



Н* Новосибирский
государственный
университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА



ИВ **П**



**X ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

**ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ,
ПОСВЯЩЁННАЯ ПАМЯТИ АКАДЕМИКА Ю.И. ШОКИНА**

**26 – 29 августа 2025 г.
г. Белокуриха**

Сборник трудов

Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2025) [Электронный ресурс]: Сборник трудов X Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика Ю.И. Шокина (26-29 августа 2025 г., г. Белокуриха). Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2025. 197 с. DOI:10.25743/SDMB.2025.37.25.024.

Сборник трудов подготовлен по результатам работы X Всероссийской конференции с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2025), посвященной памяти академика Ю.И. Шокина. Конференция проходила в г. Белокурихе Алтайского края на базе санатория «Сибирь» с 26 по 29 августа 2025 г. В сборнике представлены результаты исследований по четырем направлениям: 1) интегрированные геоинформационные технологии и системы в задачах мониторинга; 2) оперативный региональный спутниковый мониторинг окружающей среды; 3) моделирование и мониторинг экологических и техногенных процессов и систем; 4) 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:

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

Заместители председателя:

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

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

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

Члены программного комитета:

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

Жумагулов Б.Т. академик НАН Республики Казахстан

Зиновьев А.Т. д.т.н., Институт водных и экологических проблем СО РАН

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

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

Медведев С.Б. д.ф.-м.н., Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Москвичев В.В. д.т.н., проф., Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий

Потапов В.П. д.т.н., проф., Кемеровский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий

Резник А.Л. д.т.н., проф., Институт автоматизации и электрометрии 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. академик РАН, Вычислительный центр ДВО РАН

Сойфер В.А. академик РАН, проф., Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева

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

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

Турчановский И.Ю. к.т.н., Томский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий

Фаворская М.Н. д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева

Федорук М.П. академик РАН, Новосибирский государственный университет

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

Чимитдоржиев Т.Н. д.т.н., Институт физического материаловедения СО РАН

Шайдуров В.В. академик РАН, Институт вычислительного моделирования СО РАН

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Цифровизация сельскохозяйственного производства: парадигма информационного обеспечения <i>Альт В.В., Исакова С.П., Солошенко А.А.</i>	7
Классификация растительности и искусственных объектов по гиперспектральным изображениям реальных сцен <i>Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Орлов С.И., Потатуркин О.И., Узилов С.Б.</i>	11
Информационно-аналитическое обеспечение природно-техногенной безопасности регионов Сибири <i>Москвичев В.В.</i>	14
Спутниковый мониторинг поверхностного слоя озера Байкал: оценка ключевых параметров и анализ трендов <i>Пестунов И.А., Мамаш Е.А., Журнов А.А., Дубровская О.А., Бельский А.С., Синяевский Ю.Н., Шабальников И.В., Иргит А.А., Мазяр А.Н.</i>	18
Разработка и применение новой информационной технологии регионального мониторинга фитоценозов с использованием данных дистанционного зондирования Земли <i>Сергеев В.В., Баврина А.Ю., Кавеленова Л.М., Федосеев В.А., Богданова Я.А., Рязанова Я.А.</i>	24
Разработка прогнозно-поисковых технологий выделения рудоперспективных техно объектов с применением искусственного интеллекта <i>Темирбеков Н.М., Касенов С.Е., Темирбеков А.Н., Тамабай Д.О.</i>	28
Информационно-аналитическое обеспечение региональных систем мониторинга природной среды <i>Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В.</i>	32

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Распознавание и сегментация крон отдельных деревьев по БПЛА изображениям с использованием регионально-сверточных нейронных сетей <i>Аникин А.В., Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Соколов А.А.</i>	37
К вопросу о разработке нового поколения медицинских информационных систем для регионов с активными лесными пожарами <i>Барановский Н.В.</i>	44
Исследование сажеобразования и фрагментации углеродистой частицы при ее выносе из фронта лесного пожара для целей экологического мониторинга <i>Барановский Н.В., Вяткина В.А.</i>	46
Технология потоковой оценки высоты верхней границы облачности по стереопарам различных космических аппаратов <i>Бриль А.А., Бурцев М.А., Волкова Е.Е., Луян Е.А.</i>	48
Нейросетевая модель временных рядов для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска <i>Володько О.С., Лев Н.А., Полянчикова Д.В.</i>	51
Динамика снежного покрова по Новосибирской области по данным дистанционного зондирования <i>Воронина П.В.</i>	54

Построение распределенных моделей машинного обучения на основе пространственных данных <i>Воронкин Е.Ю., Кикин П.М., Колесников А.А., Шарыпаев П.С.</i>	58
Методы интеграции экологических данных при использовании географических эмбедингов в вопрос-ответной информационной системе <i>Гавенко О.Ю., Шашок Н.А.</i>	60
Применение методов компьютерного зрения и автоматической кластеризации для построения маски облачности в ИК-диапазоне <i>Голомолзин В.В., Чурсин В.В., Пермяков Е.В.</i>	63
ИВС Углерод как прототип инструмента анализа пулов и потоков углерода в лесных и болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири <i>Гордов Е.П., Турчановский И.Ю., Ахлестин А.Ю., Богомоллов В.Ю., Генина Е.Ю., Гордова Ю.Е., Рязанова А.А., Титов А.Г.</i>	67
Автоматизация обработки пространственных данных для получения температуры поверхности Земли <i>Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э.</i>	71
Применение методов глубокого обучения для классификации ландшафтов на примере мультиспектральных данных космической съемки <i>Григорьева О.В., Спесивцева К.А., Терентьева В.В.</i>	75
Подход к интеграции модулей обработки и визуализации пространственных данных в клиентских веб-системах <i>Дергунов А.В., Малимонов М.И., Токарев А.В., Якубайлик О.Э.</i>	82
Цифровой атлас для мониторинга и анализа состояния Черного моря <i>Захарова Н.Б., Пармузин Е.И.</i>	85
Системы, методы и технологии регионального геофизического мониторинга для оценки геодинамической и геоэкологической опасности <i>Кабанов А.А., Москвичев В.В., Симонов К.В.</i>	87
Прогнозирование урожайности яровых зерновых культур на юге Западной Сибири с использованием данных спектрометра TROPOMI <i>Карамзина А.Е., Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А.</i>	91
Динамика пространственного распределения биооптических характеристик Обской Губы по данным спутниковых измерений <i>Кириллов В.В., Ковалевская Н.М., Худяков Н.В., Рыбкина И.Д.</i>	95
Аналитика развития и применения геоинформационных технологий до 2035 года на основе зарубежных источников информации <i>Клименко О.А.</i>	100
Использование больших языковых моделей для автоматизации координирования объектов травелогов <i>Колесников А.А., Жданов С.С.</i>	102
Измерение углового положения объекта в многоканальной радиотехнической системе <i>Костюлин М.Э., Морозов Ю.В., Мурасев А.А., Спектор А.А.</i>	105
Применение нейросети для обнаружения малоразмерных объектов в изображениях с пространственно-нестационарным фоном <i>Косых В.П., Громилин Г.И., Потатуркин О.И., Яковенко Н.С.</i>	109
Информационно-вычислительная система для оценки потоков парниковых газов по спутниковым данным <i>Котлер В.Д., Платонова М.В., Климова Е.Г.</i>	113

Автоматизированный мониторинг площадей водных объектов по спутниковым снимкам <i>Лапушинский А.С., Рылов С.А.</i>	115
Проблемы интеграции данных дистанционного зондирования Земли с цифровой платформой управления сельскохозяйственным производством <i>Меденников В.И.</i>	118
Применение глубоких нейронных сетей для компенсации артефактов тумана и дымки <i>Наталенко Д.Н., Фаворская М.Н.</i>	122
Разработка подхода к ранжированию техногенно нарушенных участков и оценка возможности включения их в градостроительный оборот <i>Немова Н.А., Колесников А.А.</i>	126
Метод информационной поддержки решения сложных задач управления безопасностью территорий <i>Ничепорчук В.В., Чернякова Н.А.</i>	129
Особенности использования трёхцветных колориметров для количественной оценки малых цветовых различий <i>Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С.</i>	134
Космический мониторинг состояния посевов юга Западной Сибири <i>Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю., Чурсин В.В.</i>	140
Гибридный алгоритм автоматического подсчета растений кукурузы по RGB-изображениям с БПЛА на основе комбинации методов компьютерного зрения и машинного обучения <i>Пестунов И.А., Калашиников Р.А., Овчарова Н.В.</i>	143
Система усвоения данных для оценки эмиссии парниковых газов на основе спутниковых данных и глобальной транспортной модели <i>Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.</i>	147
Дистанционный мониторинг энергетических характеристик природных пожаров и послепожарных эффектов в Сибири <i>Пономарёв Е.И.</i>	149
Методы спутникового мониторинга в исследовании состояния экосистем криолитозоны <i>Пономарёва Т. В., Пономарёв Е.И., Сыроежко М.Ю.</i>	152
Комплексный подход прогнозирования территориальных рисков арктической зоны Красноярского края <i>Постникова У.С.</i>	154
Мониторинг изменений психофизиологического состояния мигрантов в регион Севера методами моторного контроля и машинного обучения <i>Потапова А.С., Будников К.И., Савостьянов А.Н., Карпова А.Г.</i>	157
Веб-ориентированная система учета и представления данных аэрофотосъемки БПЛА <i>Пушкарев А.А., Якубайлик О.Э.</i>	161
Технологии метеорологического обеспечения проведения экспериментов и обработки результатов астрофизической обсерватории TAIGA <i>Ревякин А.И., Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А.</i>	164
Технические решения по автоматизации мониторинга техногенно нарушенных земель <i>Резник А.В., Колесников А.А., Белослудцева А.А.</i>	169
Разработка высокоскоростных программных алгоритмов для выявления локальных аномалий в наблюдаемых точечных изображениях <i>Резник А.Л., Потатуркин О.И., Соловьев А.А.</i>	172

Использование методов машинного обучения для оценки распаханности участков личных подсобных хозяйств по данным мультиспектральных спутниковых снимков <i>Сабаев А.А., Понькина Е.В.</i>	175
О связи квазидвухлетних колебаний и вариаций озона во время существования Антарктической озоновой аномалии <i>Серебренникова Л.М., Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Симонов К.В.</i>	177
Обработка метеорологических данных в составе центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» для использования в спутниковых информационных системах <i>Уваров И.А.</i>	181
Формирование композиций сервисов с учетом предпочтений пользователей <i>Фёдоров Р.К., Климонов М.С.</i>	184
Использование контуров береговых линий со спутниковых изображений Sentinel-2 для построения моделей прибрежного рельефа <i>Хмельнов А.Е., Хмельнова Т.Ф.</i>	187
Спектральные характеристики посадок монокультур лесобразующих древостоев Сибири по данным съемок со спутниковых и беспилотных систем <i>Якимов Н.Д., Дергунов А.С., Краснощеков К.В., Пономарёв Е.И.</i>	191
Структурный анализ сельскохозяйственных угодий и построение моделей урожайности кукурузы на основе значений твердости почвы <i>Яковлев Д.А., Пошивайло Я.Г., Иванов Н.М., Колесников А.А.</i>	195

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ЦИФРОВИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА: ПАРАДИГМА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Альт В.В.^{1,2}, Исакова С.П.¹, Солошенко А.А.¹

¹ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В статье рассматривается актуальность и необходимость цифровизации аграрного производства, для повышения эффективности и оптимизации управленческих решений. Подчеркивается, что традиционные методы сбора и анализа данных становятся недостаточными, и требуется переход к использованию больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. Предлагается парадигма информационного обеспечения цифровизированного сельского хозяйства, охватывающая сбор, хранение, обработку и анализ данных с использованием различных систем и технологий, для получения аналитических и прогностических результатов.

Ключевые слова: цифровизация аграрного производства, парадигма, система хранения данных, информационная система, экспертная система, система искусственного интеллекта.

DIGITALIZATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION: A PARADIGM OF INFORMATION SUPPORT

Alt V.V.^{1,2}, Isakova S.P.¹, Soloshenko A.A.¹

¹ Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technology of the RAS, Krasnoobsk

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The article examines the relevance and necessity of digitalization of agricultural production in order to increase efficiency and optimize management decisions. It is emphasized that traditional methods of data collection and analysis are becoming insufficient, and a transition to the use of big data, machine learning and artificial intelligence is required. A paradigm of information support for digitalized agriculture is proposed, covering the collection, storage, processing and analysis of data using various systems and technologies to obtain analytical and predictive results.

Keywords: digitalization of agricultural production, paradigm, data storage system, information system, expert system, artificial intelligence system.

В настоящее время цифровые инновационные технологии играют роль ускоренной модернизации во всех сферах человеческой деятельности, за счет применения передовых вычислительных систем и программного обеспечения. Аграрное производство также не является исключением [1,2]. Однако, в данный момент нет единого мнения относительно значимости информационного и цифрового сопровождения, оптимальных методов применения программно-аппаратных средств, приоритетности развития различных аспектов и последовательности их внедрения. Остается открытым вопрос и об экономической оправданности инвестиций в цифровизацию для каждого отдельного сельскохозяйственного предприятия.

Модернизация аграрного производства, базирующаяся на актуальных постоянно совершенствующихся научных достижениях и интеграции цифровых технологий [3,4], является ключевым фактором его развития. Важным аспектом при этом выступает разработка эффективных инструментов и платформ для внедрения инноваций в сельскохозяйственное производство, включая нейросети, применение интернет вещей и беспилотных систем [5,6].

Внедрение цифровых технологий представляет собой не просто техническую модернизацию, но и глубокую трансформацию познавательных процессов, лежащих в основе принятия управленческих решений. В этих условиях, традиционные методы сбора, обработки и анализа данных становятся недостаточными. Необходим переход к новым моделям, основанным на использовании больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти технологии позволяют не только автоматизировать рутинные процессы, но и выявлять скрытые закономерности, прогнозировать урожайность, оптимизировать логистику и принимать обоснованные решения на основе анализа огромных объемов информации [7,8].

Аграрное производство, в частности растениеводство, характеризуется рядом специфических особенностей: воздействие многочисленных факторов на производственные и технологические процессы, зависимость продуктивности от агроклиматических условий, широкий спектр видов сельскохозяйственных культур. Агропроизводство разворачивается в обстановке дефицита информации, необходимой для принятия обоснованных управленческих решений. Это обусловлено многофункциональным характером управления в сельском хозяйстве.

Среди факторов, влияющих на производство продукции растениеводства, можно выделить следующие: окружающая среда, земельные ресурсы, разнообразие растений, техническая оснащенность и социальный фактор. Все эти элементы находятся в тесной взаимосвязи. Цифровизация способна оптимизировать использование ресурсов, и в этой области можно выделить ряд перспективных направлений [2]:

- обнаружение болезней, сорняков и вредителей посредством анализа изображений, полученных с БПЛА с применением искусственного интеллекта;
- прогнозирование погодных условий путем сбора, обработки и анализа данных с локальных метеостанций и архивных статистических данных;
- внедрение точного земледелия с использованием GPS, БПЛА, цифрового картографирования и оценки почвенного состава;
- целевое внесение удобрений и средств защиты растений на основе анализа данных, полученных в результате аэрофотосъемки;
- мониторинг развития растений с помощью БПЛА, расчет вегетационных индексов, контроль качества продукции и прогнозирование объема урожая;
- управление производственными процессами с использованием специализированных информационных систем, предоставляющих инструменты для экономических расчетов, ведения истории полей и документооборота.

