseismic regimes, radon emanations, the Earth's magnetotelluric field, meteorological parameters and soil temperature conditions. The main task of monitoring is the search for precursors and the creation of fundamental foundations for the forecast of dangerous geological processes.

Keywords: hazardous geological processes, earthquake, integrated monitoring, precursors.

Байкальская рифтовая система (БРС) является одной из наиболее сейсмически активных территорий Российской Федерации, по классификации МЧС ей присвоена 1 (высшая) категория опасности. Высокая сейсмическая активность региона подтверждается как сведениями о землетрясениях прошлого (палеосейсмодислокации, сильные землетрясения по историческим данным), так и современным уровнем сейсмической активности. Помимо землетрясений, БРС характеризуется проявлениями разнообразных опасных геологических процессов, таких как сели, паводки, обвалы и оползни, лавины, карстовые проявления [1]. В 2020 году в рамках Крупного проекта Минобрнауки России «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» (грант № 075-15-2020-787) в Институте земной коры СО РАН начались работы по комплексному мониторингу опасных геологических процессов на основе непрерывных измерений различных геофизических полей [1].

Основная масса землетрясений БРС сосредоточена в достаточно узкой полосе, протягивающейся вдоль оси рифтовых впадин, Сибирская платформа практически асейсмична, Забайкальский блок характеризуется рассеянной умеренной сейсмичностью [2]. В самой Байкальской впадине наиболее сейсмически активной является ее южная часть, на прилегающих к ней территориях южного Прибайкалья и Забайкалья (Иркутская область, республика Бурятия) находятся крупные города, населенные пункты, а также опасные производства, линейные сооружения, плотина ГЭС (г. Иркутск), автомагистрали и линии Восточно-Сибирской железной дороги. Данные районы также отличаются высоким уровнем селеопасности (область Тункинских впадин, горное обрамление Южнобайкальской впадины). По этим причинам территория

Южного Байкала была выбрана в качестве исходной для организации работ по комплексному мониторингу опасных геологических процессов.

Сеть полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов расположена вдоль основных рифтовых структур юго-западного фланга БРС на территории Иркутской области (полигоны «Листвянка», «Бугульдейка» и «Приольхонье», пункт «Узур») и на территории республики Бурятия (пункты мониторинга «Максимиha», «Заречье», «Сухой ручей»), полигон «Южный Байкал» занимает область от южного окончания оз. Байкал («Талая») до системы Тункинских впадин (полигон «Зун-Мурино»). Такое положение измерительных точек позволяет проводить наблюдения за центральной частью рифтовой системы.

Полигоны комплексного мониторинга оснащены современным высокоточным оборудованием для мониторинга деформаций горных пород (собственная разработка ИЗК СО РАН), эманаций радона, скоростей движений и деформаций земной коры методом GPS-геодезии, магнитотеллурического поля Земли, метеопараметров, температурного режима грунтов для глубин до 10 метров и сейсмического и микросейсмического режимов [1]. Часть пунктов наблюдения расположена на действующих сейсмических станциях Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН соответственно. Институтом земной коры СО РАН с БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН заключены договоры об обмене данными сейсмического мониторинга.

На текущий момент все виды мониторинга работают на 4 полигонах – «Листвянка», «Бугульдейка», «Приольхонье» и «Южный Байкал», в 2023 году планируется оборудовать полигон «Зун-Мурино» в Тункинской впадине оборудованием для мониторинга деформаций горных пород, эманаций радона, магнитотеллурического поля, метеопараметров и температурного режима грунтов. Это расширит наблюдательный полигон на территорию Тункинской системы впадин.

Данные с пунктов и полигонов комплексного мониторинга поступают в Институт земной коры СО РАН на сервер Центра комплексного мониторинга частично в режиме реального времени, частично – 1 раз в сутки. В 2022 году совместно с Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск) была разработана специальная цифровая платформа для визуализации, анализа и первичной обработки данных комплексного мониторинга. Платформа позволяет вывести на единый планшет данные разных видов мониторинга за выбранный период времени, провести первичную обработку сигналов и сохранить их в цифровом и растровом виде для последующего анализа. Для предварительной обработки сигналов предусмотрены режимы: суточная запись (вывод данных за указанные сутки), фильтр скользящего среднего, фильтр Савицкого-Голея, фильтр Баттерворта. На платформе реализованы также следующие виды математической обработки: энтропийный анализ, мультифрактальный анализ, поляризационный анализ, спектральный анализ, оценка спектра по Уэлчу, построение спектрограмм (спектрально-временной анализ).

Длинные ряды данных комплексного мониторинга используются для поиска возможных предвестников землетрясений в БРС и последующей разработки фундаментальных основ прогноза землетрясений. Настоящий подход положительно себя зарекомендовал при изучении предвестников последних сильных землетрясений БРС: Быстринского землетрясения в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w=5.4$) [3] и Кударинского землетрясения в Южном Байкале (09.12.2020 г., $M_w=5.6$) [4-6].

Оба землетрясения сопровождались серией предшествовавших и сопутствующих явлений различной природы, зафиксированных в разных местах плейстосейстовой области и на смежной территории. В случае Быстринского землетрясения это было изменение режима и свойств подземных вод, предсейсмогенных вариациях напряженно-деформированного состояния породного массива, флуктуациях эманационного поля, также был зафиксирован краткосрочный предвестник землетрясения в динамике деформаций пород на полигоне «Южный Байкал» («Талая») [3, 5]. В случае Кударинского землетрясения краткосрочные предвестники наблюдались на полигонах «Бугульдейка» и «Приольхонье» в данных деформационного, микросейсмического, магнитотеллурического, эманационного мониторинга [4-6]. Совпадение

данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволило охарактеризовать предварительную модель развития процессов в очаге перед и после сильного землетрясения и предложить на ее основе метод определения приближения сильного сейсмического события [5].

За годы функционирования сети полигонов комплексного мониторинга установлено, что в ближней к очагу зоне (до 150 км) сильные сейсмические события проявляются практически во всех изучаемых в режиме мониторинга полях. Характер и интенсивность этих проявлений зависят от параметров землетрясения (положение, магнитуда, глубина, фокальный механизм) и от локальных геологических условий полигонов мониторинга. В целом, полученные результаты свидетельствуют об эффективности сети полигонов комплексного мониторинга для изучения предвестников сильных землетрясений на территории БРС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Крупного проекта Минобрнауки России «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» (грант № 075-15-2020-787).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Первалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. 0677. DOI:10.5800/GT-2022-13-5-0677.
- [2] Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / В.Р. Адвокатов и др.; отв. ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.
- [3] Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 5. С. 727-743. DOI:10.15372/GiG2021109.
- [4] Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с Mw = 5.6 в Байкальской впадине // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509, № 1. С. 74-80. DOI:10.31857/S2686739722602733.
- [5] Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw = 5.4): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады российской академии наук. Науки о Земле, 2021, том 498, № 1, с. 84-88. DOI:10.31857/S2686739721050042.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ЛЕДОВЫХ БЛОКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОЗ. БАЙКАЛ

Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н.

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

В докладе представлены результаты оценки смещений ледовых блоков центральной части оз. Байкал при помощи метода отслеживания смещений (offset tracking). Измерения выполнены за 12, 24 и 36-дневный период февраля-марта 2017, 2018, 2019 и 2021 гг. по данным спутникового радиолокатора С-диапазона Sentinel-1B. Показано, что ледовые блоки в районе дельты р. Селенга во все рассматриваемые периоды времени смещаются по направлению от дельты, а скорость смещений увеличивается к противоположному берегу. К востоку и западу от дельты направления суммарных смещений в разные годы различны.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, лёд, отслеживания смещений, Sentinel-1B.

THE RESULTS OF SATELLITE RADAR MONITORING OF ICE BLOCKS DYNAMICS IN THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL LAKE

Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N.

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude

The report presents the results of the displacement assessment of ice blocks in the central part of the lake Baikal using the offset tracking method. The measurements were carried out for the 12, 24 and 36-day period of February-March 2017, 2018, 2019 and 2021 according to the Sentinel-1B C-band satellite radar. It is shown that the ice blocks in the area of the Selenga river delta in all the considered time periods move away from the delta, and the displacement rate increases to the opposite shore. To the east and west of the delta, the directions of total displacements in different years are different.

Keywords: satellite radar, ice, offset tracking, Sentinel-1B.

Введение. Данная работа является продолжением исследования [1], которое ранее было выполнено в рамках интеграционного проекта СО РАН № 73 «Изучение закономерностей и механизмов сейсмотектонических процессов в земной коре методами физического моделирования на ледовом покрове озера Байкал» [2]. Ранее в [1] была предложена методика совместного применения дифференциальной интерферометрии, спекл-интерферометрии и текстурного анализа по данным спутникового радиолокатора L-диапазона (длина волны 23.5 см) ALOS PALSAR для мониторинга южной части оз. Байкал в период ледостава 2008-2011 гг. Была показана динамика ледовых блоков в южной котловине Байкала за 46 дней между съемками: в одной части совпадала с преобладающим направлением ветра, а в другой части – с направлением стока от р. Селенга к р. Ангара.

Возврат к данной тематике [1] связан с тем, что: 1) в связи с катастрофическим землетрясением 2023 г. в Турции особую актуальность приобрела тематика интеграционного проекта [2]; 2) ранее было построено векторное поле смещений по данным спутниковой радиолокации только для южной части оз. Байкал и не была рассмотрена центральная часть, в первую очередь в районе дельты р. Селенга; 3) в настоящее время накоплен достаточный временной ряд спутниковых радиолокационных данных Sentinel-1, которые свободно доступны онлайн [3]. Последнее позволяет выполнить оценку динамики ледового покрова с периодичностью 12 дней. Представляется, что указанная периодичность позволит получить дополнительную информацию о масштабных сдвигах крупных ледовых плит. Так, ранее в [1], наряду с получением площадной оценки смещений за 46 дней (7 февраля – 25 марта 2010 г. и 21 января – 8 марта 2010 г.), были представлены дискретные GPS измерения смещений 5 реперных точек (12-18 марта 2010 г.), которые показали разнонаправленные сдвиги (с суточной амплитудой до 2-3 м), коррелирующие с преобладающим направлением ветра. При этом общие перемещения отдельных точек за период наблюдений оказались невысокими – менее 1 м, что

вероятно связано с небольшим временным периодом измерений. Также было отмечено, что эти GPS измерения проводились в достаточно стабильной прибрежной зоне.

С учётом вышеизложенного, предлагается оценить динамику фрагментированной блочной структуры льда в центральной части оз. Байкал, где влияние на направление смещений, наряду с преобладающим ветром, возможно оказывает поступление значительного объема воды (течения) из основного притока – р. Селенги. Предлагается рассмотреть этот фрагмент на временных интервалах 12, 24 и 36 дней.

Выбор метода исследований и описание используемых данных. Для измерения деформаций/смещений поверхности вдоль направления на спутник применяется дифференциальная радарная интерферометрия [4], необходимым условием которой является высокий уровень когерентности, как правило не менее 0,2. В случае радарной интерферометрии ледового покрова оз. Байкал, данное условие редко выполняется [1]. Тем не менее, по некоторым фрагментам ледового покрова на коротких временных базовых линиях возможно получить площадную интерферометрическую когерентность, превышающую это пороговое значение. Соответственно, представляется возможность выделить разнонаправленные смещения отдельных участков ледового покрова (далее ледовых блоков) и выполнить количественные измерения этих смещений. На рис. 1 представлены изображение когерентности, фрагмент интерферограммы и карта смещений ледовых блоков вдоль направления на спутник, полученные по данным радарной интерферометрической пары Sentinel-1B за 1 и 13 февраля 2018 г.

Изображения когерентности на рис. 1-а, а также различная периодичность и направленность интерферометрических фрингов фазы на рис. 1-б демонстрируют сформировавшуюся блоковую структуру льда и разнонаправленные сдвиги ледовых блоков. По сути, совокупность изображений когерентности и интерферограммы может быть использована в качестве некоторого базового продукта радиолокации [5] для выделения мелкоблоковой структуры ледового покрова и визуальной оценки направления и скорости смещений.

Развертка интерферометрической фазы и последующее создание карты смещений по направлению на спутник на рис. 1-в позволило более чётко визуализировать это, однако границы между разнонаправленными блоками не совпадают с таковыми на интерферограмме (см. рис. 1-б). Это связано с некорректной разверткой фазы на столь неоднородном ледовом поле, для которого характерны многочисленные ледовые трещины. Последние являются причиной разрывов в развернутой фазе, что в итоге привело к неточной оценке смещения.

При смещениях льда зачастую происходит некогерентное смещение соседних рассеивателей – элементов пространственного разрешения радара, вследствие чего когерентность радарной интерферометрической пары уменьшается и использование метода дифференциальной интерферометрии может привести к большой погрешности измерений. В подобных случаях используется метод оценки смещения на основе расчета кросс-корреляции малых фрагментов радарных изображений поверхности льда. При этом полагается, что крапчатость (спекл-структура), характерная для данного фрагмента ледового покрова, сохранилась или незначительно изменилась. При существенных изменениях этой спекл-структуры, оценка не возможна. В зарубежной литературе этот метод известен, как *speckle offset tracking* (далее SPO) [6-10]. Для оценки используется изображение интенсивности обратного радарного рассеяния, что не требует процесса развертывания фазы. SPO широко используется для мониторинга относительно больших деформаций льда в масштабе от 10 см до 10 м [7]. Поэтому воспользуемся методом SPO для выделения блоковой структуры льда и для качественной и количественной оценки динамики этих ледовых плит. При этом, учитывая значительную раздробленность некоторых ледовых блоков и соответствующую хаотичность их перемещений, расчёт смещений предлагается выполнять для фрагментов размером 3 на 3 км. Это позволит выделить усреднённые тренды для крупных блоковых структур.