Современный этап внедрения цифровых технологий в аграрное производство требует разработки теоретических основ для их применения. Это предполагает анализ типов и объемов информации, а также пересмотр подходов к информационному обеспечению сельскохозяйственного производства.

Важным аспектом является и изменение самой парадигмы информационного обеспечения. Если ранее информация рассматривалась как статический ресурс, то сейчас она приобретает динамический характер. Данные постоянно обновляются, поступают из различных источников (датчики, дроны, спутники) и требуют непрерывной обработки и анализа. В связи с этим, необходимо разрабатывать гибкие и адаптивные системы, способные оперативно реагировать на изменения в окружающей среде и потребности сельскохозяйственного производства.

В ходе исследований, нами предложена парадигма информационного обеспечения цифровизированного аграрного производства [9]. Парадигма как научная система взглядов на решение задач на современном этапе развития сельскохозяйственного производства охватывает весь комплекс информационного обеспечения от приборов до систем искусственного интеллекта и показывает гносеологическую общность всего разнообразия инструментария, включая и программное обеспечение (Рисунок 1).

Исходной точкой парадигмы цифровизации аграрного производства является Объект (например, рабочий участок, растение, животное, и т.д.) со своими показателями и параметрами. О данном объекте можно получить различные данные с помощью эвристики, различных информационно вычислительных комплексов (ИВК), а также знаний экспертов.

Поток информации от источников данных направляется в Систему хранения данных в виде Баз Данных, Баз Знаний и BigData, где осуществляется его классификация, фильтрация и структурирование. Этот процесс преобразования сырых данных в организованные и доступные для анализа массивы является краеугольным камнем современной аналитики и принятия решений:

- Базы Данных, с их реляционной структурой, идеально подходят для хранения транзакционных данных и обеспечения целостности информации;

- Базы Знаний, фокусируются на представлении фактов, правил и эвристик, обеспечивая контекст и логические связи между данными;
- Big Data системы, справляются с огромными объемами неструктурированных данных, используя параллельную обработку и распределенные вычисления.

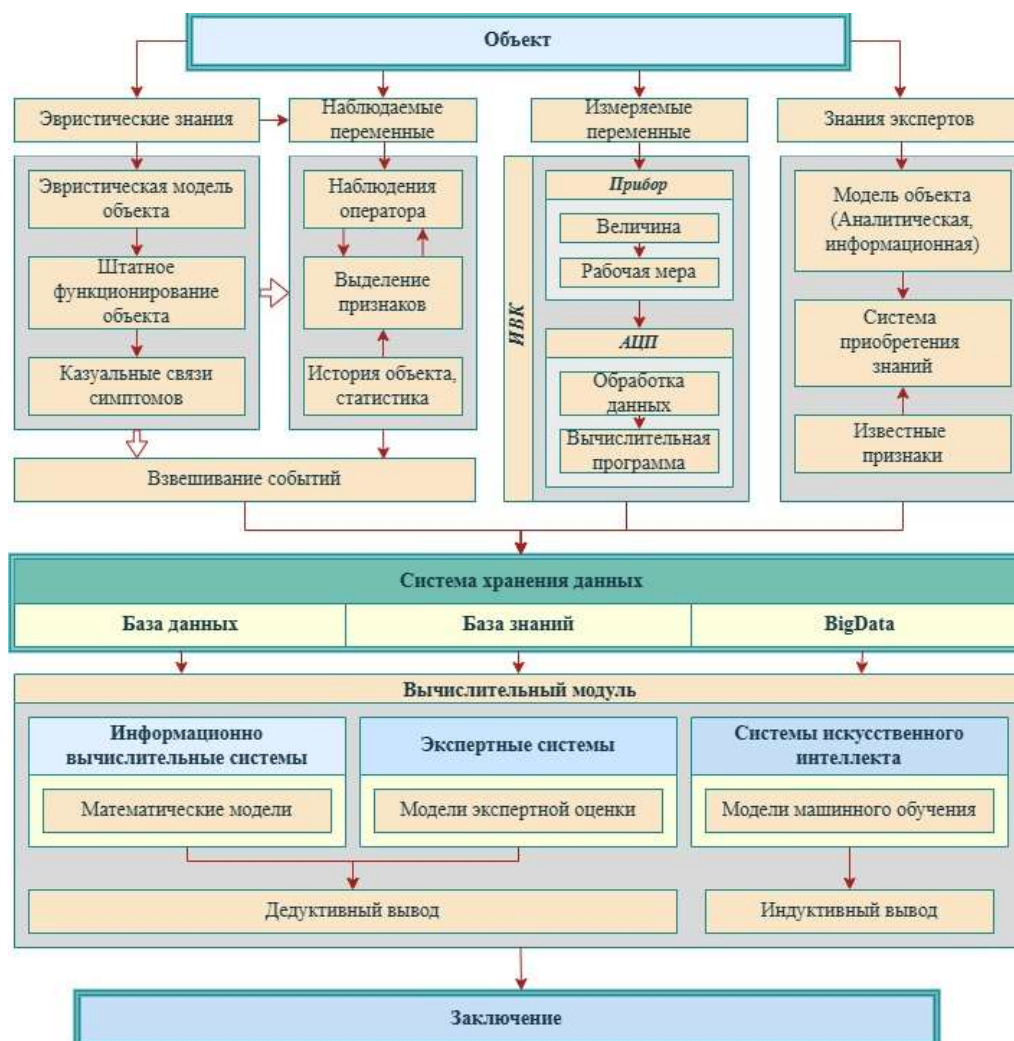


Рис. 1. Парадигма цифровизации аграрного производства и его технологических процессов в решениях сельскохозяйственной науки (гносеологические положения).

Данные из системы хранения данных поступают в **Вычислительный модуль**, где используются для непосредственной работы с информационными системами, обучения моделей и экспертной оценки.

Вычислительный модуль состоит из трёх подсистем, которые могут работать как самостоятельно, так и комплексно:

- **Информационные системы:** готовые решения, в которых реализуются различные подходы математического моделирования (линейное, нелинейное, динамическое, стохастическое и др.), а также методы теории игр и эвристические алгоритмы.
- **Экспертные системы:** включают модуль экспертной оценки, основанный на различных подходах (правило-ориентированные, нечеткие, фреймовые, кейс-ориентированные, онтологические и гибридные системы), в результате работы которых вся экспертная информация сохраняется в базу знаний.
- **Системы машинного обучения:** включают модуль машинного обучения, где данные разделяются на обучающую и тестовую выборки. Используются различные алгоритмы (метод опорных векторов, случайный лес, кластерный анализ, нейронные сети и др.), каждый из которых имеет свои преимущества и подходит для определённых ситуаций,

проводится ансамблирование моделей, их валидация и оценка качества. Результаты работы информационных и экспертных систем основываются на дедуктивном выводе, тогда как системы искусственного интеллекта – на индуктивном.

Данные, полученные в результате работы вычислительного модуля, интегрируются для формирования более точных выходных данных.

Таким образом, на схеме показан сквозной поток информации от сбора и первичной обработки данных до получения аналитических и прогностических результатов.

Заключение.

1. Сформированная парадигма позволяет объединить в единое информационное пространство эвристические знания, знания экспертов, наблюдаемые переменные и измеряемые величины и сформировать из них поток данных для систем хранения и обработки данных. Полученный поток данных поступает в базы данных, базы знаний и Big Data для их дальнейшего использования в вычислительном модуле, в котором реализованы информационно-вычислительные системы, экспертные системы и системы искусственного интеллекта. В результате обработки информации в вычислительном модуле формируются массивы для дедуктивных и индуктивных выводов.
2. На основе полученной парадигмы могут быть сформированы системы в виде отдельных информационных, экспертных систем и систем искусственного интеллекта, решающие частные задачи в сельскохозяйственной науке.
3. Данная парадигма показывает возможное объединение информационно-вычислительных систем, экспертных систем и систем искусственного интеллекта в виде единой интеллектуально-вычислительной платформы с возможностью интеллектуального анализа данных и прогнозирования результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Nersisyan K.A., Markosyan A.K., Mirzoyan Z.M.* Ways to improve the agricultural digitization process // *Bulletin of High Technology*. 2023. No. 3(27). P. 76-88. DOI:10.56243/18294898-2023.3-76.
- [2] *Филатов А.А., Семенова И.М.* Проблемы цифровизации сельского хозяйства // *Материалы XXI Всероссийской научно-практической интернет-конференции «Электронный бизнес: проблемы, развитие и перспективы»*. Воронеж: «Истоки», 2024. P. 284-286.
- [3] *Rose D.C., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers C.-A.* Agriculture 4.0: making it work for people, production, and the planet // *Land Use Policy*. 2021. No. 100. Art. No. 104933. DOI:10.1016/j.landusepol.2020.104933.
- [4] *Sharma R., Parhi S., Shishodia A.* Industry 4.0 applications in agriculture: cyber-physical agricultural systems (CPASs) // *Advances in Mechanical Engineering. Select Proceedings of ICAME 2020*. 2020. P. 807-813. DOI:10.1071/978-981-15-3639-7_97.
- [5] *Hovhannisyan T., Efendyan P., Vardanyan M.* Creation of a digital model of fields with application of DJI phantom 3 drone and the opportunities of its utilization in agriculture // *Annals of Agrarian Science*. 2018. Vol. 16, No. 2. P. 177-180. DOI:10.1016/j.aasci.2018.03.006.
- [6] *Phillips P.W.B., Relf-Eckstein J.-A., Jobe G., Wixted B.* Configuring the new digital landscape in Western Canadian agriculture // *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019. Vol. 90. Art. No. 100295. DOI:10.1016/j.njas.2019.04.001.
- [7] *Dos Santos U.J.L., Pessin G., da Costa C.A., da Rosa Righi R.* AgriPrediction: a proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. No. 161. P. 202-213. DOI:10.1016/j.compag.2018.10.010.
- [8] *Jones J.W., Antle J.M., Basso B. et al.* Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: state of agricultural systems science // *Agricultural Systems*. 2017. No. 155. P. 269-288. DOI:10.1016/j.agsy.2016.09.021.
- [9] *Альт В.В., Чекусов М.С., Исакова С.П., Балушкина Е.А.* Гносеологические основы использования цифровых технологий в сельском хозяйстве Сибири // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 1. С. 16-23. DOI:10.22314/2073-7599-2021-15-1-16-23.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ИСКУССТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ РЕАЛЬНЫХ СЦЕН

Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Орлов С.И., Потатуркин О.И., Узилов С.Б.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Выполнена классификация природных и антропогенных объектов 5 классов (деревья, кусты, почва, трава и маскировочная сеть) на реальном гиперспектральном изображении. Экспериментально полученная общая точность классификации по всем спектральным признакам отдельно по 5 классам достигает 99.75% а по двум классам (природные и искусственные объекты), когда оценивается эффективность выделения маскировочной сети от растительности и почвы, составляет 99.986%.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, обработка данных, растительность, искусственные объекты, спектральные признаки, методы классификации.

CLASSIFICATION OF VEGETATION AND ARTIFICIAL OBJECTS BASED ON HYPERSPECTRAL IMAGES OF REAL SCENES

Borzov S.M., Nezhevenko E.S., Orlov S.I., Potaturkin O.I., Uzilov S.B.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

A classification of natural and anthropogenic objects of 5 classes (trees, bushes, soil, grass and camouflage net) was performed on a real hyperspectral image. The experimentally obtained overall classification accuracy for all spectral features separately for 5 classes reaches 99.75%, and for two classes (natural and artificial objects), when the efficiency of separating the camouflage net from vegetation and soil is assessed, it is 99.986%.

Keywords: hyperspectral images, data processing, vegetation, artificial objects, spectral features, classification methods.

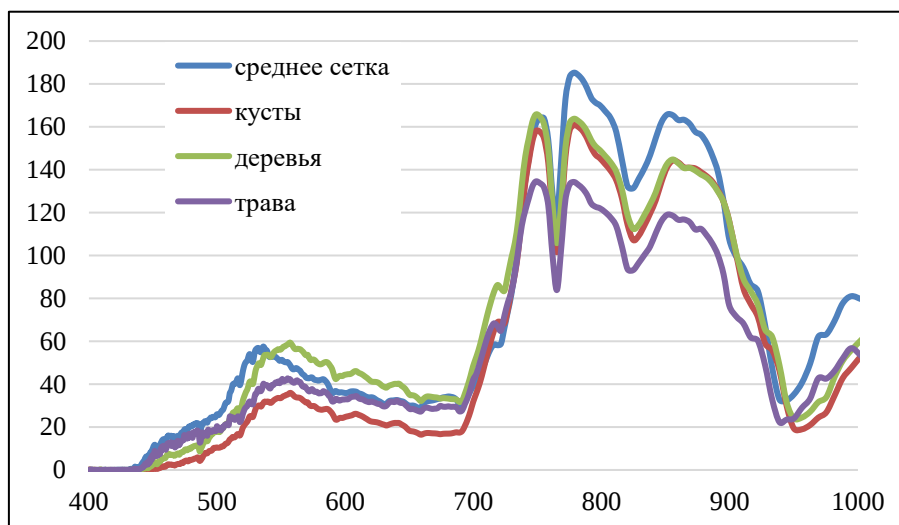
Методы и программно-алгоритмические средства обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно развиваются многие годы [1,2]. В последнее время возник значительный интерес к гиперспектральной видеосъемке реальных сцен на поверхности Земли. Это накладывает определенную специфику на формирование гиперспектральных изображений (ГСИ) и, как следствие, на их обработку [3,4]. Работа ориентирована на обработку данных реального ГСИ, на котором представлено несколько типов естественной поверхности (деревья, кусты, почва, трава) и искусственные объекты, включая маскировочную сеть МКТ-2Л. Ее цель состоит в определении наиболее эффективных методов классификации природных и антропогенных объектов как с точки зрения индивидуального разделения на классы, так и с точки зрения выделения маскировочных покрытий на фоне зелёной растительности.

Обрабатываемое ГСИ имеет размерность 928×488 пикселей в 454 спектральных каналах в диапазоне от 400 до 1000 нм. В первую очередь интерес представляет сравнение спектральных особенностей различных регионов зеленой растительности и сети, предназначенной для маскировки антропогенных объектов на ее фоне. На рисунке приведены усредненные по регионам спектры объектов от длины волны каналов.

Видно, что спектры близки друг к другу. При этом, максимум спектральной кривой сети в видимом диапазоне по сравнению с максимумом растительности смещен в более коротковолновую зону (534 нм, 554 нм), а в ближнем ИК диапазоне, наоборот, в длинноволновую зону. Другой особенностью, позволяющей на данном ГСИ выделять маскировочную сеть, является соотношение пиков спектров в ближней ИК диапазоне (746-752 нм) и (775-785 нм). Для всех типов растительности их соотношение практически одинаково, тогда как для сети второй пик существенно выше относительно первого.

Процедура обработки ГСИ состоит из обучения и собственно классификации, т.е. отнесения пикселей к наиболее близкому классу. На первом этапе в многомерном пространстве

признаков на основе анализа обучающих выборок определяются кластеры, в которых наиболее часто встречаются пиксели каждого из классов. На втором – рассчитывается мера близости остальных пикселей ГСИ к каждому из образованных кластеров и определяется ближайший.



Усредненные по регионам спектры растительности и маскировочной сети от длины волны.

На практике для обработки ГСИ часто применяются эмпирические методы, направленные на уменьшение объема входных данных. К ним в первую очередь относятся вегетационные индексы NDVI и TCHVI, которые могут быть использованы при разработке алгоритмов обработки ГСИ, ориентированных на выделение искусственных объектов на естественном фоне при проведении наблюдения за контролируемой территорией. Однако, исследования показали, что они не всегда позволяют решать поставленную задачу [5].

Количественная оценка эффективности систем признаков проведена для 5 регионов различных классов, выделенных на обрабатываемом ГСИ: деревья, кусты, трава, почва, сеть (классы 1-5). Классификация выполнялась методом опорных векторов и методом максимального правдоподобия для различных систем признаков. Ее точность оценивалась по разделению на пять классов и по эффективности выделения маскировочной сети на природном фоне (т.е. по разделению на два класса). В качестве основного использовался показатель «Общая точность» (Overall Accuracy, OAcc), равный доле правильно классифицированных пикселей к их общему количеству. В качестве дополнительного критерия применялся показатель «Точность производителя» (Producer's Accuracy, PAcc), для вычисления которого необходимо разделить количество правильно классифицированных пикселей этого класса на общее в нем количество пикселей.

На основе анализа обучающей выборки (набора пикселей известных классов) необходимо из N спектральных каналов выделить наиболее информативную подсистему, состоящую из n каналов ($n < N$). При небольшом N это может быть выполнено простым полным перебором. Однако рост числа признаков ведет к существенному увеличению вычислительных затрат, что важно при разработке систем с настраиваемыми фильтрами. Для сокращения количества признаков применялся метод главных компонент (ГК).

В таблице приведена результирующая матрица ошибок классификации методом SVM для 5 указанных регионов при использовании системы признаков по данным всех спектральных каналов, где в каждом столбце указано количество пикселей класса с номером столбца, отнесенных к классу, соответствующему номеру строки.

Общая точность классификации ГСИ по 5 классам составила $OAcc = 23912/23972 = 99.75\%$. При этом, если оценивать эффективность выделения маскировочной сети от растительности, т.е. не учитывать ошибки, связанные с отнесением пикселя определенного класса фона к другим классам фона, и выполнять классификацию только по двум классам (фон и маскировочная сеть), $PAcc = 14583/14585 = 99.986\%$.

Матрица ошибок классификации методом SVM.

Классы установленные	Классы истинные				
	1	2	3	4	5
1 (лес)	2477	13	0	0	0
2 (кусты)	15	4177	0	16	0
3 (травы)	0	0	1365	0	2
4 (почва)	4	10	0	1310	0
5 (сетка)	0	0	0	0	14583

Аналогично определены матрицы ошибок классификации для 5 указанных регионов при использовании систем признаков из 20, 10, 5, 3 и 2 главных компонент. Классификация выполнялась методом опорных векторов SVM. Общая точность классификации ГСИ по 5 классам ОАсс составила $23929/23972 = 99.82$, $23825/23972 = 99.39$, $3246/23972 = 96.97$, $22550/23972 = 94.07$ и $18117/23972 = 75.58\%$ соответственно. Показано, что три ГК позволяют решить задачу с достаточно высокой точностью 94%, меньшего количества для большинства практических применений недостаточно, а большее скорее всего избыточно, учитывая возрастающую сложность вычислений.

Исследованы методы выбора информативных систем признаков. Объединение каналов в полосах фиксированной ширины по 10, 20, 30 и 40 нм обеспечило точность классификации по трем признакам 92.79, 94.99 92.97 и 92.97% соответственно. Показано, что точность мало зависит от ширины полосы каналов до 70 нм.

Таким образом, предложена и программно реализована методика обработки совокупности гиперспектральных данных с целью формирования представительной системы признаков и последующего применения адаптивных алгоритмов обнаружения объектов интереса на основе поиска спектральных аномалий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Сойфер В.А.* Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли: монография. Самара: Новая техника, 2015. 256 с.
- [2] *Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. №1. С. 4-16.
- [3] *Котляр П.Е., Потатуркин О.И.* Современные методы и системы формирования гиперспектральных изображений // Автометрия. 2024. Т. 60, № 3. С. 55-73. DOI:10.15372/AUT20240306.
- [4] *Кузнецов А.Ю., Сергеев С.С.* Анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия с применением видеоспектрометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 2. С. 258-264.
- [5] *Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Орлов С.И., Потатуркин О.И., Узилов С.Б.* Экспериментальные исследования эффективности классификации материалов по их спектрам отражения. // Автометрия. 2024. Т. 60, № 5. С. 69-76. DOI:10.15372/AUT20240508.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНОВ СИБИРИ

Москвичев В.В.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск

Отмечена роль академика Ю.И. Шокина в организации в Сибирском отделении РАН исследований в области природно-техногенной безопасности регионов Сибири. Представлены этапы и результаты исследований по трем направлениям: информационные технологии и системы территориального управления рисками и безопасностью; математическое моделирование безопасности технических систем; разработка систем управления, мониторинга и экспертизы безопасности объектов критической инфраструктуры.

Ключевые слова: информационная аналитика безопасности, информационные технологии, моделирование, риски развития, безопасность регионов Сибири.

INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF NATURAL AND TECHNOGENIC SECURITY OF THE REGIONS OF SIBERIA

Moskvichev V.V.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk

The role of Academician Yu.I. Shokin in organizing research in the field of natural and man-made safety of Siberian regions at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences is noted. The stages and results of research in three areas are presented: information technologies and systems of territorial risk and safety management; mathematical modeling of technical system safety; development of control, monitoring and safety expertise systems for critical infrastructure facilities.

Keywords: information security analytics, information technologies, modeling, development risks, security of Siberian regions.

Исследования в области природно-техногенной безопасности регионов Сибири в значительной степени инициированы академиком Ю.И. Шокиным в период начала 1990-х годов в рамках целого ряда всероссийских конференций, тематика которых охватывала широкий спектр актуальных вопросов [1]:

- развитие математических методов для приложений в задачах моделирования природных и антропогенных катастроф;
- компьютерное моделирование чрезвычайных ситуаций (ЧС) и системы поддержки принятия решений;
- математические методы, методология и технологии прогнозирования рисков ЧС природного и техногенного происхождения;
- математическое моделирование прочности, ресурса, безопасности и аварийных ситуаций технических систем;
- технологии и средства мониторинга и прогнозирования ЧС;
- оценка уровня техногенного и экологического риска территорий и территориальные автоматизированные информационно-управляющие системы в области прогнозирования и ликвидации ЧС.

Особо следует отметить его научно-организационную деятельность в развитии исследований по таким направлениям, как мониторинг природной среды и техносферы, анализ рисков, экологической и техногенной безопасности территорий Сибири.

Совместно с Ю.И. Шокиным выполнен ряд научных проектов, проведены научно организационные решения и мероприятия, получен ряд новых результатов:

- создан отдел машиноведения в структуре Вычислительного центра СО АН СССР в г. Красноярске с целью развития расчетно-экспериментальных методов механики деформирования и разрушения, широкого внедрения компьютерных технологий и развития

вычислительных методов как основы автоматизированного проектирования и моделирования при создании технических систем различного назначения;

- реализован ряд междисциплинарных и интеграционных проектов СО РАН и программ совместных исследований с НАН Беларуси в области природно-техногенной безопасности регионов Сибири и Республики Беларусь [2];
- выполнены технологические и информационно-аналитические работы в рамках научно-технических программ СО РАН «ГИС и Интернет», «Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН»;
- разработаны информационные системы и приложения цифровых технологий для решения задач мониторинга состояния техносферы и природной среды, организации системы управления антропогенными, экологическими и территориальными рисками социально-экономического развития;
- представлены совместные доклады на международных конференциях в очном формате (США, Япония, Китай, Германия, Болгария, Сербия, Тайвань). Организованы и проведены 18 Всероссийских конференций по проблемам природно-техногенной безопасности, моделированию антропогенных катастроф и безопасности технических систем;
- реализован издательский проект «Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем» под редакцией Махутова Н.А., Москвичева В.В., Шокина Ю.И. с изданием 11 томов в период 2001-2023 гг., посвященных расчетно-экспериментальному обоснованию проблем проектирования, производства, эксплуатации, экспертизы и безопасности технических систем [3];
- осуществлена совместная подготовка (академик Бычков И.В., профессор Москвичев В.В., академик Шокин Ю.И.) и издание в 2024 г. двух томов многотомного издания «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты» в рамках тематического блока «Региональные проблемы безопасности», посвященных безопасности Сибирского федерального округа (СФО) [4,5].

Результаты проведенных исследований составили содержательную часть доклада:

- Национальные и региональные приоритеты в информационном обеспечении безопасности. Социально-природно-техногенная система.
- Информационные технологии и системы территориального управления рисками и безопасностью. Сибирский федеральный округ.
- Математическое и физическое моделирование безопасности технических систем.
- Разработка систем управления, ПАК и АРМ мониторинга и экспертизы безопасности элементов и объектов критической инфраструктуры.

Ниже представлены основные этапы информационного обеспечения природно-техногенной безопасности регионов Сибири и Арктики.

Этап I. 1990-начало 2000 гг. Формирование информационных и экспертных моделей региональных ЧС в рамках Государственных научно-технических программ «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф» (1990–2000 гг.) и «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года».

Этап II. 2000-е гг. Приложения ГИС-технологий при выполнении междисциплинарных и интеграционных проектов СО РАН и программа совместных исследований с НАН Беларуси.

- Выполнение междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН «Антропогенные риски угледобывающих и нефтедобывающих территорий Сибири (2009-2011 гг.) и «Природные и техногенные риски критически важных гидротехнических объектов, водохранилищ и водных систем Сибири» (2012-2014 гг.).
- Выполнение проекта «Концепция устойчивого развития и природно-техногенной безопасности территорий Беларуси и Сибири на основе учета рисков с применением геоинформационных технологий» (2012-2015 гг.) в рамках программы совместных фундаментальных исследований НАН Беларуси и СО РАН.

Этап III. 2010-2024 гг. Информационные системы и цифровые технологии безопасности С-П-Т систем. Территориальные образования рассматриваются в формате социально–природно-техногенной системы, включающей элементы техносферы, экосферы и социосферы и характеризующейся стратегическими рисками развития с учетом территориального фактора, масштабов, состава и уровня показателей развития. Задача – мониторинг состояния техно-эко-сферы, организация системы управления антропогенными, экологическими, природными, гео-динамическими и территориальными рисками.

Рассмотрена общая блок-схема информационной системы территориального управления рисками и безопасностью (ИСТУ РБ), цель которой – снижение индивидуальных, коллективных, территориальных, социальных, техногенных и экологических рисков до приемлемых научно обоснованных рисков. С использованием ИСТУ РБ получены карты пространственного распределения комплексных рисков развития территории СФО, Красноярского края, Байкальской природной территории и Кемеровской области.

Вопросы математического моделирования безопасности технических систем рассматривались по мере развития соответствующих вычислительных технологий:

- Этап I**
1980-1990 гг. **Расчетно-экспериментальные методы прочностного и ресурсного проектирования.** Массовые испытания образцов с трещинами сталей и сплавов в широком диапазоне низких температур, обоснование критериев упругопластического разрушения, определение функций распределения характеристик трещиностойкости и дефектности сварных конструкций, характеристик циклической и динамической трещиностойкости, разработка моделей вероятностной механики разрушения.
- Этап II**
1986-2009 гг. **Создание автоматизированных систем проектирования и расчетов изделий машиностроения.** Решение задач конструкционной прочности, ресурса и надежности крупногабаритных машин, технологического оборудования и конструкций, разработка вероятностных методов механики разрушения и технологий обеспечения конструкционной прочности.
- Этап III**
2010-2024 гг. **Углубленные исследования в области безопасности ТС.** Развитие теорий надежности и риск-анализа, совершенствование методов и технологий конечно-элементного моделирования предельных, локальных и общих напряженно-деформированных состояний, аварийных ситуаций ТС.

В заключительной части представлены разработки в области систем управления, ПАК и АРМ мониторинга и экспертизы безопасности элементов и объектов критической инфраструктуры, выполненные совместно с учениками:

1. Разработка концепции, структуры вычислительного комплекса, имитационных моделей полномасштабного тренажера роторного комплекса (1988-1996 гг., Минеев А.В.).
2. Система мониторинга технического состояния рабочих колес гидроагрегатов Красноярской ГЭС (2017-2023 гг., Черняев А.П., Анискович Е.В.).
3. Автоматизированная система сейсмометрического мониторинга технического состояния и сейсмической безопасности плотин ГЭС (2017-2024 гг., Короленко Д.Б.).
4. Система диагностики дефектности бороалюминиевых элементов ферменных конструкций космических аппаратов (1997-2003 гг., Буров А.Е.).
5. Автоматизированные стенды натурных испытаний МКБВД до разрушения и длительную прочность (2017-2022 гг., Черняев А.П., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е.).
6. Автоматизированное рабочее место акустико-эмиссионного контроля безопасности металлокомпозитных баков КА (2016-2020 гг., Похабов Ю.П., Лепихин А.М.).
7. Автоматизированная система имитационного моделирования аварийных ситуаций в системе «человек-машина-среда» угольного разреза в программной среде AnyLogic (2018-2023 гг., Ковалев М.А.).

Представленные результаты являются определенным вкладом в развитие научных направлений, у истоков которых стоял академик Шокин Юрий Иванович – учитель, наставник, руководитель и основатель научной школы в области прикладной математики, информационных технологий и математического моделирования с ориентацией на решение значимых наукоемких прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Москвичев В.В.* Природно-техногенная безопасность регионов Сибири: ретроспектива исследований и новые задачи // *Вычислительные технологии.* 2023.Т. 28, № 3. С. 25-40. DOI:10.25743/ICT.2023.28.3.003.
- [2] *Левкевич В.Е., Лепихин А.М., Москвичев В.В. и др.* Безопасность и риски устойчивого развития территорий. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. 224 с.
- [3] *Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И. и др.* Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 2021. 796 с.
- [4] *Абасов Н.В., Акбулатов Э.Ш., Андрианова А.В. и др.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: Тематический блок «Региональные проблемы безопасности». М.: МГОФ «Знание», 2024. 644 с.
- [5] *Абасов Н.В., Акбулатов Э.Ш., Андрианова А.В. и др.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: Тематический блок «Региональные проблемы безопасности» М.: МГОФ «Знание», 2024. 624 с.

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ: ОЦЕНКА КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ ТРЕНДОВ

*Пестунов И.А.^{1,2}, Мамаш Е.А.¹, Жирнов А.А.¹, Дубровская О.А.¹, Бельский А.С.¹,
Синявский Ю.Н.¹, Шабальников И.В.¹, Иргит А.А.², Мазяр А.Н.²*

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке пригодности спутниковых данных разного пространственного разрешения и методов их обработки для оценки температуры поверхностного слоя (ТПС) акватории озера Байкал и содержания в нем хлорофилла-а. Анализ многолетних трендов ТПС, построенных на основе спутниковых данных выявил статистически значимый рост ТПС озера Байкал. Потепление наиболее выражено в центральной и северной частях озера в период открытой воды (июнь-ноябрь). Статистический анализ выявил наилучшие алгоритмы для оценки концентрации хлорофилла-а: OC3 для данных MODIS и OC2E для данных MSI/Sentinel-2 и OLCI/Sentinel-3. Эти модели рекомендуются для анализа пространственно-временной изменчивости хлорофилла-а в озере Байкал.

Ключевые слова: валидация, спутниковые данные, озеро Байкал, температура поверхностного слоя, хлорофилл-а, температурные тренды, MODIS Terra/Aqua, Landsat, Sentinel-2, -3.