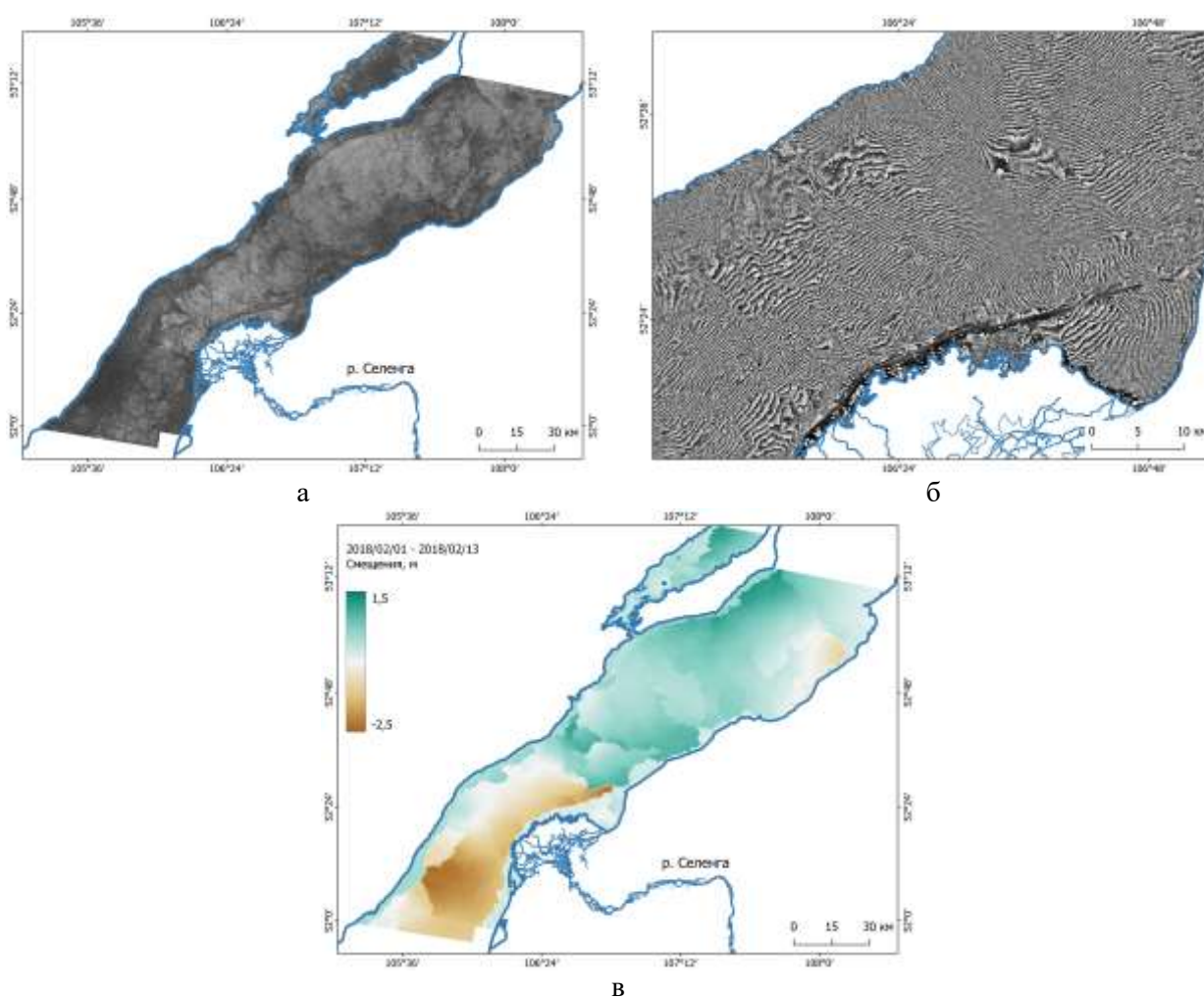


Рис. 1. Интерферометрические данные Sentinel-1B за период 2018/02/01-2018/02/13: а) когерентность всей радиолокационной сцены, б) фрагмент интерферометрической фазы, в) карта смещений ледовых блоков по результатам дифференциальной интерферометрии.

Табл. 1. Радиолокационные данные Sentinel-1B.

	1	2	3	4
Дата съемки	2017/02/18	2017/03/02	2017/03/14	2017/03/26
	2018/02/13	2018/02/25	2018/03/09	2018/03/21
	2019/02/08	2019/02/20	2019/03/04	2019/03/16
	2021/02/09	2021/02/21	2021/03/05	2021/03/17

Для исследования использованы данные спутникового радиолокатора С-диапазона Европейского космического агентства Sentinel-1B. Все данные получены в режиме GRDH (Ground Range Detected High-Res Dual-Pol) на нисходящей относительной орбите 135, кадр 417. Обработка и анализ данных выполнена при помощи программного обеспечения SNAP [11]. Предварительный анализ данных показал, что оз. Байкал полностью покрывается льдом к середине января, но в случае сильного ветра лед ломается и смещается на значительные расстояния. Относительная стабилизация ледового покрова отмечается в конце января, поэтому для исследования были использованы радиолокационные данные за февраль-март (см. таблицу № 1).

Результаты спутникового радиолокационного мониторинга. На рис. 2 представлены карты смещений за 36 дней укрупнённых блоков (без учёта разнонаправленных сдвигов небольших участков льда) в период ледостава в феврале-марте 2017, 2018, 2019 и 2021 гг. Цветом обозначена средняя скорость смещений, стрелками обозначено направление этих сдвигов. Соответствующие карты смещений за 12 и 24 дня представлены на веб-странице [12].

Табл. 2. Среднемесячная температура, °С.

	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Среднее
2016-2017	-14,93	20,55	14,85	-6,71	-14,26
2017-2018	-15,20	-22,98	-18,87	-8,01	-16,27
2018-2019	-19,71	-18,29	-19,80	-5,66	-15,87
2020-2021	-17,42	-22,31	-17,34	-7,57	-16,16

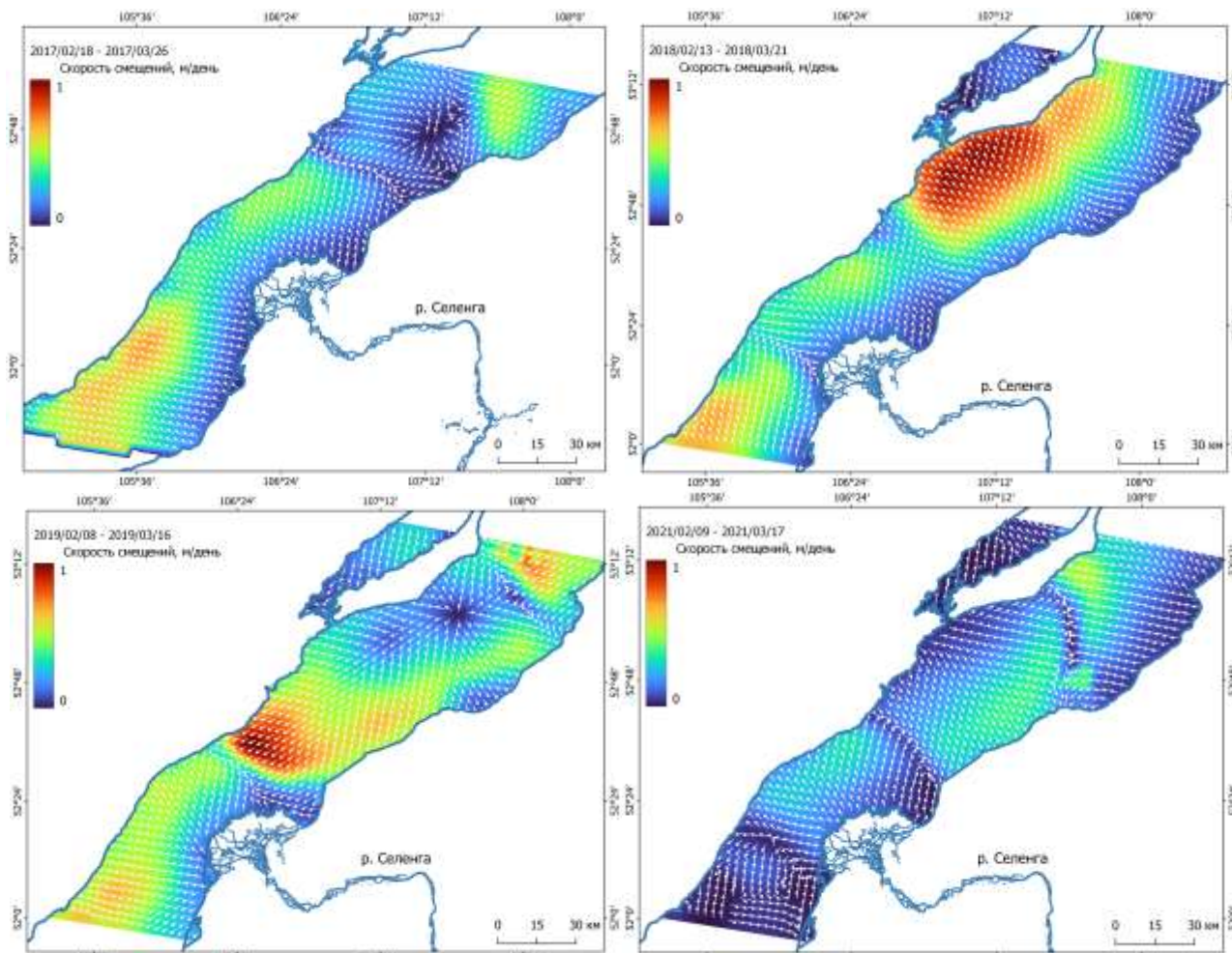


Рис. 2. Скорость и направление смещений ледовых блоков на оз. Байкал в различные годы.

Направления, суммарных за 12, 24 и 36 дней, смещений ледовых блоков различны в разные годы, за исключением района дельты р. Селенга, где лед под воздействием течения из реки сдвигается по направлению от дельты к противоположному берегу. При этом скорость смещения ледовых блоков увеличивается в том же направлении, т.е. ближе к противоположному берегу должно увеличиваться напряженно деформированное состояние льда. Кроме того, на 12 дневных интервалах скорость смещений ожидаемо выше, чем за 24 и 36 дней, что связано с увеличением толщины льда. А поскольку одна из основных задач интеграционного проекта [2] заключалась в изучении тектонических процессов земной коры, то следует провести определённую аналогию с обнаруженной авторами геодинимикой в период предшествующий землетрясению в Турции [13]. Там была обнаружена сходная ситуация – различие скоростей смещения крупных геоблоков вдоль Восточно-Анатолийского разлома.

В целом, динамика льда по всей представленной площади оз. Байкал, в разные годы различна. Аномально небольшие смещения (до 0,5 м/день), по сравнению с другими годами, обнаружены в 2021 г., что не согласуется со среднемесячной температурой в этом районе за разные годы (см. табл. № 2). Данные в таблице 2 получены по данным, представленным в [14].

Заключение. Таким образом, с использованием спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1В построены векторные поля смещений крупных ледовых блоков центральной части оз. Байкал за 12, 24 и 36-дневные периоды февраля-марта 2017, 2018, 2019 и 2021 гг. Показано, что направление суммарных смещений различно в разные годы, за исключением района, так называемой «селенгинской перемычки» [15], разделяющей южную и центральную котловины. В данном месте ледовые блоки смещаются под воздействием течения от дельты р. Селенга к противоположному берегу с разными скоростями. Аналогичная ситуация только с крупными геоблоками была обнаружена в период, предшествующий катастрофическому землетрясению в Турции в 2023 г. [13], поэтому считаем тематику интеграционного проекта [2] следует продолжить в районе «селенгинской перемычки».

Что касается различий направления суммарных смещений за разные годы севернее и южнее дельты, то данный вопрос требует дополнительного изучения. В качестве гипотезы можно предположить влияние преобладающего направления ветра, которое было различным в исследуемые промежутки времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Татьков Г.И., Захаров А.И., Быков М.Е., Дмитриев А.В., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS-навигации // Вестник Бурятского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. 2012. № 1(5). С. 42-59.
- [2] Добрецов Н. Л., Псахье С. Г., Ружич В. В., Попов В. Л., Шилько Е. В., Гранин Н. Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412, №. 5. С. 656-660.
- [3] Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 23.06.2023).
- [4] Massonnet D., Feigl K.L. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface // Rev. Geophys. 1998, V. 36, P. 441-500.
- [5] Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Гусев М.А., Дагуров П.Н., Емельянов К.С., Захаров А.И., Кирбижекова И.И. Базовые продукты зондирования земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли Из Космоса. 2014. № 5. С. 83-91.
- [6] Strozzi T., Luckman A., Murray T., Wegmüller U., Werner C.L. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002, V.40. P.2384-2391.
- [7] Joughin I. Ice-sheet velocity mapping: A combined interferometric and speckle-tracking approach // Ann. Glaciol. 2002. V. 34. P. 195-201.
- [8] Choe B.-H., Samsonov S., Jung J. 3D SAR Speckle Offset Tracking Potential for Monitoring Landfast Ice Growth and Displacement // Remote Sens. 2021. V. 13, P. 2168.
- [9] Sánchez-Gómez P., Navarro F.J. Glacier surface velocity retrieval using D-InSAR and offset tracking techniques applied to ascending and descending passes of sentinel-1 data for southern ellesmere ice caps, Canadian Arctic // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 442.
- [10] Van Wychen W., Copland L., Jiskoot H., Gray L., Sharp M., Burgess D. Surface Velocities of Glaciers in Western Canada from Speckle-Tracking of ALOS PALSAR and RADARSAT-2 data // Can. J. Remote Sens. 2018. V. 44. P. 57-66.
- [11] SNAP. <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap> (дата обращения 23.06.2023).
- [12] Радиолокационный мониторинг динамики ледовых блоков оз. Байкал. <https://omdoki.nextgis.com/resource/1069/display?panel=layers> (дата обращения 23.06.2023).
- [13] Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018-2023 гг. // Исследование Земли Из Космоса. 2023. № 3. С. 3-12.
- [14] Muñoz Sabater J. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019. DOI:10.24381/cds.68d2bb30.
- [15] Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1987. 383 с.

АНОМАЛИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ КАК ПРЕДВЕСТНИК ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Добрынина А.А.^{1,2}, Саньков В.А.¹, Саньков А.В.¹, Король С.А.¹, Борняков А.С.¹

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ

В работе исследуется возможность использования аномалий микросейсмических шумов в качестве предвестников опасных геологических процессов на территории Байкальской рифтовой системы, таких как землетрясения. В качестве аномалий микросейсмического шума рассматриваются изменения амплитудно-частотного состава и поляризации фоновых микросейсмических шумов перед опасными процессами. В итоге проведенных исследований предлагается способ определения приближения сильного сейсмического события. *Ключевые слова:* микросейсмические шумы, опасные геологические процессы, землетрясение, предвестники.

ANOMALIES OF AMBIENT SEISMIC NOISES AS A PRECURSOR OF DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES

Dobrynina A.A.^{1,2}, Sankov V.A.¹, Sankov A.V.¹, Korol S.A.¹, Borneyakov S.A.¹

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

² Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude

The paper studies the possibility of using ambient seismic noise anomalies as precursors of dangerous geological processes in the territory of the Baikal rift system, such as earthquakes. Changes in the amplitude-frequency composition and polarization of background ambient noise before hazardous processes are considered as ambient seismic noise anomalies. As a result of the research, a method is proposed for determining the approach of a strong seismic event.

Keywords: ambient seismic noise, hazardous geological processes, earthquake, precursors.

Байкальская рифтовая система протягивается от северо-западной Монголии до Южной Якутии через горные сооружения Восточной Сибири и представляет собой линейную систему поднятий впадин, ограниченных разломами преимущественно сбросового кинематического типа. Приуроченность рифтовой системы к границе Североевразийской и Амурской литосферных плит определяет высокий уровень сейсмической активности региона – в год здесь происходит несколько тысяч землетрясений. В рамках настоящей работы нами использовались результаты поиска предвестников опасных геологических процессов, полученные по данным комплексного мониторинга в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории, для создания алгоритмов и принципиальных схем обнаружения краткосрочных признаков подготовки сильных землетрясений, селевых потоков и паводков (детальная информация о комплексном мониторинге приводится в статье Саньков и др. в настоящем сборнике).

В качестве основного материала для анализа используются записи микросейсмических шумов, полученные сейсмическими станциями Института земной коры СО РАН и Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Микросейсмические шумы природного происхождения несут в себе информацию обо всем спектре деформационных процессов, происходящих в земной коре на различных энергетических уровнях, – от перемещений тектонических плит и связанных с ними катастрофических землетрясений до лунно-солнечных приливных деформационных процессов, микроземлетрясений, обвалов, сходов лавин и пр.

В качестве объекта исследований нами было выбрано сильное Кударинское землетрясение 09 декабря 2020 г. с магнитудой $M_w=5.6$ (рис. 1) [1, 2]. Его подготовка была зафиксирована в данных мониторинга деформаций горных пород на полигонах комплексного мониторинга Института земной коры СО РАН «Бугульдейка» и «Приольхонье» (рис. 1) [3]. Близость эпи-

центральной зоны землетрясения к полигону «Бугульдейка» (37 км) и оборудование его широкополосной сейсмической станцией (название Куяда, код КУYD) позволяют предположить, что процесс подготовки близкого сильного землетрясения, которым является Кударинское событие 9 декабря 2020 г., должен был отразиться также в поле микросейсмических шумов. Анализировались сейсмограммы микросейсмического шума перед и после землетрясения, полученные на сейсмических станциях, расположенных в пределах центральной части БРС (эпицентральные расстояния Δ варьировались от 30 до 250 км, рис. 1).

Для всех сейсмических станций на расстояниях до 250 км был определен средний спектр микросейсмического шума и его поляризация в низкочастотной области от 0.01 до 1 Гц по архивным данным непрерывной сейсмической регистрации. Анализ микросейсмического шума на станции Куяда в интервале от 0.01 до 1 Гц выявил периодическое увеличение амплитуд колебаний по горизонтальным компонентам в частотном диапазоне 0.01–0.1 Гц за период от 10 дней до Кударинского землетрясения и до 4 дней – после (до 20 часов 13.12.2020, рис. 2). За 14 часов до главного толчка и 9 часов после него наблюдалось максимальное увеличение амплитуд колебаний – приблизительно в 20 раз относительно спокойного фона (рис. 2).

Для всего периода (с 01.12.2020 до 14.12.2020) на станции Куяда также отмечается резкая смена ориентации колебаний с беспорядочной на выраженную северо-западную – юго-восточную (рис. 2). Процесс подготовки землетрясения отразился также на других станциях вблизи от эпицентра: для удаленных станций ($\Delta > 130$ км) выраженная смена ориентации колебаний отсутствует, в то время как для станций, близких к эпицентру, наоборот, наблюдается резкая смена ориентации колебаний. Необходимо отметить, что на станциях, расположенных в разных азимутах относительно эпицентра Кударинского землетрясения, ориентация колебаний в горизонтальной плоскости заметно отличается, при этом, совпадая с азимутом на эпицентр. Среди этих станций выделяется группа достаточно удаленных станций с ориентацией колебаний, перпендикулярной к азимуту на эпицентр – эти станции расположены в зонах крупных разломов, ограничивающих Южнобайкальскую впадину, или за ними.

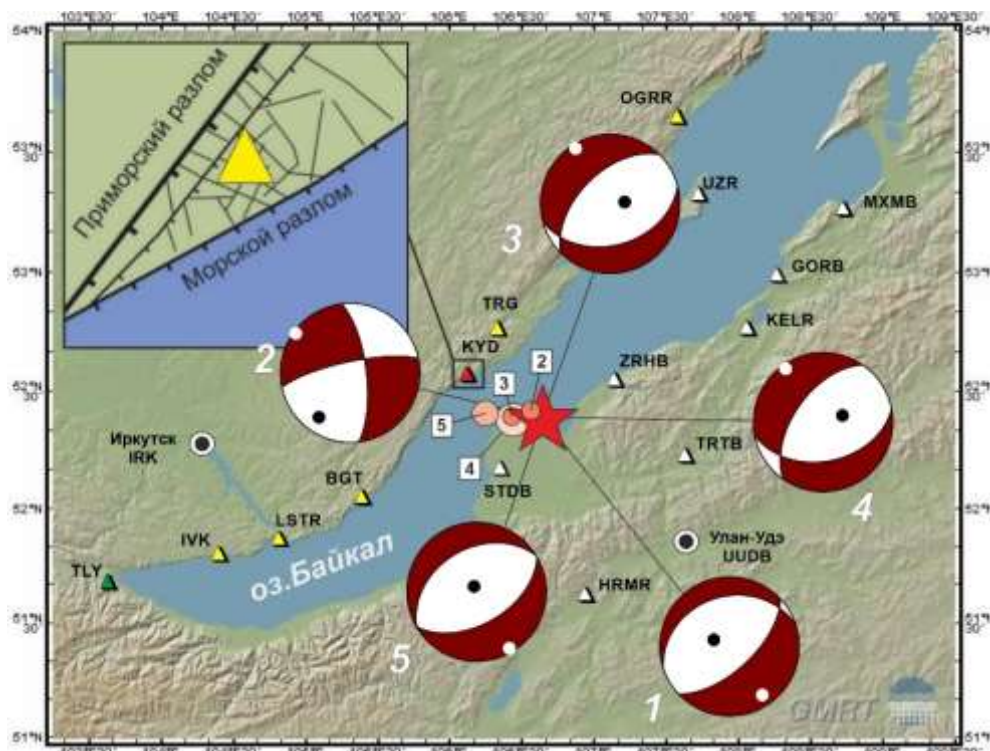


Рис. 1. Положение сейсмических станций Байкальского (желтые треугольники) и Бурятского филиалов (белые треугольники) ФИЦ ЕГС РАН, полигона комплексного мониторинга «Бугульдейка» (красный треугольник) и эпицентра Кударинского землетрясения (звездочка), на врезке: разломно-блоковая структура в районе полигона «Бугульдейка». Цифрами показаны механизмы очага: 1 – GEOFONE, 2 – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 3 – Institute de Physique du Globe de Paris, 4 – Колумбийский университет, США, 5 – Geoscience Australia.

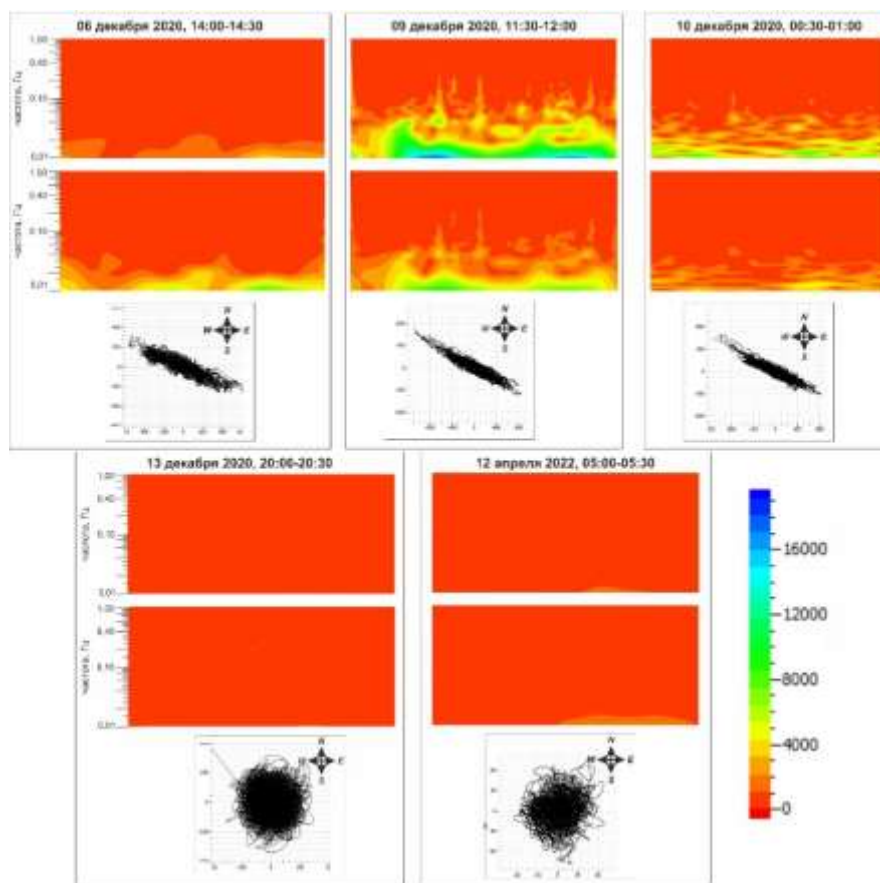


Рис. 2. Спектрограммы и поляризационные диаграммы микросейсмического шума в частотном диапазоне 0.01-1 Гц до и после Кударинского землетрясения на станции Куяда.

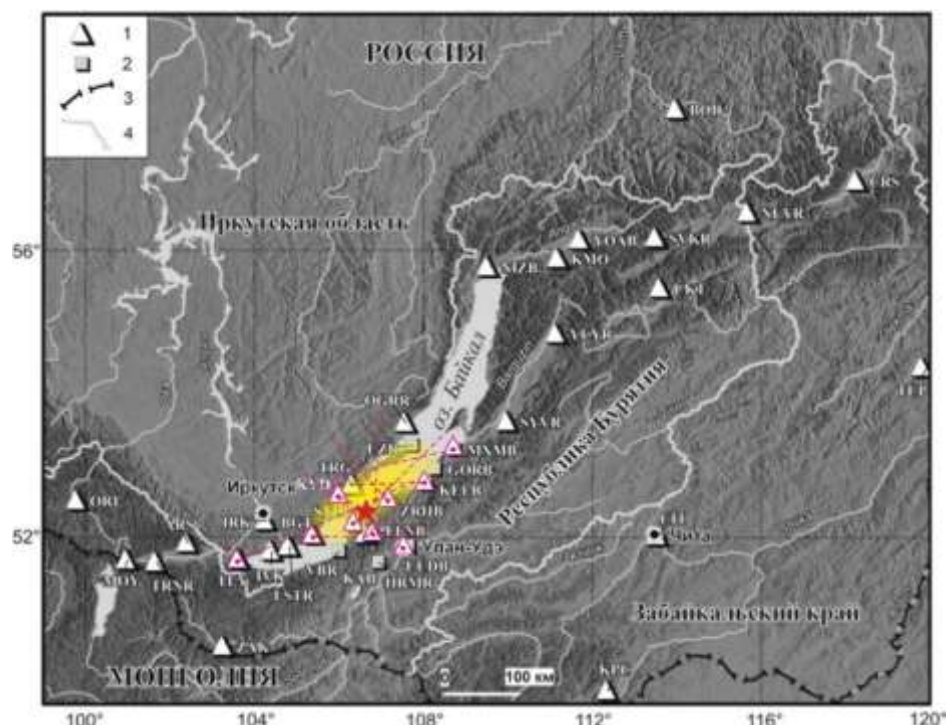


Рис. 3. Выделение зоны очага готовящегося сильного сейсмического события (желтая область) по данным об ориентации колебаний микросейсмического шума. Звездочкой показан эпицентр Кударинского землетрясения, пунктиром – азимуты колебаний микросейсмического шума, треугольниками с красными границами обозначены станции, на которых наблюдалась смена поляризации колебаний микросейсмического шума с ориентацией на эпицентр землетрясения. Условные обозначения: 1 – ЦСС Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 2 – ЦСС Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 3 – государственная граница; 4 – границы административного деления РФ.

Сопоставление данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволяют сделать предположение о том, что в поле микросейсмических шумов, по-видимому, отразился процесс медленных движений по разлому перед землетрясением и после основного срыва (толчка) с последующим затуханием.