SATELLITE MONITORING OF THE LAKE BAIKAL SKIN TEMPERATURE: KEY PARAMETERS ASSESSMENT AND TREND ANALYSIS

*Pestunov I.A.^{1,2}, Mamash E.A.¹, Zhirnov A.A.¹, Dubrovskaya O.A.¹, Belskiy A.S.¹, Sinyavskiy Yu.N.¹,
Shabalnikov I.V.¹, Irgit A.A.², Mazyar A.N.²*

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

The results of experimental studies assessing the suitability of satellite data of different spatial resolutions and methods for estimating the lake skin temperature (LST) of Lake Baikal and its chlorophyll-a content are presented. Analysis of long-term LST trends based on satellite data revealed a statistically significant increase in the LST of Lake Baikal. Warming is most pronounced in the central and northern parts of the lake during the open water period (June-November). Statistical analysis identified the best algorithms for estimating chlorophyll-a concentration: OC3 for MODIS data and OC2E for MSI/Sentinel-2 and OLCI/Sentinel-3 data. These models are recommended for analyzing the spatiotemporal variability of chlorophyll-a in Lake Baikal.

Keywords: validation, satellite data, Lake Baikal, lake skin temperature, chlorophyll-a, temperature trends, MODIS Terra/Aqua, Landsat, Sentinel-2, -3.

В последние годы для исследования и оценки состояния внутренних водоемов в различных регионах земного шара стали все активнее применяться методы спутникового дистанционного зондирования. Это обусловлено тем, что традиционные методы определения гидрологических, гидробиологических и температурных характеристик поверхностного слоя, основанные на *in situ* измерениях, носят точечный характер и часто не обеспечивают получение репрезентативных данных для таких сложных и динамичных экосистем, как, например, озера. Кроме того, эти методы имеют логистические ограничения и требуют существенных финансовых и временных ресурсов для применения.

Спутниковое дистанционное зондирование является практически незаменимым инструментом для исследования крупных внутренних водоёмов, таких как озеро Байкал, площадь акватории которого составляет 31.7 тыс. км² [1-6]. Использование спутниковых данных дает возможность одновременно наблюдать за состоянием всего озера в комплексе и оперативно получать пространственно-временную информацию о процессах, протекающих в его поверхностном слое, что невозможно при использовании только традиционных методов наблюдений.

Ключевой проблемой дистанционного зондирования водной поверхности остается вопрос достоверности получаемых параметров, обусловленный оптической сложностью и изменчивостью водных масс, а также разнообразием используемых методов и алгоритмов. Валидация результатов применения алгоритмов, основанных на использовании спутниковых данных для внутренних водоемов, обычно проводится путем сравнения с *in situ* измерениями: данными стационарных датчиков на буях или станциях [1-7] или судовыми наблюдениями [8-10]. Выбор спутниковых данных часто определяется их пространственным разрешением и размерами водоема.

В работе приводятся результаты валидации температурных спутниковых продуктов MODIS Terra/Aqua MO(Y)D11A1 (https://lpdaac.usgs.gov/documents/119/MOD11_ATBD.pdf) и MO(Y)D21A1 (https://lpdaac.usgs.gov/documents/1399/MOD21_ATBD.pdf), имеющих пространственное разрешение 1 км в надире и продуктов, полученных на основе данных TIRS Landsat-8, -9 (продукт L2SP) [11], содержащих оценки значений температуры поверхностного слоя (ТПС) с пространственным разрешением 100 м. Для краткости изложения данные MO(Y)D11A1 и MO(Y)D21A1 далее обозначаются как MO(Y)D11 и MO(Y)D21 соответственно.

Наземные данные *in situ* для валидации температурных продуктов были получены в ходе экспедиций Лимнологического института СО РАН на озере Байкал в период с 2021 по 2024 годы. Обработаны данные 16 экспедиций, охватывающих разные сезоны (май-июнь, июль-август, сентябрь-октябрь). Температура поверхности воды измерялась с помощью CTD-зонда SBE-37 MicroCAT (Sea-Bird Scientific) с интерфейсом RS-232, имеющего диапазон измерения температуры от -5 до 45 °C, разрешение 0.0001 °C и точность ± 0.002 °C. Измерения проводились с бортов научно-исследовательских судов (НИС) «Г.Ю. Верещагин» и «Титов» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала») с интервалом 5 секунд; данные регистрировались на персональном компьютере.

Валидация температурного продукта L2SP выполнена на объединённой выборке Landsat-8, -9 из-за ограниченного объема данных. Все статистические показатели рассчитаны после исключения выбросов с использованием фильтра Хампеля [12]. Соответствующие диаграммы рассеяния представлены на рисунке 1.

Проведенный анализ показал, что продукт MO(Y)D11 характеризуется устойчивым отрицательным сдвигом относительно наземных измерений: -0.8 °C для ночных и -0.5 °C для дневных данных. Продукт MO(Y)D21 демонстрирует положительный дневной сдвиг ($+0.6$ °C) и незначительный ночной (-0.13 °C). Несмотря на высокую общую согласованность с наземными данными ($R^2 \approx 0.9$ для обоих продуктов MODIS), MO(Y)D11 имеет преимущество по точности: его стандартное отклонение и RMSE примерно на 0.2 °C меньше, чем у MO(Y)D21. Таким образом, MO(Y)D21 отличается минимальным средним сдвигом, а MO(Y)D11 – наименьшим значением RMSE, что делает оба продукта пригодными для анализа при учете их систематических погрешностей. Наилучшие результаты валидации показали данные Landsat: с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.98$, $RMSE = 0.62$ °C и минимальным средним сдвигом (-0.14 °C), что вероятно связано с их высоким пространственным разрешением. Это делает данные Landsat наиболее подходящими для детального пространственно-временного анализа ТПС Байкала, однако высокая частота получения данных MODIS сохраняет их ключевую ценность для оперативного мониторинга динамики температуры.

Анализ многолетних трендов на основе этих данных выявил значимое потепление поверхности озера, особенно выраженное в его центральной и северной частях в период открытой воды (июнь-ноябрь) (рисунок 2).

Величина многолетнего тренда варьируется в зависимости от используемого спутникового продукта и периода анализа (0.066 - 0.095 °C в год), но устойчиво указывает на продолжающееся повышение температуры в период открытой воды.

Для оценки концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое внутренних водоемов в работе используются как региональные модели, так и океанические, построенные на основе исследования поверхностных вод морей и океанов. Эти модели используют данные спутников

серии Landsat, Sentinel-2 и Sentinel-3, MODIS Terra/Aqua, AVHRR/NOAA, VIIRS/Suomi NPP [13-18]. В нашей работе проведены сравнительный анализ и валидация пяти глобальных и тридцати двух региональных алгоритмов оценки концентрации хлорофилла-а. Используются данные сенсоров MODIS/(Terra+Aqua), MSI/Sentinel-2 и OLCI/Sentinel-3, сопоставленные с 324 экспедиционными измерениями ЛИН СО РАН (2021-2023 гг.) и ФИЦ ИнБЮМ (2018-2019 гг.), из которых синхронными по времени со спутниковыми измерениями оказалось 73 измерения (рисунок 3).

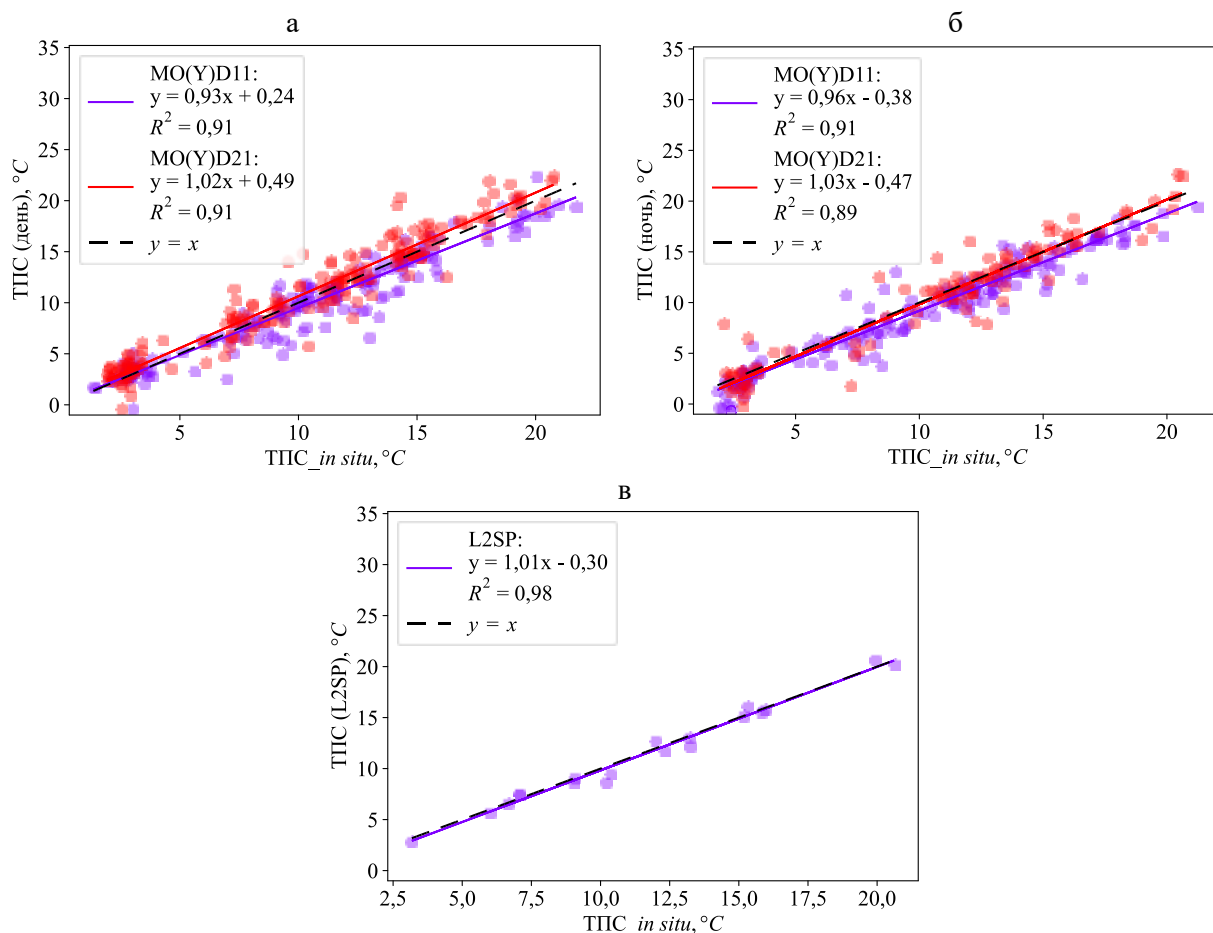


Рис. 1. Диаграммы рассеяния, уравнения регрессии и значения коэффициента детерминации (R^2) для *in situ* измерений и спутниковых значений ТПС: а – MO(Y)D11 и MO(Y)D21 (день); б – MO(Y)D11 и MO(Y)D21 (ночь); в – L2SP.

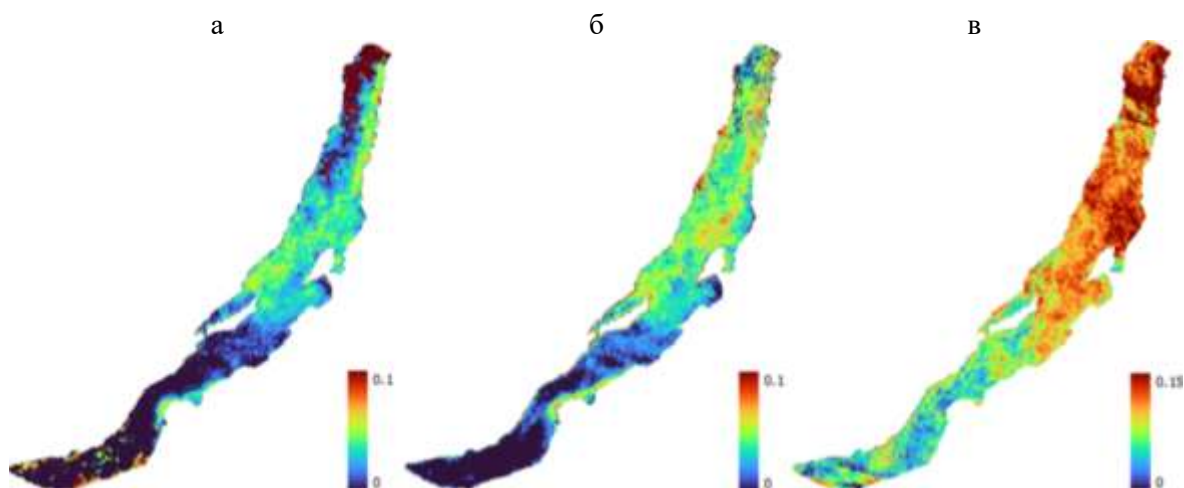


Рис. 2. Пространственное распределение трендов ТПС озера Байкал на основе рядов спутниковых данных ($^{\circ}\text{C}$ в год): а – MO(Y)D11A1 (2003-2024 гг.); б – MO(Y)D21A1 (2003-2024 гг.); в – Landsat-5, -7, -8, -9 (1990-2024 гг.).

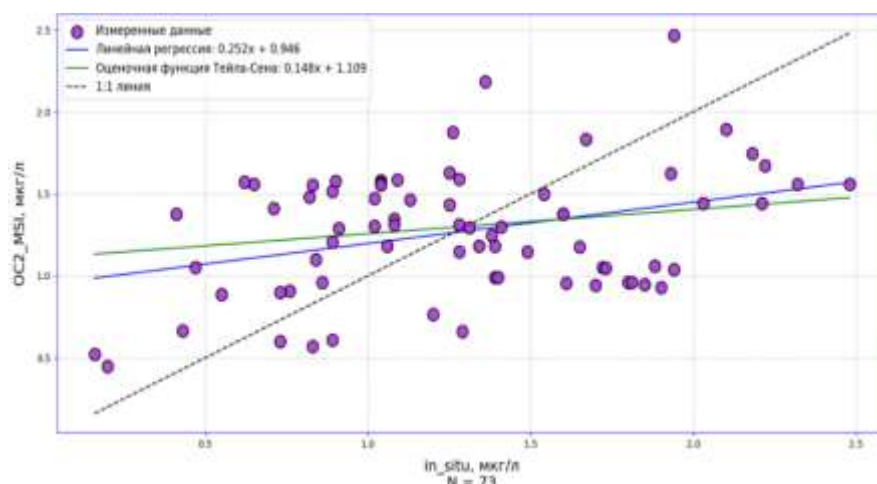


Рис. 3. Диаграмма рассеяния с линией 1:1, уравнением линейной регрессии и непараметрической оценкой Тейла-Сена.

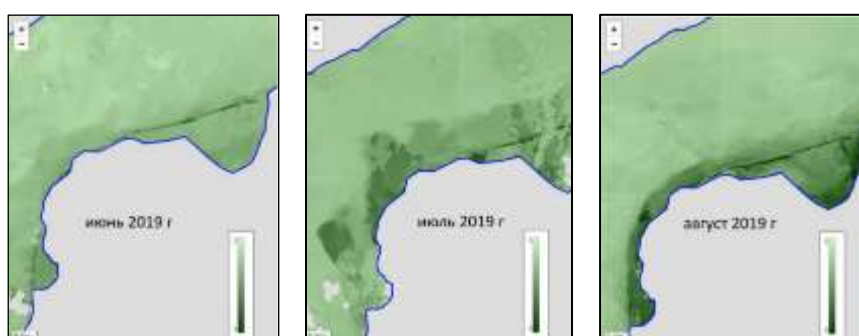


Рис. 4. Пространственное распределение средних значений хлорофилла-а в поверхностном слое озера Байкал в прибрежной зоне дельты реки Селенга по данным MSI/Sentinel-2 (в мкг/л за лето 2019 г.).