На основе полученных результатов нами предлагается следующий принципиальный алгоритм возможного практического использования наблюдаемых эффектов в качестве одного из способов определения приближения сильного землетрясения:

1. По архивным данным непрерывного сейсмического мониторинга широкополосной сейсмической станцией (станциями) в пределах локального участка литосферы сейсмоактивной зоны (не более 130 км от эпицентральных зон сильных землетрясений, известных по сейсмическим данным) оценивается амплитудно-частотный состав и поляризация фоновых микросейсмических колебаний для каждой станции, в дальнейшем эти показатели будут считаться средними;
2. По данным мониторинга в режиме реального времени автоматически анализируются амплитудно-частотные и поляризационные характеристики текущего сигнала и сопоставляются со средними показателями;
3. В случае обнаружения сигнала-предвестника (значимое превышение амплитуд колебаний в указанном диапазоне частот – 0.01-1 Гц и смена ориентации колебаний) данные обрабатываются в ручном режиме и по ориентации колебаний (поляризации) определяется положение эпицентра приближающегося сейсмического события.

Предлагаемый способ позволяет осуществлять краткосрочное определение подготовки сильного сейсмического события и его положение и предпринять необходимые меры по предотвращению серьезных последствий на объектах повышенной опасности, на которых ведется сейсмический мониторинг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Крупного проекта Минобрнауки России «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» (грант № 075-15-2020-787).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Первалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. 0677. DOI:10.5800/GT-2022-13-5-0677.
- [2] Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w = 5.6$ в Байкальской впадине // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509, № 1. С. 74-80. DOI:10.31857/S2686739722602733.
- [3] Борняков С.А., Добрынина А.А., Семинский К.Ж., Саньков В.А., Радзиминович Н.А., Салко Д.В., Шагун А.Н. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): общая характеристика, основные параметры и деформационные признаки перехода очага в мета-нестабильное состояние // Доклады российской академии наук. Науки о Земле, 2021, том 498, № 1, С. 84–88. DOI:10.31857/S2686739721050042.

**ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ
БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА
Р. СЕЛЕНГА И Р. ТУРКА ОСОБОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ
«БАЙКАЛЬСКАЯ ГАВАНЬ»**

Пилипенко Т.В., Кудряшов А.Ю., Ревазов Д.Е.

ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск

В данной статье анализируются проблемы, связанные с ухудшением экологической обстановки на Байкальской природной территории. Проводится анализ причин ухудшения гидроэкологических аспектов на реках Селенга и Турка, в том числе изменение гидрологических и гидравлических характеристик вследствие прекращения проведения путевых работ.

Ключевые слова: гидроэкология, гидравлика, наносы, расходы воды, взвешенные частицы, русловые съемки, промеры глубин.

**PROBLEMS OF MONITORING AND ECOLOGICAL SITUATION OF THE BAIKAL
NATURAL TERRITORY ON THE EXAMPLE OF THE SELENGA RIVER AND THE
TURK RIVER SECTION OF THE BAIKAL HARBOR SPECIAL ECONOMIC ZONE**

Pilipenko T.V., Kudryashov A.Yu., Revazov D.E.

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk

This article analyzes the problems associated with the deterioration of the ecological situation on the Baikal natural territory. The analysis of the causes of the deterioration of hydroecological aspects on the Selenga and Turk rivers, including changes in hydrological and hydraulic characteristics due to the termination of track work, is carried out.

Keywords: hydroecology, hydraulics, sediments, water flow, suspended particles, channel surveys, depth measurements.

Введение. В последние десятилетия практически ежегодно в Забайкальском крае возникают серьезные проблемы, связанные с затоплением и подтоплением пойменных территорий, зачастую с потерей человеческих жизней. Наводнения стали встречаться гораздо чаще, и даже небольшие, не выходящие за критические отметки подъема уровней воды влекут за собой очень негативные последствия как для экологии в целом, так и для гидроэкологии.

Так же стоит отметить, что в связи с изменившейся геополитической обстановкой в мире, произошло перераспределение интересов различных сфер в области экономики, бизнеса, в том числе, и туризма. Повысился спрос на внутренний туризм в РФ, а также спрос туристов Азиатских стран на отдых внутри нашей страны, увеличился процент граждан, которые хотят посетить и исследовать не только южные побережья Черного моря или Центральный Федеральный округ Российской Федерации, но и такие направления, как республика Алтай, Хакасия, Дальний Восток, посетить уникальное озеро Байкал. В настоящее время природные особенности озера Байкал выглядят особенно выгодно, в том числе, и в географическом смысле, особенно, для туристов Евро-азиатского альянса [1]

В городе Иркутске регулярно проводятся совещания руководителей туристских администраций Китая, России и Монголии о реализации международного туристского проекта «Великий чайный путь» (рисунок 1). Планируется реализация проектов по вхождению в состав рабочих групп по разработке дорожных карт по реализации трансграничных туристических маршрутов («Великий Чайный путь», «Треугольник Великих озер», «Байкал – Хубсугул»).

Следует отметить, что повысить темп развития туристического направления на озеро Байкал, можно и за счет таких факторов, которые сдерживают его в данный момент, как отсутствие необходимой инфраструктуры для развития туризма и пассажирских перевозок водным транспортом на Байкале (отсутствие речных портов, вокзалов, неудовлетворительное состояние причальных сооружений по отдельным объектам износ составляет порядка 90%), а

так же дефицит и высокую степень износа транспортных средств, используемых для перевозки туристов, в том числе современных туристских судов, круизных судов, суден на воздушной подушке и других транспортных средств [2].



Рис. 1. Карта великого чайного пути.

Мониторинг экологической обстановки Байкальской природной территории. Река Селенга, впадающая в озеро Байкал, является основной транспортной артерией для поступления водной массы в озеро, играет исключительно важную роль в водоснабжении озера: ее сток ежегодно приносит до половины ежегодного притока воды в уникальное озеро Байкал. Река протекает по территории двух государств: Монголии и Российской Федерации, по оценкам специалистов обладает большим гидроэнергетическим потенциалом, имея в своем бассейне развитую речную сеть, включающую более 30 притоков. К сожалению, в настоящее время судоходство по реке Селенга практически не осуществляется [3].

Река Турка – один из наиболее крупных притоков оз. Байкал и впадает в него на восточном берегу, примерно, в средней его части. Особая экономическая зона «Байкальская гавань» создана в 2007 г. постановлением Правительства РФ, расположена на берегу озера Байкал в устье р. Турка. Бурятия вошла в число регионов, которым из федерального бюджета выделены средства на создание инфраструктуры для развития туризма в особой экономической зоне (ОЭЗ) «Байкальская гавань». В 2022 году в ОЭЗ вошли 4 новых резидента с масштабными проектами и весомыми инвестициями. Планируется создать большой курортный комплекс.

Обеспечение безопасного подхода к причальным сооружениям порта Турка: для транзитных и крупных судов, для ремонта и обслуживания круизного флота, для отстоя флота населения (катера, рыбацкие боты), для стоянки и обслуживания спортивных судов. В границах участков действует пассажирская линия – суда на воздушных подушках «Бирюса» судоходной компании «Водоход». В 2022 г. было пришвартовано 21 судно в Гавани.

С точки зрения развития туризма и экотуризма, еще одним из основных направлений следует рассматривать восстановление водных путей сообщения по реке Селенга, являющейся трансграничной рекой, соединяющей два государства-Российскую Федерацию и Монголию. Совместное использование водного пространства реки позволит обеспечить судоходство, восстановит гидрологию и нарушенные повышенной заносимостью экосистемы бассейна реки Селенга [4]. В связи с тем, что река Селенга несет в себе не только жидкий, но и твердый сток, происходит регулярное, стабильное увеличение количества наносов русла реки и выноса твердых частиц к дельте и, непосредственно, в само озеро Байкал. Вынос наносов в озеро влечет за собой негативные факторы и с точки зрения экологического баланса, и с точки зрения химического и биологического состояния воды озера Байкал.

За счет проведения путевых работ по расчистке русла реки, произойдет уменьшение поступления твердого стока и в озеро Байкал, что на данном этапе является так же существенной проблемой. Так же за счет восстановления регулярных работ по расчистке русла реки и восстановления гарантированных габаритов судового хода, произойдет и снижение техногенной нагрузки на прилегающие территории, в том числе, от негативного воздействия разлива паводковых вод.

Стоит так же отметить, что водный транспорт является одним из самых эффективных и безопасных. Обслуживание водных путей в шесть-семь раз дешевле, чем других видов транспорта, а пропускная способность опережает железные дороги в два с половиной раза. Водные перевозки в четырнадцать раз безопаснее автомобильных и в тридцать четыре раза энергоэффективнее (при расчете затрат на перевезенную тонну груза). Однако, из минусов можно отметить существенный недостаток-сезонность перевозок.

Речной транспорт, обладая рядом преимуществ по сравнению с другими видами транспорта, является важным звеном в сети транспортных коммуникаций России и трансграничных территорий. Обеспечение безопасного судоходства возможно только при регулярном проведении путевых работ, в первую очередь, дноуглубительных. Предлагается рассмотреть модель разработки внутренних водных путей (дноуглубление, мониторинг глубин, обеспечение гарантированных габаритов пути, гидроэкологическая составляющая) на внутренних водных путях Байкальской природной территории, в частности, на реке Селенга по ряду причин: до середины 60-х гг. функционировало транспортное сообщение по водным путям между Монголией и Россией, на реке проводили комплекс путевых работ и показатели вероятности наводнений были минимальны; вызовы современной экономики диктуют свои правила на переориентацию рынков сбыта на Азию; транспортировка грузов по водным путям считаются самими не затратными и безопасными с точки зрения и экологии, и ЧС, и, наконец, развитие данного направления невольно повлечет за собой развитие всех сфер экономики, при этом не будут забыты и пойменные территории внутренних водных путей.

На протяжении российско-монгольской границы, протяженность которой составляет более 3 тысяч километров, располагается несколько наземных международных и двусторонних трансграничных переходов. Между странами России и Монголии неуклонно растет туристический пассажиропоток, но маршруты проходят по следующим международным трансграничным переходам:

- Ташанта – Цаганнур (автомобильный);
- Кяхта – Алтанбулаг (автомобильный);
- Наушки – Сухэ – Батор (железнодорожный).

Водных путей сообщения по данному направлению сейчас не существует. Однако, ФБУ «Администрация Байкало-Ангарского района внутренних водных путей» в навигацию 2021 приступили к выполнению путевых работ на реке Селенга, в 2022 году так же выполняли частичную разработку судового хода реки Селенга.

Выводы: принимая во внимание такие факторы, как:

- необходимость снижения техногенной нагрузки на Забайкальский край во время подтопления и затопления пойменных территорий (за счет проведения дноуглубительных и дноочистительных работ русла реки Селенга и Турка);
- возрастающий спрос туристского направления к озеру Байкал;
- востребованность грузовых перевозок данного направления.

Рекомендуется рассмотреть вопрос о проведении комплекса путевых работ на Байкальской природной территории, с целью улучшения экологической обстановки и проведения регулярного мониторинга гидрологических параметров рассматриваемой территории. Результатом проведения работ будет восстановление гидрологического режима водоемов и водотоков. Как следствие, снизится риск создания чрезвычайной ситуации- затопления. Использование водного транспорта и развитие инфраструктуры уменьшит нагрузку на автомобильный транспорт, что повлечет за собой и повышение экологической безопасности, очень важной для Забайкальского края.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://irkobl.ru/news/1305872>.
- [2] *Пилипенко Т.В., Ревазов Д.Е.* Развитие водных путей сообщения на трансграничной территории р. Селенга. https://www.researchgate.net/publication/359317727_Development_of_Waterways_in_the_Trans-Boundary_Territory_of_the_Selenga_River.
- [3] *Бедяева Т.В., Макарова М.Д.* Развитие туризма в регионе Байкал. Отчет агентства по туризму Иркутской области, 2021 г.
- [4] *Пилипенко Т.В., Кудряшов А.Ю., Ревазов Д.Е.* Перспективы государственно-частного партнерства в сфере водного транспорта на примере развития водных путей сообщения сибирских рек – VIII Ежегодная научная конференция «Государственно-частное партнерство в сфере транспорта: модели и опыт», г. Санкт-Петербург, 2022 г.

**КОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОГЕОДИНАМИКА
КУЛТУКСКОГО РЕЗЕРВУАРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В 2012-2023 ГГ.
(ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ)**

*Рассказов С.В.^{1,2}, Чебыкин Е.П.^{1,3}, Ильясова А.М.¹, Снопков С.В.^{2,4}, Чувашова И.С.^{1,2},
Борняков С.А.¹*

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск

² Иркутский государственный университет, Иркутск

³ Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

⁴ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

В рамках полного сейсмогеодинамического цикла центральной части Байкальской рифтовой системы в рядах гидрогеохимических данных, полученных в 2012-2022 гг. на станциях Култукского полигона, прослеживаются вариации температурных оценок подземных вод Култукского резервуара по Na/Li геотермометру в связи с изменениями отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и активности ^{234}U , отражающих открытие и закрытие микротрещин для циркулирующих подземных вод. Косейсмическая химическая гидрогеодинамика Култукского резервуара подземных вод рассматривается в терминах температуры и растяжения–сжатия коры.

**COSEISMIC CHEMICAL HYDROGEODYNAMICS
OF THE KULTUK GROUNDWATER RESERVOIR IN 2012-2023
(CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT SYSTEM)**

*Rasskazov S.V.^{1,2}, Chebykin E.P.^{1,3}, Ilyasova A.M.¹, Snopkov S.V.^{2,4}, Chuvashova I.S.^{1,2},
Bornyakov S.A.¹*

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

² Irkutsk State University, Irkutsk

³ Limnological Institute SB RAS, Irkutsk

⁴ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Within the framework of the complete seismic geodynamic cycle in the central part of the Baikal rift system, series of hydrogeochemical data show variations in temperature of groundwater from the Kultuk reservoir using a Na/Li geothermometer are traced in connection with changes in the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activities ratio and ^{234}U activity, reflecting opening and closing of microcracks for circulating groundwater. The coseismic chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir is considered in terms of temperature and crustal extension–compression.

Введение. Изучение сейсмогенных деформаций коры предполагает считывание эффектов, происходящих в очаге подготавливающегося землетрясения. По приходу сейсмических волн восстанавливается эпицентр, гипоцентр и сила подвижки в очаге. Но реконструкция механизма землетрясения, как правило, получается уже после землетрясения. Для отслеживания его приближения необходим сбор информации, по которой можно определить время и место главного сейсмического толчка. В идеальном варианте должны проводиться наблюдения эффектов либо непосредственно в очаге землетрясения, либо на уровне максимальной концентрации гипоцентров. Наиболее разрушительные землетрясения мира зарождаются на глубинах 5-7 и 35-40 км (Freund, 2013).

Во второй половине 20-го и в начале 21-го веков сейсмичность центральной части Байкальской рифтовой системы проявляется циклично. Последний полный сейсмогеодинамический цикл охватывает временной интервал от сильной Култукской активизации (землетрясения от 27 августа 2008 г. до 04 января 2011 г.) до Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации (землетрясения, начавшиеся 22 сентября 2020 г. и продолжающиеся в 2023 г.). Для изучения гидрогеохимических процессов, сопутствующих развитию сейсмогенных деформа-

ций территории в 2012 г. был организован мониторинг подземных вод на Култукском полигоне. По наблюдениям вариаций отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8), активности ^{234}U (А4) и концентрации U в циркулирующих подземных водах было установлено косейсмическое закрытие и открытие микротрещин, отражающее пульсации сжатия и растяжения коры, а по результатам анализа пространственно-временных вариаций термофильного элемента Si в подземных водах полигон стал рассматриваться как отражение косейсмических процессов, происходящих в Култукском резервуаре подземных вод (Ильясова, Снопков, 2023).

Для изучения подземных вод привлекается Na/Li геотермометрия. Цель настоящей работы – проследить косейсмические изменения Na/Li температурных характеристик подземных вод станций всего Култукского полигона в связи с вариациями ОА4/8 и А4.

Станции мониторинга. На Култукском полигоне мониторинг подземных вод проводится с частотой опробования в среднем один раз в 2 недели более 10 лет на пяти основных станциях: на скважинах – станции 27 (Школа), 8 (Чертова Гора), 40 (Стрелка), 9 (Земляничный) и в роднике – ст. 14к (Ключ Тигунчиха). Основные мониторинговые станции занимают разное положение в активных разломах структурного сочленения Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины и существенно расходятся между собой по гидрогеохимическим показателям подземных вод. Используются также данные вспомогательных станций более редкого опробования. В целом временная информация о вариациях компонентов подземных вод на полигоне получается на 11 станциях (рис. 1).

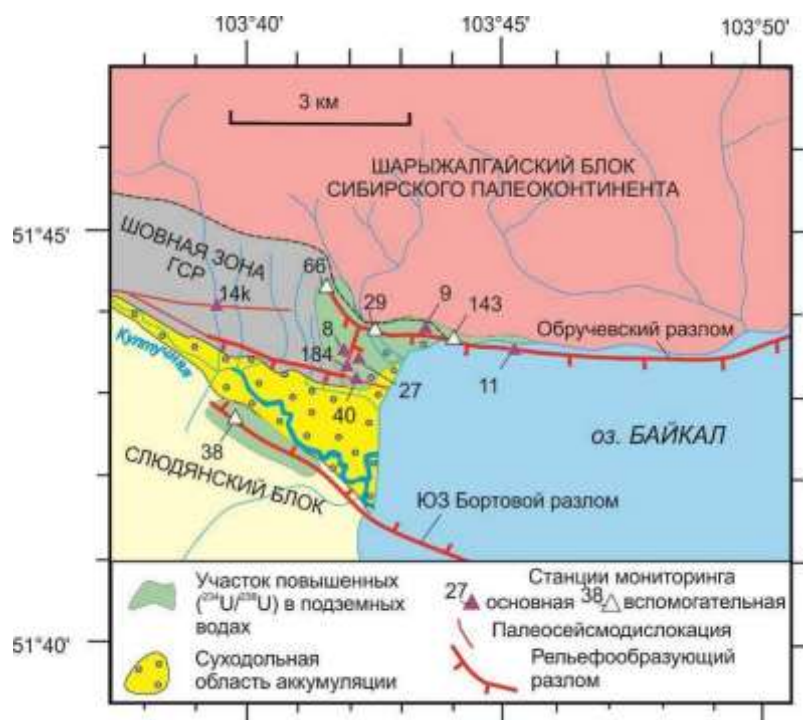


Рис. 1. Схема расположения основных и вспомогательных станций гидрогеохимического опробования активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Отбор, хранение и аналитические исследования проб воды. При отборе проб для определения химического элементного состава образцы воды фильтруются через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Axugen Scientific, Cat.-No. МСТ-200-С, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70%), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в

пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2%) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяются содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500. Изотопы урана определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Применяется разработанная аналитическая методика (Чебыкин и др., 2012).

Временные вариации T(Na/Li). Временные вариации отношения Na/Li в подземных водах основных мониторинговых станций полигона в 2012-2022 гг. сопровождаются оценками температурных интервалов по уравнениям для подземных вод с содержанием Cl > 0.3 mol/kg (ст. 27 и 40) и с содержанием Cl < 0.3 mol/kg (ст. 8, 9, 14к и 11) (Fouillac, Michard, 1981). Вариации рассчитанной температуры связываются с образованием глинки трения в плоскостях активных разломов. По результатам Na/Li геотермометрии подземных вод станции Култукского полигона выстраиваются в ряд низких, средних и высоких температур. По преобладающим подземным водам с взаимным перекрытием фигуративный полей на Na/Li-вариационных диаграммах переходных интервалов 2015-2019 гг. и 2019-2020 гг. для каждой станции определяется T(Na/Li) гидрогеодинамического ядра и переходного (2015-2020 гг.) гидрогеодинамического центра подземных вод в резервуаре (рис. 2).

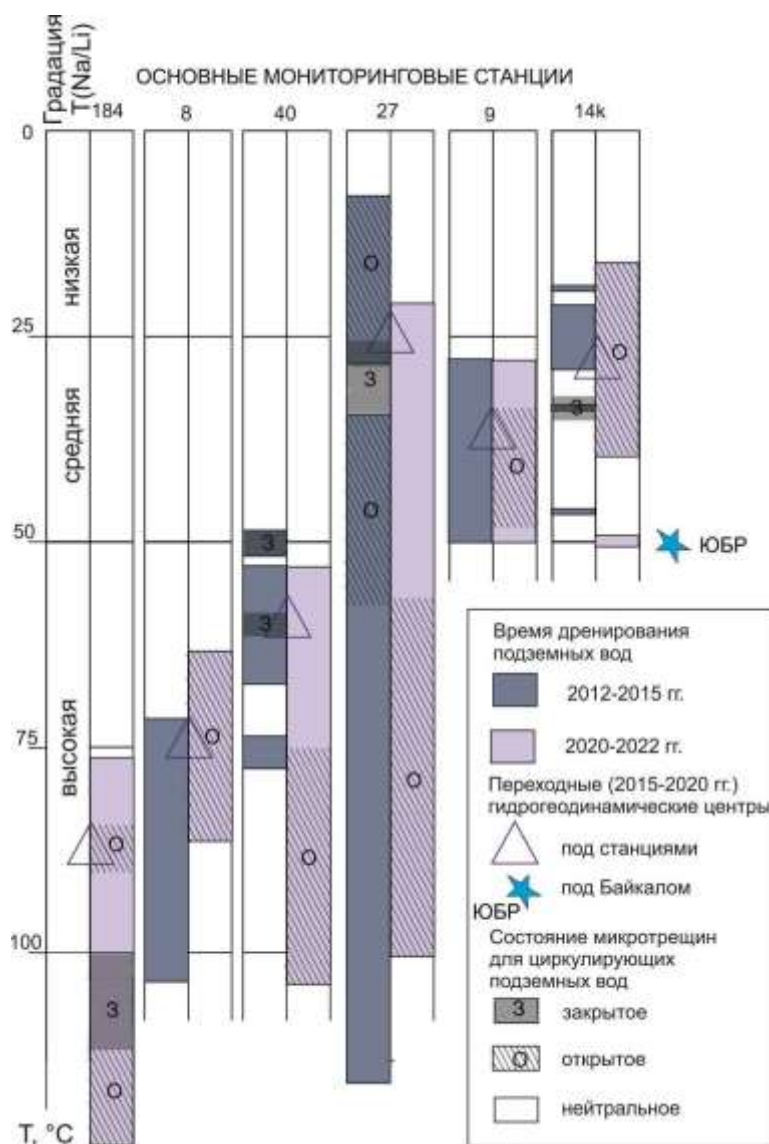


Рис. 2. Схема соотношений T(Na/Li) подземных вод и открытия–закрытия микротрещин на основных мониторинговых станциях Култукского полигона (объяснения в тексте). ЮБР – Южно-Байкальский резервуар. Местоположение станций показано на рис. 1.

В сопоставлении данных, полученных для разных станций полигона, связующую роль играют данные о подземных водах ст. 27, перекрывающие весь диапазон T(Na/Li) резервуара, от 8 до 115 °С. Переходный гидрогеодинамический центр этой станции определяется на границе низких и средних температур (около 25–30 °С). С течением времени на ст. 27 существенно варьируются А4 и ОА4/8, свидетельствующие о проявлении движений в плоскости разлома, сопровождающихся закрытием и открытием микротрещин. Особенно сильно закрытию и открытию подвержены микротрещины в области переходного гидрогеодинамического центра в 2012-2015 гг. Переходный гидрогеодинамический центр этой станции образуется на границе участков закрытых микротрещин и вышележащего участка открытых микротрещин. После перестроечного интервала 2015-2019 гг. преобладает открытие микротрещин при высоких температурах (75–105 °С).

Заключение. По результатам изучения временных вариаций ОА4/8 и А4, отражающим пульсации открытия и закрытия микротрещин (сжатия и растяжения в верхнем слое коры) при разных T(Na/Li) Култукского резервуара подземных вод выявлены общие гидрогеохимические закономерности процессов, развивающихся в торцовой Култукской тектонической ступени и прибортовых (Обручевском и Юго-Западном Бортовом) активных разломах Южно-Байкальской впадины. Получена основа для анализа подготовки и реализации каждого сильного землетрясения в центральной части Байкальской рифтовой системы в терминах откликов на них интегрального показателя Na/Li температуры резервуара подземных вод и открытия–закрытия микротрещин в верхнем слое коры под мониторинговыми станциями.

В применении этого подхода предполагается, что сейсмическая угроза в центральной части Байкальской рифтовой системы не может оцениваться категориями событий, происходивших до перестройки деформационного поля коры между Муринским землетрясением 6 июля 2020 г. и Быстринским землетрясением 22 сентября 2020 г., но может осуществляться на основе получения новых мониторинговых данных и расшифровки косейсмической химической гидрогеодинамики по ходу продолжающейся Байкало-Хубсугульской активизации.

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в ЦКП «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск). Работы проводились в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития («Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ильсова А.М., Снопков С.В.* Косейсмические вариации термофильного элемента Si подземных вод на западном побережье оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72-105.
- [2] *Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А.* Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613-631.
- [3] *Чупизубов А.В., Смекалин О.П.* Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936-937.
- [4] *Fouillac R., Michard S.* Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // Geothermics. 1981. V. 10. P. 55-70.
- [5] *Freund F.* Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // Acta Geophysica. 2013. V. 61, no. 4. P. 775-807. DOI:10.2478/s11600-013-0130-4.

ВИБРАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ГИДРОСФЕРА

Хайретдинов М.С.^{1,2}, Ковалевский В.В.¹, Шиманская Г.М.¹

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Рассматривается предложенный авторами интегрированный подход к решению проблемы изучения взаимодействия инфранизкочастотных геофизических полей разной природы – сейсмо-акусто-гидроакустических волновых полей от природных и техногенных источников с учетом метеофакторов. В качестве источников волновых полей в экспериментах рассматриваются сейсмические вибраторы, обладающие свойством порождать одновременно сейсмические волны в земле и акустические в атмосфере. Высокая повторяемость волновых форм в экспериментах с применением таких источников обеспечивает высокие метрологическую точность и разрешающую способность в изучении межволновых взаимодействий. Приводятся результаты экспериментов по межволновым взаимодействиям, в том числе в пределах Байкальской рифтовой зоны.

Ключевые слова: акусто-сейсмические поля, метео-поля, сейсмические вибраторы, сейсмо-акусто-гидроакустические волны, волновые взаимодействия, геоэкологические риски, экспериментальные исследования.

VIBRATION WAVES IN THE SYSTEM LITHOSPHERE-ATMOSPHERE-HYDROSPHERE

Khairatdinov M.S.^{1,2}, Kovalevsky V.V.¹, Shimanskaya G.M.¹

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The authors consider an integrated approach to solving the problem of studying the interaction of infra-low-frequency geophysical fields of different nature - seismo-acoustic-hydroacoustic wave fields from natural and technogenic sources, taking into account meteorological factors. As sources of wave fields in the experiments, seismic vibrators are considered, which have the property of simultaneously generating seismic waves in the earth and acoustic waves in the atmosphere. The high repeatability of waveforms in experiments using such sources provides high metrological accuracy and resolution in the study of interwave interactions. The results of experiments on interwave interactions, including within the Baikal rift zone, are presented.

Key words: acoustic-seismic fields, meteorological fields, seismic vibrators, seismic-acoustic-hydroacoustic waves, wave interactions, geoecological risks, experimental studies.