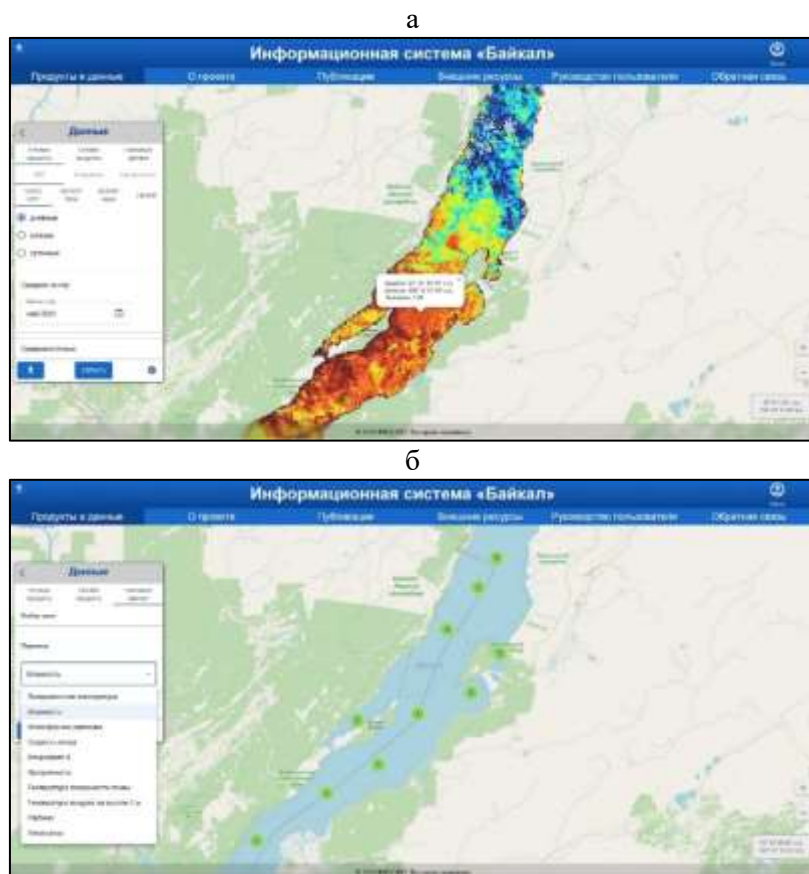


Рис. 5. Примеры визуализации спутниковых (а) и наземных (б) данных в ИС «Байкал».

Статистический анализ показал, что наилучшую точность для Байкала демонстрируют океанические алгоритмы OC3 (для данных MODIS) и OC2E (для данных Sentinel-2/3). На основе этих результатов для мониторинга пространственно-временной динамики хлорофилла-а рекомендовано применение алгоритма OC3 к данным MODIS и OC2E к данным Sentinel-2/3.

На рисунке 4 представлен пример пространственного распределения средних значений хлорофилла-а в поверхностном слое озера Байкал в прибрежной зоне дельты реки Селенга по данным MSI/Sentinel-2 (в мкг/л за лето 2019 г.)

Полученные результаты количественно характеризуют реакцию экосистемы Байкала на глобальное изменение климата и подтверждают важность спутникового мониторинга для ее изучения. Основные результаты работы легли в основу информационной системы (ИС) «Байкал», разрабатываемой в ФИЦ ИВТ. В системе реализованы инструменты для визуализации и обработки спутниковых данных и материалов экспедиций, относящихся к поверхностному слою озера (рисунк 5).

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокимов С.И., Штефурак А.В. Сравнительный анализ температуры воды с использованием спутниковых снимков (на примере Псковского озера) // Псковский регионологический журнал. 2024. Т. 20, № 4. С. 121-135. DOI:10.37490/S221979310032412-6.
- [2] Aranda A.C., Rivera-Ruiz D., Rodríguez-López L. et al. Evidence of climate change based on lake surface temperature trends in South Central Chile // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. P. 4535. DOI: 10.3390/rs13224535.
- [3] Herrick C., Steele B.G., Brentrup J.A. et al. lakeCoSTR: a tool to facilitate use of Landsat Collection 2 to estimate lake surface water temperatures // Ecosphere. 2023. Vol. 14. No. 1. Article e4357. DOI:10.1002/ecs2.4357.
- [4] Hook S.J., Chander G., Barsi J.A. et al. In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42, No. 12. P. 2767-2776. DOI:10.1109/TGRS.2004.839092.
- [5] Moukomla S., Blanken P.D. Remote sensing of the North American Laurentian Great lakes' surface temperature // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, No. 4. P. 286. DOI:10.3390/rs8040286.
- [6] O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. P. 32-47.
- [7] Makwinja R., Inagaki Y., Sagawa T. et al. Monitoring trophic status using in situ data and Sentinel-2 MSI algorithm: lesson from Lake Malombe, Malawi // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. P. 29755-29772.
- [8] Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V. et al. Regional models for highresolution retrieval of chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 imagery // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Art. No. 1215.
- [9] Болданова Е.В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования // Географический вестник. 2022. Т. 61, № 2. С. 73-89.
- [10] Сутырина Е.Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
- [11] Cook M., Schott J.R., Mandel J. et al. 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, No. 11. P. 11244-11266. DOI:10.3390/rs6111244.
- [12] Davies P., Gather U. The identification of multiple outliers // Journal of the American Statistical Association. 1993. Vol. 88, No. 423. P. 782-792. DOI:10.2307/2290763.

- [13] *Li S., Song K., Wang S. et al.* Quantification of chlorophyll-a in typical lakes across China using Sentinel-2 MSI imagery with machine learning algorithm // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 778. Art. No. 146271.
- [14] *Zhang S., Liu N., Luo M. et al.* Downscaling Sentinel-3 chlorophyll-a concentration for inland lakes based on multivariate analysis and gradient boosting decision trees regression // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2023. P. 1-18. DOI:10.1109/JSTARS.2023.3301791.
- [15] *Yang X., Jiang Y., Xuwei D. et al.* Temporal and spatial variations of chlorophyll a concentration and eutrophication assessment (1987-2018) of Donghu Lake in Wuhan using Landsat images // *Water*. 2020. Vol. 12. P. 2192. DOI:10.3390/w12082192.
- [16] *Karimi B., Hashemi S.H., Aghighi H.* Application of Landsat-8 and Sentinel-2 for retrieval of chlorophyll-a in a shallow freshwater lake // *Advances in Space Research*. 2024. Vol. 74. P. 117-129.
- [17] *Bocharov A.V., Tikhomirov O.A., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M.* Monitoring of chlorophyll in water reservoirs using satellite data // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2017. Vol. 84. No. 2. P. 291-295.
- [18] *El-Alem A., Chokmani K., Laurion I., El-Adlouni S.E.* Comparative analysis of four models to estimate chlorophyll-a concentration in case-2 waters using MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Imagery // *Remote Sensing*. 2012. Vol. 4. P. 2373-2400.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ФИТОЦЕНОЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Сергеев В.В., Баврина А.Ю., Кавеленова Л.М., Федосеев В.А., Богданова Я.А., Рязанова Я.А.
Самарский национальный исследовательский университет им. Акад. С.А. Королева, Самара

Предложена новая информационная технология мониторинга фитоценозов с использованием данных космической съемки, ориентированная на применение на региональном уровне. Технология основана на ведении базы опорных полигонов, содержащих проверенную информации о фитоценозах. Сформулированы условия ее использования, описаны информационные процессы, осуществляемые в ее рамках, обоснованы преимущества. Приведены результаты применения информационной технологии для территории Самарской области России.

Ключевые слова: информационная технология, фитоценозы, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, геоинформационная система, опорные полигоны, классификация.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NEW INFORMATION TECHNOLOGY FOR REGIONAL MONITORING OF PHYTOCENOSSES USING EARTH REMOTE SENSING DATA

Sergeyev V.V., Bavrina A.Yu., Kavelenova L.M., Fedoseyev V.A., Bogdanova Ya.A., Ryazanova Ya.A.

Samara National Research University, Samara

New information technology for phytocenoses monitoring using data of remote sensing, focused on application at the regional level, is proposed. The technology is based on maintaining a base of reference polygons, containing verified information about phytocenoses. The results of the application of information technology for the territory of the Samara region of Russia are given.

Keywords: information technology, phytocenoses, monitoring, Earth remote sensing, geoinformation system, reference polygons, classification.

Введение. Реализация мероприятий рационального природопользования требует сопровождения данными, получаемыми в ходе мониторинга растительных сообществ (фитоценозов): лесных массивов, луговых, степных сообществ и т.д. При высокой антропогенной трансформации ландшафтов природные фитоценозы носят фрагментарный характер и могут занимать небольшие площади, их изучение обычно проводится в форме полевых исследований. При охвате обширных территорий возрастает трудозатратность полевых выездов, что ограничивает их регулярное проведение. В такой ситуации эффективной заменой полевым исследованиям является камеральный анализ космических снимков, получаемых в результате дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Современные космические системы ДЗЗ позволяют получать данные с различными характеристиками: по пространственному разрешению, по ширине полосы захвата, по количеству и спектральному составу каналов. Для совместного анализа разнородных снимков, хранения результатов мониторинга в растровом и векторном виде, планирования будущих работ естественно использовать геоинформационные системы (ГИС). Актуальной проблемой является создание информационной технологии, которая использует данные ДЗЗ и ГИС для регулярного и экономически эффективного мониторинга фитоценозов на контролируемой территории.

Описание информационной технологии. В настоящей работе мы описываем подход к автоматизированному мониторингу фитоценозов, решающий указанную проблему на региональном уровне. Он основан на создании базы «опорных полигонов» (площадных объектов с известными характеристиками растительности), в которой аккумулируются верифицированные сведения о ранее выявленных фитоценозах. Предлагаемая информационная технология мониторинга фитоценозов базируется на простом и естественном допущении, что в пределах

одного космического снимка условия съемки и, следовательно, яркостные и спектральные искажения получаемых данных ДЗЗ являются неизменными. Поэтому, зная местоположение опорных полигонов, можно найти на снимке и другие, априори неизвестные участки растительности с аналогичными характеристиками. Общая схема информационной технологии приведена на рисунке 1.



Рис.1. Схема информационной технологии регионального мониторинга.

В соответствии с приведенной схемой космический снимок привязывается к существующей цифровой карте территории, формируются яркостные, спектральные и/или структурные признаки изображения, которые будут использоваться при анализе (блок 1). Далее, путем сопоставления признаков для опорных полигонов с остальным изображением выявляются участки, потенциально соответствующие искомому типу растительности (блок 2). Эти участки окончательно верифицируются при полевом обследовании (блок 3) и, при подтверждении верной классификации, пополняют множество опорных полигонов (блок 4). Важно, что полевое обследование проводится не по всей территории, а лишь по локальным участкам, что резко снижает и время, и стоимость его проведения.

Условия применимости информационной технологии. Разработанная информационная технология предполагает выполнение ряда условий и требований к территории, на которой она применяется:

1. Территория мониторинга полностью покрывается одним кадром космической съемки, т.е. зондируется одновременно. Для снимков среднего разрешения (5-20 м) это обычно несколько тысяч квадратных километров – площадь, соответствующая значительной части любого российского региона.
2. На территории действует региональная ГИС, в рамках которой можно вести и расширять базу данных фитоценозов в виде графического слоя (площадных объектов – полигонов) и сопутствующих семантических данных (характеристик растительности). Имеющаяся в ГИС цифровая карта может также использоваться для картографической привязки анализируемого космического снимка.
3. На территории имеется некоторое множество заранее выявленных или искусственно созданных площадных объектов (опорных полигонов) с известными (верифицированными) характеристиками растительности.
4. Территория обладает развитой транспортной инфраструктурой, позволяющей без существенных затрат проводить окончательное полевое обследование и верификацию новых фитоценозов, выявляемых в процессе мониторинга.

Перечисленным требованиям полностью удовлетворяет Самарская область России, для которой выполнялась практическая (экспериментальная) часть исследований.

Формирование признаков и классификация. Предлагаемая информационная технология порождает специфичные требования к процедурам формирования признаков и классификации анализируемых космических изображений. Во-первых, яркость и спектральный состав растительности могут сильно различаться в разных сеансах космической съемки, они зависят от погоды, сезона, ракурса наблюдений и т.п. Более того, к решению поставленной за-

дачи может привлекаться информация от различных космических аппаратов ДЗЗ, формирующих снимки с разными характеристиками. Как следствие, обучение процедур классификации изображений растительности приходится проводить в условиях существенной нестабильности классов (изменчивости признаков обучающей выборки) в процессе мониторинга.

Во-вторых, объем обучающей выборки (число пикселей опорных полигонов в пределах отдельного снимка) является недостаточным для применения мощных нейросетевых методов распознавания, работающих с векторами признаков высокой размерности и при большом объеме обучающих данных. Приходится использовать несложные процедуры классификации, при этом ограничивать размерность признакового пространства, чтобы избежать вредного эффекта переобучения.

В-третьих, для практического применения информационной технологии важна скорость обработки поступающих данных. Учитывая большие размеры космических снимков, желательно использовать алгоритмы формирования признаков и классификации, обладающие низкой вычислительной сложностью.

В рамках данного исследования для классификации изображений мы используем традиционный режим их поэлементной обработки. Каждый пиксел многокомпонентного (многоспектрального) изображения интерпретируется как вектор признаков, подлежащий классификации, и преобразуется в номер класса, к которому он относится.

Для повышения качества классификации можно дополнять изображения синтетическими компонентами – полями различных признаков, учитывающих статистические и/или структурные особенности изображения в окрестности обрабатываемого пиксела. Каждое поле синтетических признаков обычно формируется в результате локальной обработки одной из компонент изображения по известной схеме «скользящего окна». Перспективными здесь выглядят рекурсивные алгоритмы, позволяющие быстро вычислять разнообразные локальные признаки изображений, например, линейные [2] или энтропийные [3]. Однако целесообразность использования подобных синтетических компонент является предметом дальнейших исследований. В качестве альтернативного способа расширения размерности вектора признаков мы используем конкатенацию спектральных компонент пикселей с одинаковыми координатами, взятых из двух или более снимков одной и той же территории, полученных в разное время и, возможно, разными космическими аппаратами ДЗЗ.

Поскольку доступных снимков может оказаться достаточно много, учитывая ограниченный объем обучающей выборки (пикселей опорных полигонов), после конкатенации векторов признаков необходимо решить обратную задачу – снизить размерность итогового вектора до приемлемого уровня, оставив в нем только наиболее информативные признаки. Стандартным методом такого снижения, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, является **метод главных компонент** (principal component analysis, PCA) [4], который нами и использовался.

В докладе более подробно описывается решение задачи классификации изображений.

Практическое применение. Апробация разработанной информационной технологии на территории Самарской области позволила создать геоинформационную базу данных опорных полигонов и выявленных фитоценозов, включающую в себя раздел «Мониторинг растений» регионального геопортала [5]. За сезоны 2023 и 2024 гг. в базу данных осуществлен ввод данных о 413 фитоценозах, из них 319 объектов ценных растительных сообществ, 4 объекта инвазивных растений и 90 прочих растительных сообществ.