Введение. Фундаментальное свойство природных и техногенных геофизических источников (землетрясений, взрывов, сейсмических вибраторов) связано с тем, что они порождают комплекс геофизических процессов-сейсмических в земле, акустических в атмосфере, гидроакустических в воде и др. – связанных между собой [1, 2]. Изучение взаимосвязей между ними представляет собой отдельную научную задачу, имеющую теоретическую и практическую значимость. В частности, распространение акустических волн под действием метеофакторов может приводить к многократному возрастанию геоэкологических рисков для окружающей среды в связи с развивающимся при определенных условиях явлением пространственной фокусировки волн в определенном азимутальном направлении [3, 4]. Явление трансформации сейсмических волн в гидроакустические на границе раздела «дно-море» открывает перспективу для морской сейсморазведки углеводородов в шельфовых зонах и др. применения. В связи с этим изучение вопросов взаимосвязей и распространения разнородных геофизических полей является актуальным и значимым. Некоторые аспекты этой проблемы рассматриваются в данной работе в теоретико-экспериментальном плане, подкрепленные данными полевых экспериментов, в частности данными по сейсмо-акусто-гидроакустическим волновым взаимосвязям в пределах Байкальской рифтовой зоны.

Постановка задачи. Одной из предпосылок к рассмотрению вопросов разнородных межволновых взаимодействий в геофизике являются наблюдаемые авторами настоящей работы данные полевых экспериментов, доказывающие явления образования и одновременного распространения сейсмо-акусто-гидроакустических волн от разного типа источников. Примеры дуального образования и распространения волн иллюстрируются на рис.1 по отношению к трем разным источникам – техногенному землетрясению с эпицентром на площади угольного разреза «Бачатский», дата 19.06.2013, магнитуда 5.3-5.6 (рис.1а), сейсмовибратору ЦВ-40 с амплитудой возмущающей силы 40 тс и рабочей полосой частот 6-12 Гц (рис. 1б), поверхностным полигонным взрывам с тротиловым эквивалентом 600 г (рис.1с).

В первом случае расстояние «источник-приемник» составляет 205 км, во-втором- 48 км, в третьем-600 м. Для записей, экспериментально полученных авторами данной работы, характерным является то, что наряду с записями сейсмических волн первых вступлений присутствуют акустические волны с задержками, обусловленными их временами распространения на вышеуказанных трассах.

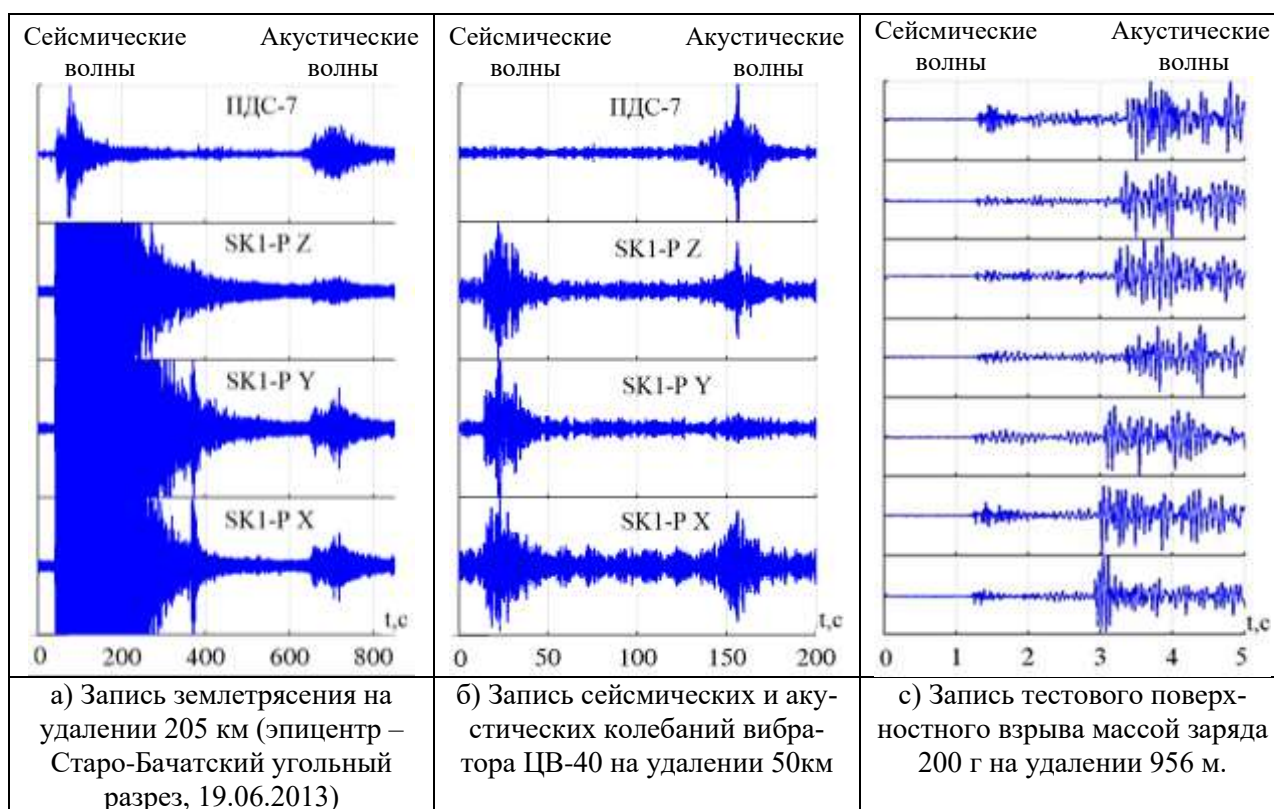


Рис. 1. Записи сейсмических и акустических волн от разного класса источников.

С учетом полученных данных (рис. 1) представляет интерес изучение условий дальнего распространения акустических волн одновременно с сейсмическими.

Дальнее сейсмоакустическое распространение волн. Особенность записей (рис. 1) состоит в том, что они отражают свойство фрактальности процессов одновременного распространения сейсмических и акустических волн в разных пространственных масштабах. Образование таких волн связано с особенностями процессов их возбуждения и распространения. Наиболее метрологически точная интерпретация таких процессов рассмотрена теоретически и экспериментально подтверждена по отношению к сейсмическим вибраторам, представляемых в виде модели плоского штампа, расположенного на границе раздела сред в виде нижнего упругого полупространства и газообразного в верхнем полупространстве [5, 6]. Характеристика направленности излучения звука в атмосферу здесь является вертикально направленной.

Возможны два пути дальнего распространения звука: приповерхностное распространение вдоль дневной поверхности земли с максимумом переносимой акустической энергии вдоль азимутального направления, совпадающего с направлением ветра; другой путь связан с

процессами распространения и отражения в верхних слоях атмосферы. Для первого случая многофакторная модель интегрального волнового давления как результата распространения акустических волн в нижней атмосфере может быть описана уравнением энергетического баланса:

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_v(f) + P_1(r) + P_2(e, \tau, \omega, \varphi) + P_3(1/r^2). \quad (3)$$

Здесь $P_{\Sigma}(t, f, r)$ – давление в точке регистрации на удалении r от источника; $P_v(f)$ – частотно зависимое акустическое давление, развиваемое источником; $P_1(r)$ – поглощение инфразвука по расстоянию, определяемое неоднородностью атмосферы и покровом дневной поверхности Земли (лес, трава и т.д.); $P_2(e, \tau, \omega, \varphi)$ – давление в пункте регистрации как функция метеопараметров: относительной влажности e , температуры τ , скорости w_0 и угла φ между направлением ветра и плоским волновым фронтом от источника; $P_3(1/r^2)$ – давление как результат геометрической расходимости волнового фронта.

Один из факторов, способствующих дальнему распространению звука, связан с явлением пространственной фокусировки мощности излучения волнового поля источника в направлении ветра [4]. Характеризующий это явление фактор фокусировки определяется соотношением интенсивности звука в неоднородной движущейся среде к его интенсивности в неподвижной среде [7]:

$$f = I[z, \theta, \varphi]/I_0. \quad (3)$$

Теоретически и экспериментально рассмотрены зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения α источника волн для заданных начальных условий. Вводимые начальные параметры для проведения численных расчетов – в прямоугольной системе координат ось z направлена вертикально вверх от поверхности Земли; начальное направление луча от акустического источника характеризуется сферическими углами: θ (зенитным углом) и φ (азимутальным углом); высота источника над землей составляет 5 м. В качестве внешних параметров используются скорость и направление горизонтального ветра, расстояние «источник-приемник» [8]. На рис. 5 представлены расчетные и экспериментально полученные зависимости фактора фокусировки f для представленных на рис. 2 параметров. Как следует из приведенных графиков, они характеризуются высокими селективными свойствами по угловым координатам. Так в частности, соотношение максимумов и минимумов может достигать 50 раз.

С учетом этого важность изучения этой проблемы связана с тем, что метеозависимое распространение инфразвука сопровождается концентрацией акустической энергии волн в достаточно узком луче. Это приводит к многократному росту геоэкологического риска для окружающей среды на определенном азимутальном направлении [3]. Особенно значение рисков возрастает по отношению к волнам инфранизких частот, слабо затухающих в связи с явлениями поглощения и рассеяния, и являющихся угрожающими для человека вследствие пересечения по частотам с его электрофизиологическими ритмами.

Приповерхностное распространение акустических волн связано с факторами сильного поглощения такими как неоднородный покров дневной поверхности земли (лес, кустарник, снег и др.) [9], ее геологическая неоднородность (овраги, холмы и др.), а также неоднородности в нижней атмосфере. Они являются ограничительными факторами для дальности распространения приповерхностных акустических волн.

Второй из рассматриваемых путей распространения вибрационных акустических волн связан с лучевым распространением в верхних слоях атмосферы. В случае благоприятных атмосферных параметров – высотного (в км) профиля температуры, компоненты горизонтального ветра, высоты отражения от верхних слоев атмосферы – дальность распространения может достигать до сотни км и более.

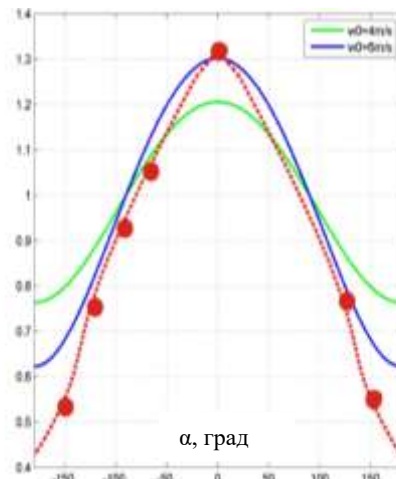


Рис. 2. Зависимость коэффициента фокусировки f от горизонтального расстояния от источника r и азимута α точки наблюдения. Расчетные графики для радиуса кругового расположения датчиков радиусом 12 км и скоростью ветра 6 м/с (синяя кривая) и 4 м/с (зеленая кривая). Высота источника над землей 5 м. График с красными точками получен экспериментально для того же расположения; скорость ветра 4-6 м/с.

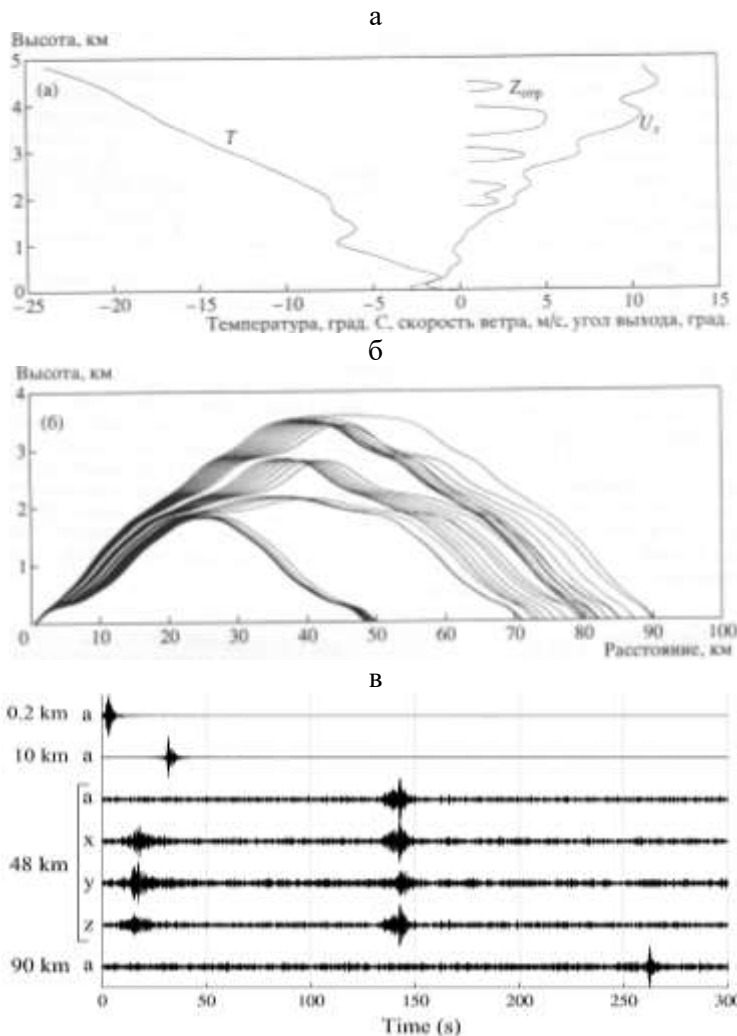


Рис. 3. а) Высотные (в км) профили температуры T , компоненты горизонтального ветра u_x (м/с) по данным радиозонда (для 5 ч 30 мин местного времени, летнее время), высоты отражения $Z_{отр}$; б) расчетные траектории инфразвуковых волн; в) результаты экспериментов по выделению акустических волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 на удалениях 0,2, 10, 48, 90 км: а – акустические волны, зарегистрированные на акустических датчиках; на удалении 48 км для компонент x , y , z сейсмического датчика время 8,27 с соответствует вступлению продольных сейсмических волн, а время 146 с – приходу акустических волн.