Заключение. Предложенная информационная технология регионального мониторинга фитоценозов продемонстрировала свою работоспособность и эффективность при ее использовании на территории Самарской области. Ведение и постоянное пополнение базы опорных полигонов позволяет вести учет как ценных, так и инвазивных растительных сообществ. Использование космических снимков ДЗЗ обеспечивает эффективный мониторинг, предоставляя надежную и актуальную информацию для осуществления мероприятий по сохранению биоразнообразия и рационального природопользования.

Можно с уверенностью утверждать, что технология применима и для других регионов, обладающих сопоставимым уровнем геоинформационного обеспечения, изученности и доступности фитоценозов, расположенных на их территории.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-11-20013.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- [2] *Сойфер В.А.* Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
- [3] *Сергеев В.В., Баврина А.Ю., Зайцев И.Д., Лазутов М.Ю., Шапиро Д.А.* Об оценке локальной энтропии изображения в скользящем окне // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 5. С. 714-725.
- [4] *Кендалл М., Стюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
- [5] Региональный геоинформационный портал Самарской области. Карта природопользования. <https://geoportal.samregion.ru/minprirod> (дата обращения 10.06.2025).

РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ РУДОПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНО ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Темирбеков Н.М.^{1,2}, Касенов С.Е.^{1,2}, Темирбеков А.Н.^{1,2}, Тамабай Д.О.^{1,2}

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

² Национальная инженерная академия РК, Алматы, Казахстан

В данной работе используется искусственный интеллект и машинное обучение в геолого-разведке. Разработаны алгоритмы обработки, анализа и фильтрации геологических данных с применением программного обеспечения ArcGIS Pro. Созданы алгоритмы для выделения ключевой информации, удаления шумов и выявления структурных элементов, а также в картировании минералогических индикаторов для поиска перспективных месторождений.

Ключевые слова: геологические данные, гравиметрические и магнитные измерения, аэрокосмические данные, методы машинного обучения, математическая геофизика, дистанционное зондирование Земли.

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE AND SEARCH TECHNOLOGIES FOR IDENTIFYING PROMISING MINING FACILITIES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Temirbekov N.M.^{1,2}, Kasenov S.E.^{1,2}, Temirbekov A.N.^{1,2}, Tamabay D.O.^{1,2}

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

The work focuses on the application of artificial intelligence and machine learning in the field of geological exploration. It presents the development of algorithms for processing, analyzing, and filtering geological data using ArcGIS Pro software. These algorithms are designed to extract key information, eliminate noise, identify structural features, and map mineralogical indicators to support the identification of promising mineral deposits.

Keywords: Geological data, gravimetric and magnetic measurements, aerospace data, machine learning methods, mathematical geophysics, remote sensing of the Earth.

Введение. Методы искусственного интеллекта (ИИ) все более широкое применение в области геологии, особенно в прогнозировании месторождений твёрдых полезных ископаемых. Они позволяют обрабатывать большие объёмы данных и выявлять сложные закономерности, которые могут быть неочевидными при использовании традиционных методов.

Использование искусственного интеллекта в геологии связано с несколькими задачами:

- классификация: выявление принадлежности образцов, к определенным типам полезных ископаемых;
- регрессия: прогнозирование содержания минералов и определение перспективных месторождений;
- картирование: создание карт распределения полезных ископаемых на основе геофизических и геохимических данных с применением спектральной обработки ДЗЗ.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются одним из методов реализации ИИ. Она представляет собой математическую модель, которая имитирует работу человеческого мозга. Нейронные сети состоят из множества узлов (нейронов), которые передают информацию друг другу, обучаясь на данных. Таким образом, ИНС являются специальным инструментом внутри ИИ.

В научной литературе уже имеются примеры применения ИНС при геологическом прогнозе месторождения. В работе [1] предложен метод прогнозирования содержания руды с использованием ИНС. Предлагаемая модель была разработана путём включения литологии, изменений в восточном и северном направлениях, а показатели производительности измерялись на основе средней абсолютной ошибки (MAE), средней квадратической ошибки (MSE), корня

среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициента корреляции R и коэффициента детерминации (R^2).

Для оценки содержания руды используются несколько методов интерполяции: метод обратных расстояний и кригинг в несколько его разновидностях. Метод кригинга имеет преимущества и хорошо изложен в работах [2,3]. В работе [4] разработан метод пространственной содержания благ как линейной комбинации имеющихся данных.

Метод кригинга используется для оценки содержаний в добывающих блоках. Основным ограничением этого традиционного метода является то, что она требует предположений, основанных на пространственной корреляции между образцами, которые должны быть оценены в невыбранном месте.

В работах [5-9] были использованы нейронные сети для прогнозирования содержания руды. Достижения в этой области показали огромный потенциал алгоритмов машинного обучения (ML) по сравнению с другими методами интерполяции для оценки содержания руды из-за их способности изучать любые линейные или нелинейные отношения между входами и выходами. Метод нейронных сетей привлекателен и стал универсальным методом прогнозирования содержания. Методы оценки ресурсов на основе машинного обучения более эффективны и дешевле традиционных подходов к оценке ресурсов [10].

Целью данного исследования является применение к прогнозированию содержания руды на основе модели ИНС, которая включает геологические, геофизическую, геохимическую информацию в качестве входных переменных модели и содержание полиметаллических, редкометальных и золотых руд в качестве выходной переменных.

Анализ на основе комплексных геоданных. Предлагаемая методика уникальна из-за своей способности изучать нелинейные связи между входными переменными на основе комбинации геологических, геофизических, геохимических данных. В качестве тестового выбрана участки Алейский полиметаллических, Секисовский золоторудный, Прииртышский медко-колчеданный, Калбинский редкометальный.

Авторами данной статьи построены предварительные макеты геологических, минерагенических и геофизических карт, позволяющих выделить перспективные тестовые участки на основе комплексного использования геологических, минерагенических, геохимических, геофизических (гравиметрических и магнитных) и аэрокосмических данных.

В пределах выделенных рудных поясов предварительно намечены тестовые участки для создания минерагенических моделей, на которых будет разработана методика картирования минерагенических индикаторов для выявления перспективных рудных месторождений.

В данной работе используется программа ArcGIS Pro, которая полностью поддерживает язык Python. С помощью программы Python можно автоматизировать многие процессы:

- загрузка, фильтрация, обработка информации;
- автоматическое присоединение слоёв (layer) к картам;
- преобразование пиксельных координат к реальным;
- расстояний точек с данными на карте;
- обозначение метками или символами;
- выполнение генерации задач.

Исходной информацией являются различные данные, т.е. фондовые, интернетовские и книжные журнальные данные. На рисунке 1 приведена растровая карта магнитного поля (PNG/TIFF). В ней числа заданы в виде картинки. Встроенная программа Python в ArcGIS Pro позволяет:

- с помощью CV2 производится чтение и предварительная обработка картинки;
- pytesseract распознаёт цифры;
- pandas сохраняет в виде таблицы;
- программа ArcGIS из этих значений образует слой точек и выводит на карту.

Для реализации этих процессов импортированы библиотеки и написан Python-скрипт. Выполнены рабочие шаги программы ArcGIS Pro.

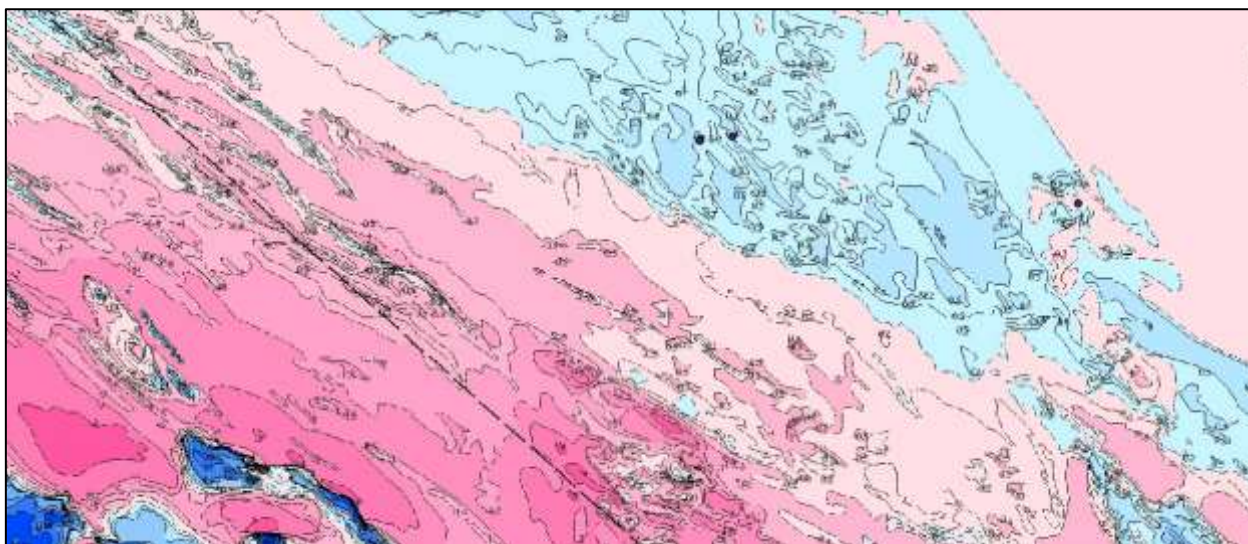


Рис. 1. Карта магнитного поля в Восточно-Казахстанском регионе.

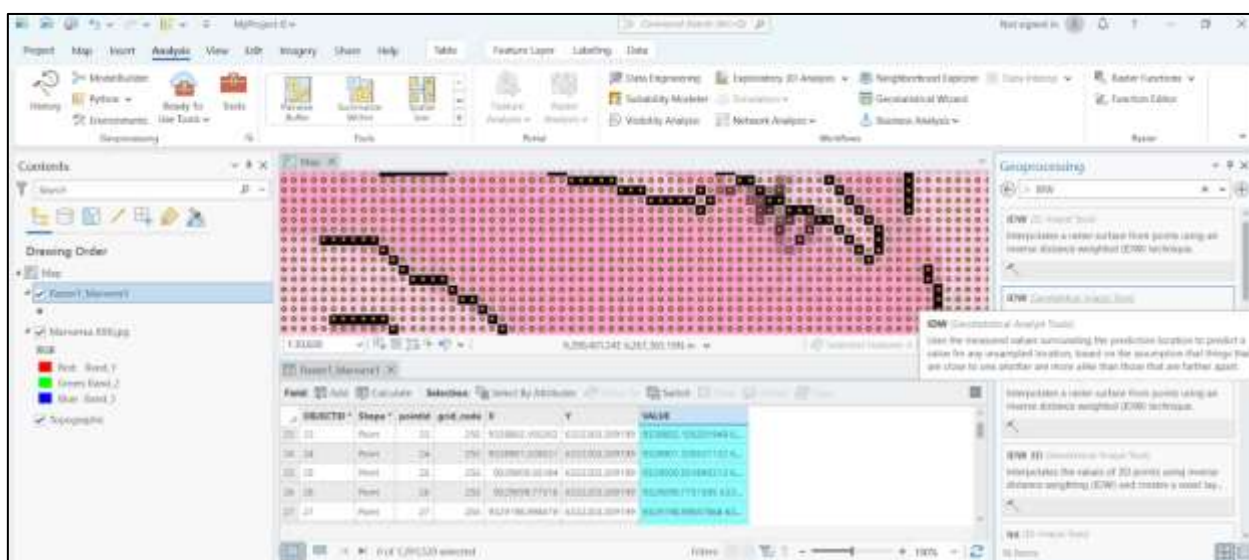


Рис. 2. Полученная таблица.

Во-первых, открывается новый проект, необходимая информация загружается в виде файла или папки. Далее делается привязка файла, растровые данные будут преобразованы в векторные. Из изображения получаем табличные данные.

На рисунке 2. приведена полученная таблица, состоящая из координат x, y и значений магнитного поля.

Заключение. Были изучены все возможности программы ArcGIS Pro и использованы для выполнения работ по проекту. Возможности машинного обучения, языка Python облегчили выполнение задания. Интеграция возможностей Python и ArcGIS облегчает и ускоряет процесс обработки, картирования и анализа пространственных данных.

Работа выполнена при поддержке КН МНВО РК (ИРН BR27100483 «Разработка прогнозно-поисковых технологий выделения рудоперспективных территории на основе анализа данных единой платформы недропользователей «Minerals.gov.kz» с применением искусственного интеллекта и методов дистанционного зондирования Земли»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tsao N.B., Adachi T., Kawamura Y. Application of artificial neural network for the prediction of copper ore grade // Minerals. 2013. Vol. 13. P. 658. DOI:10.3390/min13050658.

- [2] *Isaaks H., Srivastava R.M.* Ordinary kriging. Applied Geostatistics. N.Y., USA: Oxford University Press Inc., 1989. P. 288-295.
- [3] *Байков В.А., Бакиров Н.К., Яковлев А.А.* Математическая геология. Т. I. Введение и геостатистику. Серия: Библиотека нефтяного университета. М.-Ижевск: Издательство «ИКИ», 2012. 288 с.
- [4] *Akbar A.* Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method // International Journal of Mineral Science and Technology. 2012. Vol. 22, Is. 4. P. 573-577. DOI:10.1016/j.ijmst.2012.01.022.
- [5] *Yama B., Linberry G.* Artificial neural network application for a predictive task in mining // Mineral Engineering. 1999. Vol. 51. P. 59-64.
- [6] *Wu X., Zhou Y.* Reserve estimation using neural network techniques // Computational Geoscience. 1993. Vol. 19. P. 567-575. DOI:10.1016/0098-3004(93)90082-G.
- [7] *Jafrasteh B., Fathianpour N.* A hybrid simultaneous perturbation artificial bee colony and back-propagation algorithm for training a local linear radial basis neural network on ore grade estimation // Neurocomputing. 2015. Vol. 167. P. 177-187. DOI:10.1016/j.neucom.2017.01.016.
- [8] *Jafrasteh B., Fathianpour N., Suarez A.* Comparison of machine learning methods for copper ore grade estimation // Computational Geoscience. 2018. Vol. 22. P. 1377-1388. DOI:10.1007/s10596-018-9758-0.
- [9] *Li X.-Y., Li H.-L., Zhang B.-L., Guo Q.* Hybrid self-adaptive learning-based particle swarm optimization and support vector regression model for ore grade estimation // Neurocomputing. 2015. Vol. 118. P. 179-190. DOI:10.1016/j.neucom.2013.03.002.
- [10] *Zhang E.F., Nwaila G.T., Tolmay L., Frimmel H.F., Budeanu J.E.* Integration of machine learning algorithms with Gompertz curves and kriging to estimate resources in gold deposits // Natural Resource Research. 2021. Vol. 30. P. 39-56. DOI:10.1007/s11053-020-09750-z.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Якубайлик О.Э.^{1,2}, Кадочников А.А.¹, Токарев А.В.¹

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

² ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

Представлен обзор исследований и разработок по созданию региональных систем мониторинга природной среды. Описаны ключевые уровни мониторинга (государственный, корпоративный, научный, общественный) и представлены практические результаты: созданные ГИС-системы для мониторинга атмосферы, водных объектов, лесов, сельского хозяйства, а также инфраструктура ДЗЗ. Делается вывод о важности интеграции всех уровней.

Ключевые слова: ГИС, ДЗЗ, мониторинг, региональные системы, веб-карта.

INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT FOR REGIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEMS

Yakubailik O.E.^{1,2}, Kadochnikov A.A.¹, Tokarev A.V.¹

¹ Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk

² Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk

An overview of research and development on the creation of regional environmental monitoring systems is presented. The different levels of monitoring, including government, corporate, scientific and public, are described, along with the practical results in the form of GIS systems created to monitor the atmosphere, water bodies, forests and agriculture, as well as the remote sensing infrastructure used. The importance of integrating all these levels is emphasized.

Keywords: GIS, remote sensing, monitoring, regional systems, web mapping.

Введение. Информационно-аналитическое обеспечение региональных систем мониторинга природной среды – это комплекс процессов, технологий и ресурсов, направленных на эффективное получение, обработку, хранение, анализ, интерпретацию и представление данных от региональной системы мониторинга для поддержки принятия экологически значимых решений. Это ключевой элемент, превращающий сырые данные наблюдений в практически полезную информацию и знания об экологическом состоянии региона. Его цель – обеспечить своевременной, достоверной и понятной информацией органы власти, природопользователей, научные организации и население; создать основу для оценки текущего состояния окружающей среды (воздух, вода, почва, биоразнообразие, радиация, климат и т.д.), выявления негативных тенденций и нарушений экологического законодательства, прогнозирования изменений природной среды под воздействием антропогенных и природных факторов, разработки и обоснования природоохранных мероприятий и программ развития региона, контроля эффективности принятых природоохранных мер, информирования общественности о состоянии окружающей среды.

Развитие систем мониторинга природной среды проходит на нескольких уровнях, где каждый уровень играет уникальную и взаимодополняющую роль. Государственный экологический мониторинг, обеспечиваемый федеральными и региональными органами власти – это официальная, нормативно-закрепленная система, формирующая основу национальной экологической политики и отчетности. Корпоративные и ведомственные решения – это системы мониторинга, создаваемые и эксплуатируемые промышленными предприятиями, ресурсодобывающими компаниями, транспортными организациями, Роспотребнадзором, Росводресурсами, МЧС, и проч. для решения своих специфических задач: экологического контроля и воздействия на окружающую среду на объектах (выбросы, сбросы, отходы), обеспечения безопасности, управления ресурсами, предупреждения аварий, оптимизации природоохранных затрат, минимизации штрафов, и проч. Научно-исследовательские разработки и системы мониторинга создаются и эксплуатируются для решения фундаментальных и прикладных научных

задач, обработки новых методик и технологий, изучения причинно-следственных связей, долгосрочных трендов, наблюдения за уникальными/труднодоступными объектами, валидации данных государственных и корпоративных систем, и проч. Системы, создаваемые активным населением, направлены на решение локальных проблем, общественный контроль, повышение экологической грамотности и вовлеченности.

Обзор разработанных систем мониторинга. Опыт исследований и разработок ИВМ СО РАН в области создания региональных систем мониторинга природной среды является достаточно разноплановым – на протяжении длительного времени решались задачи, относящиеся в той или иной степени ко всем перечисленным уровням, системам мониторинга различного назначения (атмосфера, водные ресурсы, земли сельхозназначения), основанных на разных технологиях сбора данных (информационные продукты на основе спутниковых снимков и климатических данных реанализа, автоматизированная передача информации с датчиков и систем наземного мониторинга, нерегулярные данные полевых исследований с использованием научного оборудования и БПЛА). В зависимости от решаемых задач использовались различные программно-технологические платформы, системы и сервисы, средства визуализации и аналитической обработки информации [1].

Хорошим импульсом в развитии научных исследований по данному направлению стали инициативы академика Ю.И. Шокина – организация и координация работ по реализации пилотного проекта СО РАН по созданию «Центра мониторинга социально-экономических процессов и природной среды Сибирского федерального округа» (2010 г.), интеграционного проекта СО РАН «Распределенная система сбора, хранения, обработки и доступа к данным дистанционного зондирования Земли для мониторинга социально-экономических процессов и состояния природной среды регионов Сибири и Дальнего Востока» (2009-2011 гг.).

Созданные в ИВМ СО РАН системы мониторинга – различные по масштабу и решаемым задачам; некоторые из них реализованы полностью в ИВМ СО РАН, другие – совместно с различными партнерами. Ниже перечислены наиболее значимые разработки.

Одной из первых разработок по рассматриваемой тематике стала «Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края» [2]. Начиная с 2007 г. проект выполнялся консорциумом из примерно 10 организаций, при этом все работы по созданию ее программно-технологического обеспечения осуществлялись ИВМ СО РАН. Было обеспечено сопровождение и техническая поддержка системы в течение 5 лет после ее создания, в дальнейшем она была передана в подведомственное учреждение Минэкологии Красноярского края.

В период примерно с 2010 по 2020 гг. создано (частично – с партнерами) более десятка корпоративных и ведомственных проблемно-ориентированных прикладных разработок, значительная часть которых связана с решением различных задач мониторинга природных и социально-экономических объектов и систем. Все они выполнены в технологии геоинформационных веб-систем и основаны на интеграции баз данных, ГИС и веб-сервисов, имеют развитый интерактивный картографический интерфейс, средства иллюстративной графики и анализа данных. Среди них есть немало систем, которые продолжают работать и сейчас, в том числе: «Карта лесных пожаров» для КГАУ «Красноярская база авиационной и наземной охраны лесов», Краевой геопортал Государственной геоинформационной системы Красноярского края «Енисей-ГИС» Минцифры края, содержащая показатели деятельности медицинских учреждений и различные медицинские статистические данные «Карта здравоохранения Красноярского края» для Минздрава края.

Реализован ряд научно-исследовательских проектов, в рамках которых созданы прикладные системы различного назначения. ГИС «Комплексная оценка качества вод р. Енисей» предназначена для визуализации через веб-интерфейс наборов данных по гидрохимическим и гидробиологическим показателям на тематических картах, в таблицах и графиках. Ее информационное наполнение выполнено по материалам многолетних экспедиционных исследований сотрудников ИВМ СО РАН. В рамках проекта конкурса экологических грантов Еп+ Group «Выявление зон цветения реки Енисей в городской черте Красноярска» по данным наземного

мониторинга, мультиспектральной аэрофотосъемки с БПЛА и спутниковых снимков создана тематическая веб-карта зарастания русла водной растительностью. Для проекта НОЦ «Енисейская Сибирь» «Интеллектуальная программно-технологическая платформа ДДЗ и анализа данных в прикладных задачах экономики и экологии» реализован комплекс специализированного ПО оперативной обработки данных MODIS/VIIRS, заказчиком и потребителем которого выступает министерство природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края [3]. Для обеспечения исследований температурного режима р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС и его влияния на качество атмосферного воздуха в Красноярске по заказу Красноярской ГЭС создана «Информационно-аналитическая система «Характеристики атмосферы над акваторией р. Енисей» [4].

Создана и активно развивается в настоящее время распределенная система сбора и анализа информации о состоянии приземного слоя атмосферы г. Красноярска [5]. Система включает сеть малогабаритных сигнальных станций мониторинга воздуха, температурные профилемеры для регистрации вертикальных профилей температуры, датчики температуры воды и распределенная по городу сеть анеометров, подсистему сбора и анализа данных видеонаблюдения за туманами на Енисее, оборудование для мобильного мониторинга с помощью БПЛА и автомобиля, соответствующее информационно-вычислительное обеспечение [6]. Накоплен архив разнородных данных мониторинга характеристик атмосферы города за 7 лет.

Сформирована информационно-вычислительная инфраструктура приема и оперативной обработки данных ДЗЗ ФИЦ КНЦ СО РАН, включающая две спутниковые станции приема УниСкан-36, сервисы оперативной автоматизированной доставки спутниковых данных из российских и зарубежных дата-центров. В рамках сотрудничества с отделом космического мониторинга МЧС по Красноярскому краю и Сибирским федеральным университетом создан «Единый региональный центр дистанционного зондирования Красноярского края». Сформирован и непрерывно пополняется в реальном режиме времени архив данных ДЗЗ, содержащий на территорию края снимки со всех низкоорбитальных природно-ресурсных спутников [7].

В ФИЦ КНЦ СО РАН в настоящее время проводятся научные исследования и разработки в области новых технологий и методов точного земледелия, агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, геоинформационного и математического обеспечения задач цифровизации системы земледелия Красноярского края [8]. На сельскохозяйственных угодьях опытно-производственных хозяйств (ОПХ) ФИЦ КНЦ СО РАН проводятся производственные опыты по внекорневым подкормкам, дифференцированному внесению удобрений, формируемому по данным дистанционного зондирования. Для обеспечения решения этих задач создана «Система агромониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН», необходимая для нее информационно-вычислительная инфраструктура, программно-технологическое обеспечение для приема и оперативной обработки спутниковых снимков и результатов съемки с БПЛА. Система дистанционного зондирования сельхозугодий на основе БПЛА и специального ПО в настоящее время включает около десятка квадрокоптеров и самолетов с различным навесным оборудованием, каталогизированный архив данных ДЗЗ.

Заключение. Успешное управление окружающей средой в 21-м веке требует не конкуренции, а синергии между существующими уровнями систем мониторинга: использования сильных сторон каждого (масштаб и стандарты государства, оперативность и мотивация граждан, инновации науки, детализация корпораций) и налаживания механизмов доверия, верификации и обмена данными. Будущее – за интегрированными экосистемами мониторинга, объединяющими возможности всех заинтересованных сторон.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Якубайлик О.Э., Гостева А.А., Ерунова М.Г., Кадочников А.А., Матвеев А.Г., Пятаев А.С., Токарев А.В. Разработка средств информационной поддержки наблюдений за состоянием окружающей природной среды // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. № 4-2(52). С. 136-142.

- [2] Токарев А.В., Якубайлик О.Э. Каталог ресурсов для ГИС мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S18. С. 215-219.
- [3] Кадочников А.А. Применение геоинформационных технологий для построения системы спутникового мониторинга // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 1. С. 110-118.
- [4] Заворужев В.В., Соколова О.В., Заворужева Е.Н., Якубайлик О.Э. Концентрация РМ_{2.5} в приземной атмосфере над территорией г. Красноярска и акваторией незамерзающего участка реки Енисей // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 6 (413). С. 462-468.
- [5] Заворужев В.В., Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VII Международной научной конференции. Красноярск. Сибирский федеральный университет. 2020. С. 70-73.
- [6] Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Геоинформационная веб-система и приборно-измерительное обеспечение оперативной оценки загрязнения атмосферы // Автометрия. 2018. Т. 54, № 3. С. 39-46.
- [7] Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Система обработки спутниковых данных в региональном центре ДЗЗ ФИЦ КНЦ СО РАН // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019): Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием. 2019. С. 50-54.
- [8] Ерунова М.Г., Шпедт А.А., Якубайлик О.Э., Трубников Ю.Н. Геопространственная база данных цифровизации системы земледелия Красноярского края // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 7. С. 56-61.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

РАСПОЗНАВАНИЕ И СЕГМЕНТАЦИЯ КРОН ОТДЕЛЬНЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПО БПЛА ИЗОБРАЖЕНИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИОНАЛЬНО-СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аникин А.В.¹, Дмитриев Е.В.^{2,3}, Мельник П.Г.⁴, Соколов А.А.⁵

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

³ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва

⁵ Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France

Исследуются новые возможности использования регионально-сверточных нейронных сетей для сегментации отдельных деревьев на ортофотопланах лесных территорий различного типа. Приводятся результаты сравнения традиционных и нейросетевых методов решения данной задачи. Рассмотрены традиционная модель TCDS на основе водораздельного алгоритма и нейросетевая модель CCDM с использованием Faster R-CNN. Разработана программа для полуавтоматической разметки обучающих данных модели CCDM. Тестовые расчеты с использованием БПЛА-изображений территории Павловского парка показали, что использование нейросетевой модели CCDM позволяет с большей точностью производить детектирование и сегментацию кроны по сравнению с традиционным подходом. Наибольшее повышение точности происходит для изображений смешанных древостоев.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, регионально-сверточные нейронные сети, сегментация кроны отдельных деревьев, БПЛА мониторинг лесных территорий.

RECOGNITION AND SEGMENTATION OF INDIVIDUAL TREE CROWNS FROM UAV IMAGES USING REGIONAL CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Anikin A.V.¹, Dmitriev E.V.^{2,3}, Melnik P.G.⁴, Sokolov A.A.⁵

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Moscow

³ Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring «AEROCOSMOS», Moscow

⁴ Bauman Moscow State Technical University, Moscow

⁵ Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France

New possibilities of using regional convolutional neural networks for segmentation of individual tree crowns on RGB orthomosaics of forest areas of various types are investigated. The results of comparison of traditional and neural network methods for solving this problem are presented. The traditional TCDS model based on the watershed algorithm and the CCDM neural network model using Faster R-CNN are considered. A program for semi-automatic marking of training data of the CCDM model is developed. Test calculations using UAV images of the Pavlovski Park territory showed that the use of the CCDM neural network model allows for more accurate detection and segmentation of crowns compared to the traditional approach. The greatest increase in accuracy occurs for images of mixed forest stands.

Keywords: remote sensing, regional convolutional neural networks, segmentation of individual tree crowns, UAV monitoring of forest areas.

Введение. Сегментация кроны отдельных деревьев (СКОД) является ключевой процедурой объектно-ориентированных алгоритмов обработки аэрокосмических изображений сверхвысокого пространственного разрешения. Результаты данной процедуры позволяют оценить количество деревьев первого яруса, составляющих древостой на обследуемой территории, что в совокупности с параметрами сомкнутости полога и средней плотности кроны позволяет уточнить информацию о запасе древесины и биомассе фракций древостоя. Использование конту-

ров отдельных деревьев также в большинстве случаев позволяет существенно повысить точность стандартной попиксельной классификации, результаты которой используются для дистанционной оценки породного состава [1].

Традиционные методы СКОД большей частью основаны на решении задач поиска местоположения (детектирования) вершин отдельных деревьев (ДВОД) и построения контуров крон (ПКК). В основе методов детектирования деревьев лежат алгоритмы поиска локального максимума, бинаризации изображений, анализа масштабов и сопоставления с шаблоном [2]. В ранних работах, поиск локального максимума осуществлялся методом скользящего окна [3], размер которого определялся типичным размером крон деревьев, произрастающих на обследуемой территории. Однако, такой метод оказался применимым только для лесокультурных насаждений.

Естественные древостои, как правило, характеризуются различными размерами крон и имеют смешанный породный состав, что означает различие также и в текстурных особенностях крон. В этом случае необходимо применять адаптивные методы, например, используя поиск масштаба стабилизации вариограммы [4], либо, в дополнение к радиометрическому максимуму, использовать также максимальные значения преобразования расстояния [5]. При поиске локальных максимумов можно также использовать контекстный анализ, например, частоты локальных максимумов, полученных в результате направленного поиска, для оценки вероятности того, что локальный максимум является центроидом кроны отдельного дерева. По некоторым оценкам [6], при использовании данного метода удается оценить количество деревьев с точностью более 80%. При этом необходимо отметить, что для смешанных древостоев, обладающих более сложной структурой полога, частотный подход может оказаться неэффективным.

К стандартным методам сегментации крон относятся алгоритмы наращивания областей [7] и следования по долине [8]. Однако наиболее часто для решения данной задачи используется водораздельный алгоритм [9] с препроцессингом на основе сглаживания и математической морфологии. Популярность данного подхода обусловлена тем, что данный метод позволяет разделить похожие соприкасающиеся друг с другом объекты на изображении. Характерной проблемой методов СКОД на основе водораздельного алгоритма является появление ошибочных сегментаций ветвей в качестве крон отдельных деревьев. Для устранения данной проблемы используется постпроцессинг на основе информации о масштабах объектов. Так, например, данный метод позволил существенно уменьшить количество ошибочных сегментаций и построить более точные границы крон при обработке аэрофотоснимков высокого пространственного разрешения лесных территорий штата Онтарио (Канада) [10].