Экспериментальным подтверждением этого вывода являются результаты экспериментов по одновременной регистрации сейсмических и акустических волн на больших дальностях. В качестве примера на рис. 3 приводятся теоретически рассчитанные траектории инфразвуковых волн [10], построенные с учетом эффектов отражения в верхних слоях атмосферы и результаты экспериментов по одновременной регистрации сейсмических и акустических волн от вибратора ЦВ-40 на профиле протяженностью 100 км. Рассчитанные траектории (рис.3б) соответствуют приведенным на рисунке высотному профилю температуры T ($^{\circ}\text{C}$), компоненте горизонтального ветра U_x (м/с) вдоль направления источник-приемник (рис.3а). Как следует из расчетов для приведенных высотных профилей уверенная регистрации отраженных акустических волн может происходить на дальностях в районе 50 и 100 км от источника. Это объясняет принципиальную возможность регистрации слабых акустических волн на больших дальностях.

Экспериментально это подтверждено в работах авторов настоящей статьи по регистрации сейсмоакустических колебаний на линейном профиле протяженностью 100км. Результаты регистрации и выделения соответствующих волн представлены на рис.3с. Здесь представлены результаты корреляционной свертки вибрационных колебаний с линейной частотной модуляцией от вибратора ЦВ-40 для удалений 0.2, 10, 48, 90 км. Расстояния помечены слева от рисунка. Регистрация сейсмических и акустических колебаний производилась соответственно датчиками колебательной скорости GS-3 и пьезодатчиками давления типа ПДС-7. На удалениях 0.2, 10, 48, 90 км представлены результаты выделения акустических волн. На удалении 48 км записи с выходов трехкомпонентного сейсмического датчика x , y , z на времени 8.27с иллюстрируют вступления продольных сейсмических волн, а на времени 146 с – акустических волн.

Как следует из приведенных рисунков результаты экспериментов подтверждают результаты теоретических расчетов. Полученные данные являются убедительным доказательством возможности регистрации инфразвука на больших расстояниях с помощью сейсмических и акустических датчиков.

Вибрационные волны в оз. Байкал. Картина гидроакустических волн в водной толще оз. Байкал имеет сложный характер вследствие выраженности эффектов переотражений, обусловленных рядом факторов. Один из основных вызван распространением волн в воде с границами «дно-лед». Наличие других переотражений обусловлено распространением волн в подводном звуковом канале. Приповерхностный звуковой канал, впервые открытый в океане Л.М. Бреховских [11], получает наиболее полное развитие при образовании ледяного покрова. При наличии льда выше и ниже оси звукового канала (у нижней поверхности льда) создаются благоприятные условия для фокусировки звуковых лучей, с одной стороны, за счет льда, с другой – за счет 200-метрового слоя воды, что намного лучше, чем в летний период. В условиях зимней стратификации звук распространяется, рефрагируя по лучевым траекториям, описывающим дуги разной длины, в зависимости от угла выхода луча. Для модели сосредоточенного источника звука лучевая картина для периода времени январь-апрель, рассчитанная теоретически, представлена на рис. 5а [12]. Экспериментальная часть работ выполнена коллективом авторов института физики Земли РАН, института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, института геологии СО РАН (2021 г) с применением в качестве источника низкочастотных колебаний вибратора ЦВ-100, расположенного на берегу оз.Байкал около пос. Бабушкин. Частный результат регистрации волн в воде с помощью спускаемого гидрофона на удалении от источника 83,96 км и на глубине 20 м представлен на рис .5б. Для сравнения на рис. 5в приводится результат одновременной регистрации на земле сейсмической и акустической волн на удалении от источника 85,6 км.

Из рассмотрения рис.5а следует, что лучи, выходящие под малыми углами скольжения, распространяясь от источника к приёмнику, отражаются от льда. Чем больше угол скольжения луча в источнике, тем глубже будет находится точка заворота луча и тем большую интеграль-

ную скорость он будет иметь. В левой части рисунка представлен вертикальный профиль скорости звука по глубине, отражающий нарастание скорости с глубиной в пределах 1402-1440 м/с.

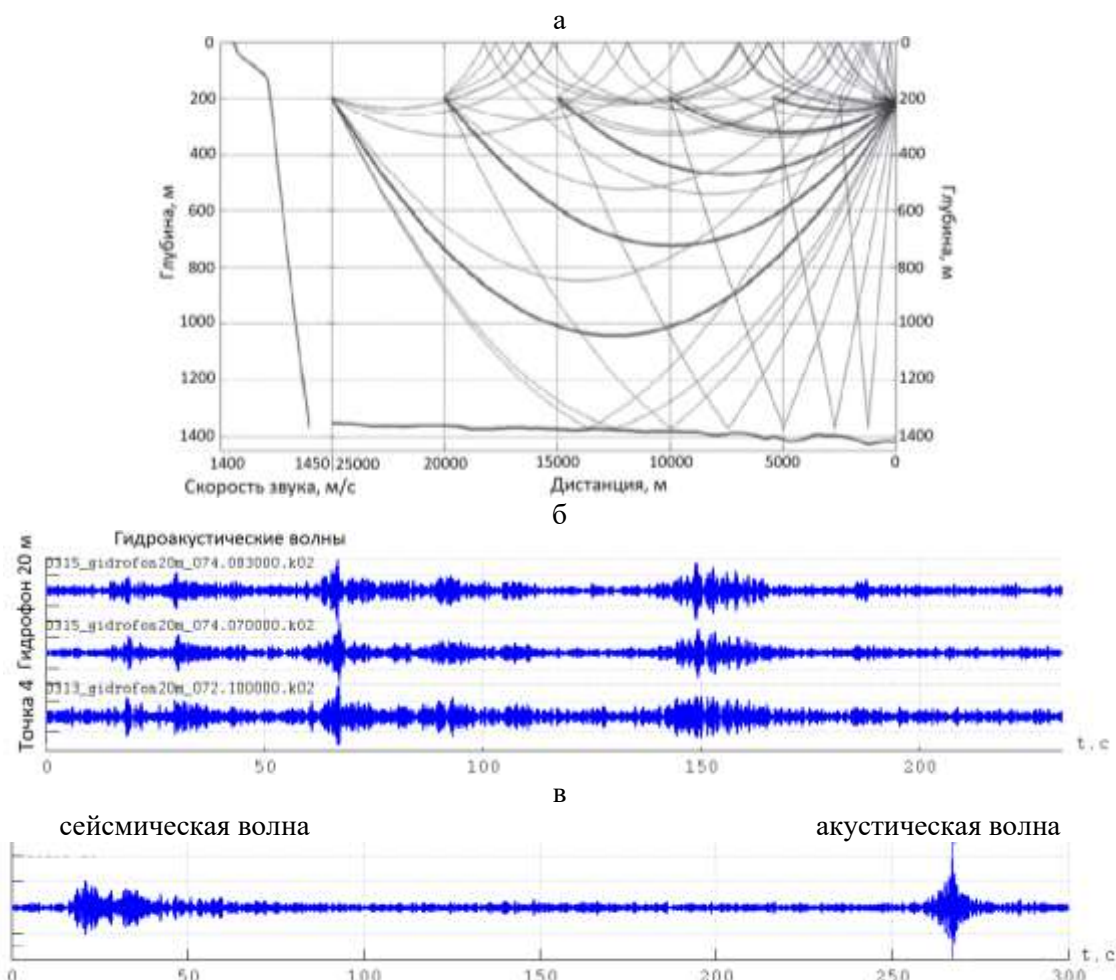


Рис. 5. а – лучевая картина волн в оз. Байкал; б – результат регистрации волн в воде на глубине 20 м и удалении от источника на расстояние 83.96 км; в – сейсмическая и акустическая волна с временами вступлений 16,9 с и 262 с на удалении 85,6 км.

Результаты экспериментов по регистрации волн в воде представлены в виде откликов на повторяющиеся сеансы вибрационного зондирования – рис. 5б. Из анализа результатов экспериментальной регистрации в воде следует вывод о наличии многоволновой структуры отклика среды в ответ на вибрационное зондирование. Наряду с присутствием здесь первичных скоростных (продольных) волн на временах прихода 15.5 сек со скоростями распространения сейсмических волн в земле (около 5.35 км/с) здесь наблюдается присутствие группы волн как результата проявления процессов переотражений, что согласуется с картиной поля на рис. 5а.

Картина волн в земле (рис. 5в) характеризуется большей выраженностью первичных (сейсмических) и вторичных (акустических) волн и, соответственно, более интерпретируема.

Дополнительно полученные здесь результаты экспериментов по регистрации волн во льду показывают, что из-за влияния трещиноватости структуры льда происходит сильное затухание волн в структуре льда и надежной регистрации волн получить не удастся. Удовлетворительный здесь результат удастся получить в режиме монохроматического зондирования на отдельных частотах и точках площади льда.

Заключение. На основе применения вибрационного метода рассмотрены вопросы взаимодействия сопряженных разнородных геофизических полей – сейсмических, акустических, гидроакустических. В качестве источников волновых полей рассматриваются сейсмические вибраторы, обладающие свойством порождать одновременно низкочастотные сейсмические

волны в земле и акустические в атмосфере. Гидроакустические волны образуются как результат трансформации сейсмических волн на границе раздела «дно-вода». Эффекты взаимодействия волновых полей рассмотрены в экспериментах на дальностях до 100 км. Рассмотрены особенности структуры волн в средах земля, вода, атмосфера, лед. Дальнему распространению акустических волн в атмосфере способствует явление пространственной фокусировки волн, а также лучевое распространение в верхней атмосфере. Структура гидроакустических волн на примере процесса распространения в водной толще оз. Байкал усложнена наличием переотраженных волн, обусловленных вариациями гидростатического давления и температурной неоднородности по глубине озера. Распространение упругих колебаний во льду на оз. Байкал характеризуется выраженным затуханием вследствие сильной трещиноватости льда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-07-00861а), госзадания № FWNM–2022–0004.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адушкин В.В., Спивак А.А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде. Физика Земли, 2012, № 3, с. 3-21.
- [2] Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами. Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 3, с. 431-441.
- [3] Gubarev V.V., Kovalevskii V.V., Khairtdinov M.S., Avrorov S.A., Voskoboynikova G.M., Sedukhina G.F., Yakimenko A.A. Prediction of Environmental Risks from Explosions Based on a Set of Coupled Geophysical Fields // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. Vol. 50, N 4. P. 3-13.
- [4] Khairtdinov M.S., Kovalevsky V.V., Voskoboynikova G.M., Sedukhina G.F. Estimation of meteorodependent geocological risks from explosions by means of seismic vibrators. Seismic technologies. 2016, no. 3, pp. 132-138.
- [5] Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушиной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. 1996, Т.346, №5, С.664-667.
- [6] Заславский Ю.М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2007, 200 с.
- [7] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
- [8] Разин А.В. Распространение звука в неоднородной движущейся атмосфере. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1982, т. 18, № 6, с. 674-676
- [9] Воскобойникова Г.М., Караваев Д.А., Хайретдинов М.С. Численное моделирование распространения акустических волн в системе атмосфера-лесной массив-грунт. Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. Т. 22, № 1(77). С. 24-33.
- [10] Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодвижителей. Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана, 2001, т. 37, № 3, С. 303-312.
- [11] Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 264.
- [12] Макаров М.М., Кучер К.М., Попов О.Е., Асламов И.А., Гранин Н.Г. экспериментальные исследования распространения тонально-импульсных сигналов в воде озера Байкал // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 7. С. 54-60. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12329>.

АЛГОРИТМЫ УТОЧНЕНИЯ МОДЕЛИ ПРИБРЕЖНОГО РЕЛЬЕФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Хмельнов А.Е., Гаченко А.С.

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск

Для определения влияния изменения уровня озера Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий, а также нижнего бьефа Иркутской ГЭС потребовалось получить модель прибрежного рельефа. В результате работы была получена совмещённая модель прибрежного рельефа, по которой были построены зоны затопления. Для решения этой задачи были разработаны и применены оригинальные алгоритмы обработки растровых пространственных данных и триангуляций.

Ключевые слова: прибрежный рельеф, модель береговой линии, триангуляция Делоне, зоны затопления.

ALGORITHMS FOR REFINING A COASTAL TERRAIN MODEL FROM THE RESULTS OF AIRBORNE LASER SCANNING AND AEROPHOTOGRAMMETRIC SURVEY

Hmelnov A.E., Gachenko A.S.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk

To determine the effect of changes in the level of Lake Baikal on the ecosystem of its shallow zone and coastal areas, as well as on the downstream of the Irkutsk HPP, it was required to obtain a model of the coastal terrain. As the result of the work, we have obtained a combined model of the coastal terrain. Using the model, we have built the flood zones in the area. To solve this task we have developed and used original algorithms for processing raster spatial data and triangulations.

Keywords: coastal topography, coastline model, Delaunay triangulation, flood zones.

В настоящее время выполняется комплексная научно-исследовательская работа по обоснованию принципов регулирования уровня озера Байкал при различных условиях водности с учетом современных экологических, социально-экономических и водохозяйственных требований, сопровождаемых мониторингом. В проекте участвуют коллективы нескольких академических институтов из разных регионов страны, включая Иркутскую область и республику Бурятия. В рамках научного проекта проводятся аналитические работы для определения влияния изменения уровня озера Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий. Для выполнения этих работ необходимо иметь комплексные цифровые модели рельефа прибрежных мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня озера Байкал, с выделением отдельных ключевых участков [1,2].

Для обеспечения проекта данными и уточнения рельефа прибрежной территории на ключевых участках проведена цифровая аэрофотосъемка (АФС). АФС проводилась с высоты 100, 153 и 220 метров. Получаемые в результате съёмки изображения позволяют создавать при помощи специализированного лицензионного программного обеспечения (Agisoft Metashape PRO) ортофотопланы и 3D модели рельефа (цифровые модели местности) с точность выше чем 10 см. на пиксель, что приблизительно соответствует масштабу топографического плана М 1:1000. При проведении АФС обеспечивалось продольное и поперечное перекрытие снимков около 70 % для обеспечения качественного построения 3D модели (каждый полет производился отрезками по длине и ширине участка).

В рамках работ были определены населенные пункты и их границы, которые могут быть подвержены затоплению. Разработаны обзорные карты (схемы) исследуемого объекта с нанесением основных территорий (зон), включая расположенные на них населенные пункты/объекты (рис. 1), подверженные рискам колебания уровня Байкала в диапазоне подъема до 460 м

Непосредственное включение таких данных в итоговую модель рельефа, которая, например, для озера Байкал содержит около 5,5 миллионов точек, сильно увеличит её объём и делает неудобным практическое использование. Кроме того, детализация такой модели рельефа будет чрезмерной для рассматриваемой задачи. Например, там заметны пешеходные «островки» на парковке (рис. 2), кучи грунта рядом с котлованом строящегося здания, а также следы фильтрации зданий и других объектов. Построение изолиний непосредственно по такой модели приведёт к тому, что они будут отражать все эти особенности, например, огибать бордюры вокруг «островков». Поэтому была предложена технология обработки облаков точек, позволяющая получить уточнённую модель фрагмента рельефа с заданной точностью.

Для работы с облаками точек были использованы алгоритмы построения триангуляций Делоне и триангуляций Делоне с ограничениями, реализованные в программе TINSmith, разработанной в ИДСТУ СО РАН. После собственно построения триангуляции к ней был применён алгоритм поиска незаполненных треугольников, при работе которого внешние треугольники, имеющие внешнее ребро длиннее заданного порога, последовательно помечаются, как вспомогательные. Такая фильтрация треугольников впоследствии влияет на результаты растеризации: всем точкам, попадающим во вспомогательные треугольники, присваивается значение «нет данных».

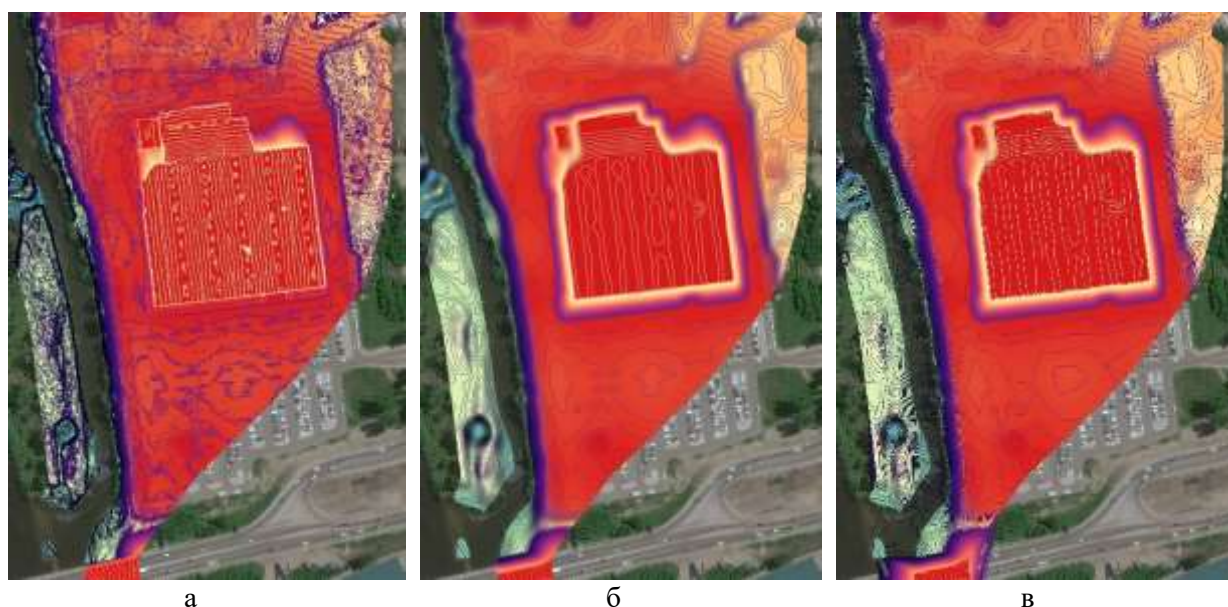


Рис. 3. Изолинии, построенные с шагом 0,1 м по растровой модели (а) до и (б) после сглаживания, а также (в) по упрощённой триангуляции.

Для получения более гладкой модели рельефа была использована растеризация триангуляционной модели с последующим её сглаживанием с использованием гауссовского фильтра. Растеризация выполнялась с шагом 20 см/пиксель. Алгоритм гауссовской фильтрации пришлось доработать, чтобы он корректно игнорировал значения «нет данных». После гауссовской фильтрации разрешение раstra было уменьшено до 1 м/пиксель. Далее непосредственно по сглаженному растру могут быть построены изолинии. На Рис. 3 (б) приведён пример таких изолиний. При этом Рис. 3 (а) наглядно демонстрирует необходимость сглаживания. Такие изолинии позволяют определить, какие объекты будут подвержены затоплению при соответствующем уровне воды. Для озера Байкал и Иркутского водохранилища этот уровень задаётся явно, а для нижнего бьефа требуются расчёты по гидравлической модели, связывающей расходы воды с уровнем на конкретных участках (здесь мы считаем такие фрагменты достаточно малыми, чтобы можно было использовать один уровень воды для всего участка).

Для того, чтобы построить общую уточнённую модель территории, в которую будут включены все отснятые участки, необходимо получить упрощённые модели этих участков. Для этих целей был использован алгоритм построения триангуляции по растру с фильтрацией

точек, который позволяет получить аппроксимацию модели рельефа с заданной точностью. На вход алгоритма подаётся сглаженный растр с разрешением 1 м/пиксель, при обработке которого использовалась точность аппроксимации 5 см. Алгоритм аппроксимации добавляет в триангуляцию точки растра, на которых достигается максимальное отклонение от триангуляции, до тех пор, пока эта величина не станет меньше заданного порога. В результате, например, для конкретного участка упрощённая триангуляция [4] содержит 26467 точек, при этом изначально в модели было 4510582 точки. При использовании упрощённой триангуляции для построения изолиний получается результат, показанный на Рис. 3 (в), который можно сравнить с изолиниями, построенными по сглаженному растру (Рис. 3 (б)). С учётом того, что изолинии идут с шагом 10см, видно, что различия не являются существенными и находятся как раз в пределах 5 см. по вертикали.

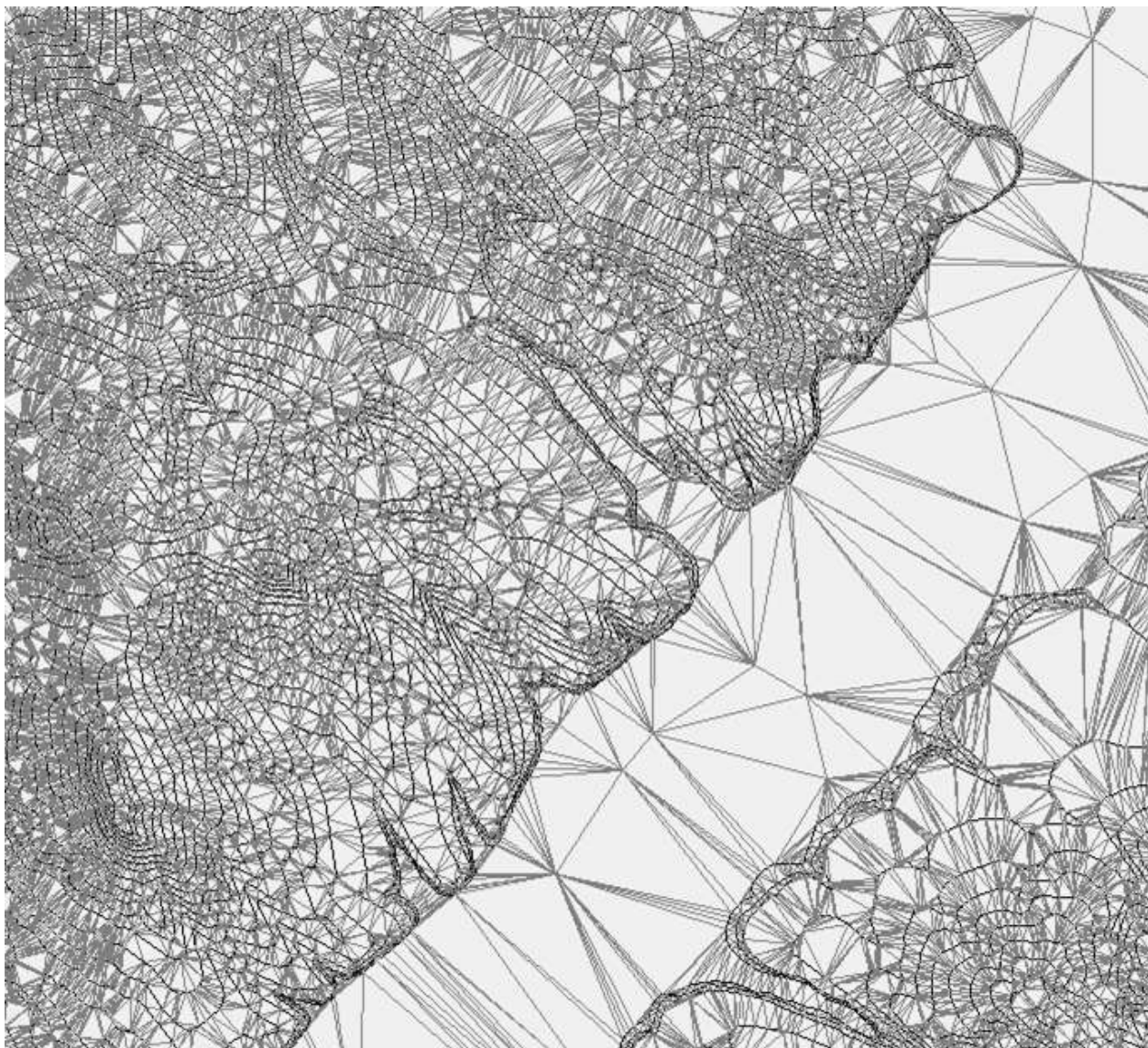


Рис. 4. Фрагмент сформированной триангуляции, содержащей сведения о наземном и подводном рельефе.

Далее был использован алгоритм, позволяющий заменить фрагмент триангуляции на более точный, чтобы включить в априорные модели рельефа все уточнённые фрагменты. Этот алгоритм сначала исключает из целевой триангуляции вершины, попадающие в основные (не вспомогательные) треугольники триангуляции, описывающей уточнённый фрагмент, а затем добавляет туда вершины и жёсткие рёбра из триангуляции для фрагмента. По результирующей модели рельефа могут быть построены изолинии, описывающие затопление любых фрагментов модельной территории.

При фотограмметрической обработке данных АФС так же, как и для данных ВЛС, создаётся плотное облако точек, которое может содержать чрезмерное их количество (сотни миллионов на небольшой участок). Поэтому дополнительно применялось прореживание плотного облака с заданным шагом в программе MetaShare. Так, прореживание облака точек с шагом 0.8м (в 10 раз больше исходной плотности точек) оставляет уже всего несколько миллионов точек. По этим точкам уже можно построить триангуляцию, однако она описывает цифровую модель местности, а не рельефа, т.е. содержит точки, полученные по изображениям домов и деревьев. В используемой фотограмметрической программе Agisoft Metashape реализована классификация точек рельефа по углу наклона треугольников. После применения этого алгоритма с параметрами по умолчанию (15° наклона) остаются в основном точки рельефа. Дальнейшая обработка разреженного и отфильтрованного облака точек выполняется уже рассмотренным для результатов лазерного сканирования способом.

Таким образом удалось построить совмещённую с подводной частью модель прибрежного рельефа озера Байкал, Иркутского водохранилища, и нижнего бьефа Иркутской ГЭС, которая была уточнена по результатам ВЛС и АФС на ряде участков. Полученная модель может использоваться, как для гидравлического моделирования [5,6], так и для непосредственного нахождения зон затопления, которые на водоёмах с постоянным уровнем (озеро и водохранилище), являются её изолиниями.

Для удобства дальнейшего исследования зон затопления реализован алгоритм получения по триангуляции её изолиний для заданного списка уровней в виде площадных объектов, которые и являются зонами затоплений при указанных уровнях. Кроме того, площадные изолинии могут быть построены в разностном режиме, при котором вместо исходных площадных объектов создаются разности между такими объектами для соседних уровней, что позволяет определить, какие области будут дополнительно затоплены при подъёме воды в соответствующем диапазоне уровней.

```
TrgCmd.exe Set -ny ; ImportTextPoints "%~1" "y '/' ' x '/' ' z" ^
  "-PF:.\MSK38_3a.prj" ; HideBig 10 ; Save "%FN%.trg" ; Rasterize "%FN%.tif" ^
  -sx:0.2 -sy:0.2 "-PF:.\CK95.prj"
```

Рис. 5. Пример командной строки для запуска программы TrgCmd.

В ходе построения уточнённой модели рельефа пришлось многократно обрабатывать данные по нескольким десяткам участков. Такие действия невозможно аккуратно выполнить вручную в программе с графическим пользовательским интерфейсом. Поэтому с использованием исходных текстов программы TINSmith была реализована консольная программа TrgCmd, которая может выполнять последовательности команд по обработке триангуляций. На Рис. 5 приведён пример последовательности команд TrgCmd, использовавшейся в командных файлах для массовой обработки облаков точек.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bychkov I., Gachenko A., Rugnikov G., Hmelnov A.* 3-D modeling of Angara river bed // Proc. of the International Conference of Mathematical and Information Technologies. 2016. P. 26-32.
- [2] *Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Rugnikov G.M.* The use of triangulation processing algorithms for the construction of combined model of the underwater and above-water terrain of the bed of the Bratsk Reservoir // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. 2018. Vol. 190 012028.
- [3] Карта реки Ангара (лоция). Иркутск: Изд-во Министерство речного флота, Главводпуть, 1974. 48 с.
- [4] *Скворцов А.В.* Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.
- [5] *Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. P. 418-422. DOI:10.1038/nature20584.
- [6] *Himmelstoss E.A., Farris A.S., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Ergul A., Zhang O., Zichichi J.L., Thieler E.R.* Digital Shoreline Analysis System (version 5.0): U.S. Geological Survey software release, 2018. <https://code.usgs.gov/cch/dsas> (дата обращения 20.05.2022).