Большая часть работ, посвященных использованию глубоких нейронных сетей для СКОД, используют специальные регионально-сверточные архитектуры (например, R-CNN и YOLO), предназначенные для быстрого обнаружения объектов на изображении. Общим свойством указанных моделей является использование так называемых “якорей” граничных рамок, которые позволяют существенно сократить время детектирования объектов. Результаты, опубликованные в недавних работах, показывают, что нейросетевые методы позволяют достичь высоких точностей при решении данной задачи [11,12]. В данном исследовании мы рассматриваем возможности сочетания традиционных и нейросетевых подходов.

Методика. Учитывая проведенный анализ литературных источников, при построении традиционного метода СКОД мы основывались на сочетании сглаживающих фильтров, адаптивной бинаризации и водораздельного алгоритма. В результате был реализован метод TCDS (Tree-Crown Detection and Segmentation) позволяющий на основе RGB изображений сверхвысокого пространственного разрешения выделить вершины и контуры крон отдельных деревьев, а также построить баундинг-боксы и сохранить их в виде векторных геоданных.

Алгоритм обработки с помощью TCDS может быть описан следующим образом. На вход подается изображение в GeoTIFF формате. Исходное изображение конвертируется в градации серого и применяется эквализация гистограммы яркости. Далее применяется Гауссовское раз-

мытие с параметром разброса, определяемым исходя из характерных размеров фитоэлементов, и выполняется адаптивная бинаризация изображения. Размер фильтра для адаптивной бинаризации изображения задается примерно равным двум диаметрам кроны.

Далее на основе методов морфологии производится удаление мелких объектов, размер которых не превосходит минимального размера кроны отдельного дерева и заполнение малых пустот, что позволяет более четко сформировать структуру межкрупного пространства. Учитывая существенные различия в текстурах крон деревьев хвойных и лиственных отделов, для определения центров крон используется преобразование расстояния, т.е. производится поиск максимальных значений и вычисление медоидов. Для определения масок отдельных деревьев используется водораздельный алгоритм. Далее определяются баундинг-боксы и, с помощью морфологических операций, строятся контуры крон.

В основе предлагаемого нами комбинированного нейросетевого метода детектирования и сегментации крон CCDM (combined crown delineation method) лежит регионально-сверточная сеть Faster R-CNN с базовой архитектурой ResNet50 и Feature Pyramid Network (FPN) для обнаружения объектов разных размеров. Выбор данной архитектуры для этапа детектирования обусловлен тем, что кроны деревьев в смешанном древостое имеют достаточно сложную и разнообразную структуру и, таким образом, выбор делается в сторону точности, а не скорости обработки. Также выбранная архитектура базовой сети ResNet50, используемой при извлечении признаков, обеспечивает более высокую точность при меньших вычислительных затратах, например, по сравнению с такой популярной архитектурой, как VGG16.

Для построения масок и контуров крон деревьев был реализован метод локальной сегментации. Алгоритм выглядит следующим образом: производится масштабирование найденного с помощью Faster R-CNN баундинг-бокса с коэффициентом 1.5 и вырезается соответствующая часть изображения, производит преобразование гистограммы к эталонной и применяется водораздельный алгоритм, после чего из найденных сегментов выбирается тот, который соответствует центру кроны.

Для обучения нейронной сети требуется достаточно большое количество размеченных изображений. Наиболее точной является разметка, полученная в результате полевых исследований, однако данных полученных таким образом мало и их получение является затратным по времени и дорогостоящим. Как правило в исследованиях такого рода используется экспертная разметка, получаемая на основе визуального анализа. Однако такой способ также требует очень большого количества времени. Таким образом, нами был предложен метод полуавтоматической разметки, реализованный в виде пакета функций на языке Python.

Для обучения и тестирования модели CCDM был написан класс TreeDetector, который позволяет: привести данные, полученные после полуавтоматической разметки к формату Pascal VOC; обучить модель Faster R-CNN; загрузить и протестировать обученную модель на выбранных изображениях с вычислением стандартных и специализированных метрик качества, провести сравнение нескольких обученных моделей, а также традиционных алгоритмов (например, TCDS); построить маски и контуры крон на выбранном изображении. Качественные характеристики качества автоматизированных алгоритмов обнаружения и построения контуров отдельных деревьев разграничения деревьев рассчитываются на основе сравнения определяемых местоположений деревьев или границ крон с эталонными данными.

Численные эксперименты. В качестве района обследования была выбрана территория Павловского парка (г. Павловск, Пушкинский район г. Санкт-Петербург, Россия), который входит в состав Государственного музея-заповедника «Павловск» и является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Древостои занимают более 80% территории парка и их общая площадь составляет около 500 га. Породный состав довольно разнообразен и включает в себя также редкие виды деревьев, однако основу верхнего яруса составляют сосна обыкновенная, ель европейская, дуб черешчатый, клён остролистный и берёза повислая. Вдоль дорожек некоторых аллей также высажены ряды липы мелколистной. Для обработки использовался ортофотоплан с разрешением 7 см на пиксель, полученным по данным осенней съемки 2020 г.

На основе полуавтоматической разметки была сформирована обучающая выборка для модели Faster R-CNN. В датасет были включены изображения, содержащие как одиночные деревья, так и плотные группы. Исходное изображение было разрезано на тайлы размером 764×764 пикселей; всего получено 112 тайлов, из них 80 использованы для обучения, ~20 для валидации, 12 для теста. Разметка представлена в виде GeoJSON файла с координатами баундинг-боксов. Обучающая выборка охватывает различные типы фоновой обстановки: открытые пространства, дорожки, водные пространства, группы деревьев и одиночные деревья.

В процессе обучения использовались веса, натренированные на датасете COCO, загруженные из библиотеки torchvision, которые в дальнейшем корректировались в процессе дообучения. Дообучение проводилось с помощью фреймворка PyTorch 2.6.0 на GPU Nvidia Tesla T4, оптимизатор – SGD (стохастический градиент) с начальным шагом 0.005 и значением коэффициента импульса (параметр momentum) 0.9. Размер мини-батча составляет 4 изображения. В качестве функции потерь использовалась совокупность стандартных для Faster R-CNN классификационной потери для меток «дерево/фон» и регрессионной L1-потери для координат баундинг-боксов. Обучение длилось 30 эпох; лучшая модель выбиралась по наименьшей потере на валидационном наборе (наблюдалось сходящееся снижение loss, выход на плато примерно к 20 эпохе). Для борьбы с переобучением применялась аугментация данных: случайные отзеркаливания тайлов, небольшие случайные повороты и изменения яркости/контраста изображения. Эти меры имитировали разные условия съемки и расположение деревьев.

После обучения полученная модель была применена к независимому тестовому участку (часть ортофотоплана парка, не использованная в обучении, с известной разметкой 300 деревьев). Для каждого изображения модель генерирует набор предсказанных баундинг-боксов и вероятности класса по каждому. Для дальнейшей оценки учитывались только предсказания с вероятностью выше порога 0.5 (это позволяет отсеять заведомо ложные или маловероятные баундинг-боксы).

Для количественной оценки качества ДВОД использовались общепринятые метрики в задаче детектирования объектов (бинарная классификация): полнота, точность и F1-мера (среднее гармоническое точности и полноты). Также, в дополнение к указанным стандартным метрикам, вводится специальная метрика avg-M, в которой учитывается расстояние между центром кроны и центром предсказанного баундинг-бокса.

Стоит отметить, что проблемой обучающих данных является то, что даже при разметке вручную во многих случаях затруднительно определить границы деревьев и их количество. Поэтому каждая разметка одной и той же территории отличается от другой. Для проверки этого утверждения был проведен эксперимент. Один и тот же участок территории был полностью вручную размечен дважды и затем вычислены метрики для первой разметки, как если бы она была получена как предсказание, а вторая – как истинная.

В результате по нашим оценкам уровень полноты и точности экспертной разметки находится в диапазоне 0.85-0.91, F1-мера составляет примерно 0.88, метрика avg-M находится в диапазоне 0.77-0.82, а полная вероятность ошибки экспертной разметки составляет 0.21. Мы предполагаем, что качество экспертной разметки на других участках Павловского парка не будет отличаться кардинальным образом от оценок, полученных для тестового участка. Это означает, что при анализе качества моделей мы ориентируемся в первую очередь на указанный выше естественный уровень значений метрик. Для достижения более высоких значений метрик требуется более высокое качество экспертной разметки.

Модели TCDS и CCDM были протестированы на участке площадью 100×100 м² Павловского парка, содержащем большое количество хвойных деревьев (елей и сосен), что является более простым случаем. Результаты детектирования на некоторых выбранных изображениях представлены на рисунках 1 и 2. Бирюзовым пунктиром показаны размеченные кроны, а красным предсказанные.

Соответствующие метрики приведены в таблицах 1 и 2. В нижней строке для полноты, точности, F1-меры и avg-M приведены средние значения, а последней (крайней правой) ячейке – средняя относительная ошибка распознавания отдельных деревьев MAPE (Mean

Absolute Percentage Error). Модель TCDS на основе водораздельного алгоритма, демонстрирует достаточно хорошие результаты. Однако при сравнении с моделью CCDM на основе Faster R-CNN, TCDS имеет более низкие значения полноты (0.74 против 0.82) и более высокую среднюю относительную ошибку подсчета количества деревьев avg-M (12.25% против 6.53%).

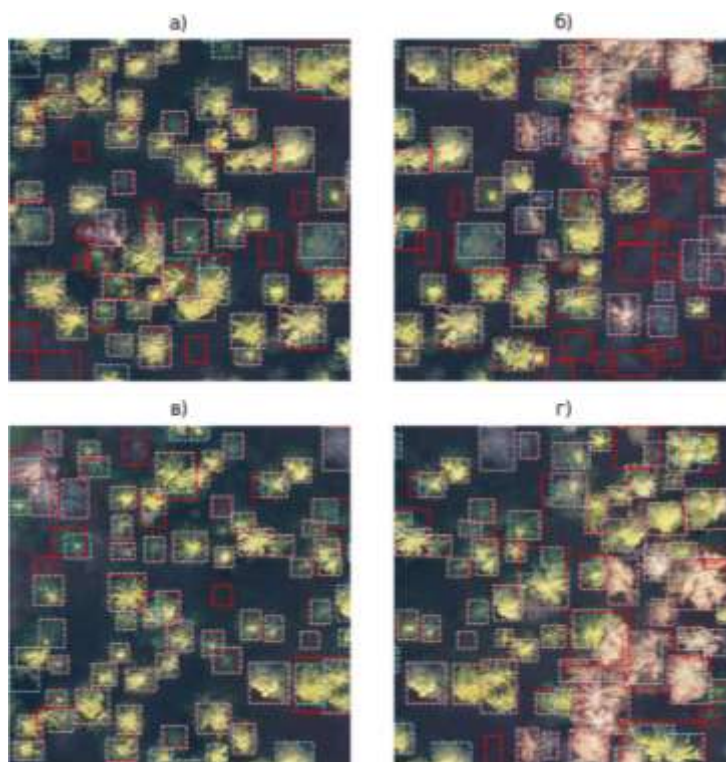


Рис. 1. Результаты детектирования отдельных деревьев с помощью модели TCDS на избранных тестовых изображениях.

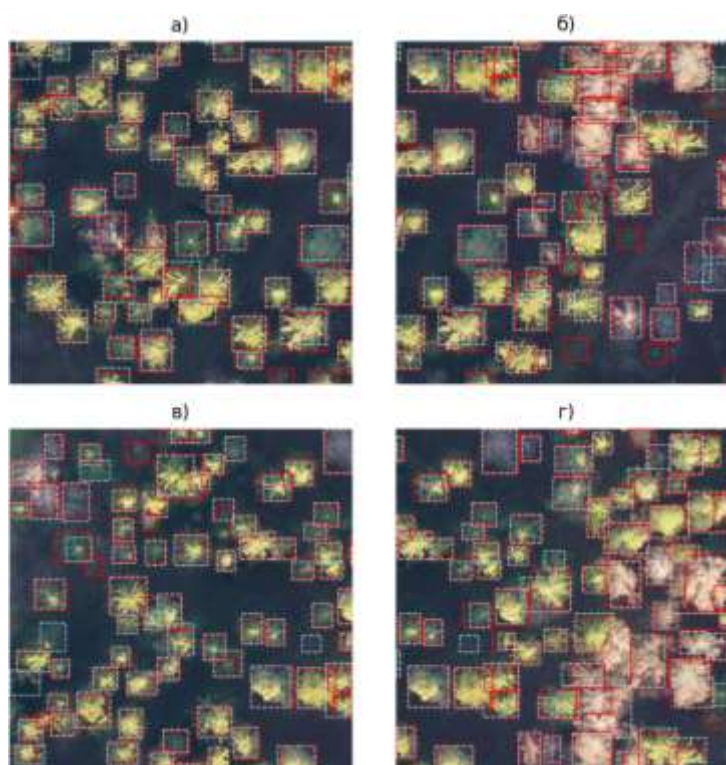


Рис. 2. Результаты детектирования отдельных деревьев с помощью модели CCDM на избранных тестовых изображениях.

Табл. 1. Качество ДВОД моделью TCDS на выбранных избранных изображениях.

Изображение	Полнота (Recall)	Точность (Precision)	F1-мера	avg-M	Число распознанных деревьев	Истинное число деревьев
а	0.85	0.87	0.86	0.83	63	62
б	0.65	0.73	0.69	0.60	52	58
в	0.75	0.91	0.8	0.81	62	75
г	0.7	0.87	0.78	0.78	57	71
Среднее (или MAPE)	0.73	0.845	0.7825	0.73	12.25%	

Табл. 2. Качество ДВОД моделью CCDM на выбранных избранных изображениях.

Изображение	Полнота (Recall)	Точность (Precision)	F1-мера	avg-M	Число распознанных деревьев	Истинное число деревьев
а	0.90	0.84	0.87	0.83	66	62
б	0.74	0.68	0.71	0.79	63	58
в	0.87	0.90	0.88	0.59	72	75
г	0.77	0.83	0.80	0.79	66	71
Среднее (или MAPE)	0.82	0.81	0.81	0.75	6.53%	

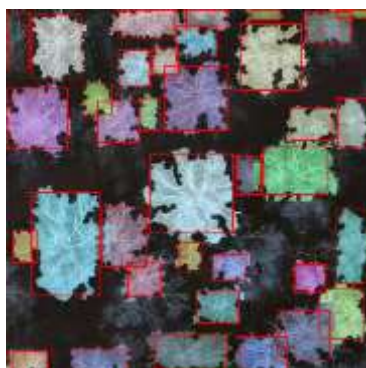


Рис. 3. Пример построения масок крон с помощью комбинированного алгоритма.

Далее модель CCDM была протестирована на более сложной сцене, выбранной из размеченных данных тестового участка Павловского парка. В тестовом наборе размеченных изображений (тестовый датасет) присутствовали изображения как с большой, так и с низкой плотностью деревьев. В результате обнаружено 218 деревьев из 300 истинно присутствующих ($TP = 218$, $FN = 82$ пропущено). Количество ложных результатов распознавания составило 64 ($FP = 64$). По сравнению с традиционным методом TCDS, для выбранного участка нейросетевой метод CCDM показал увеличение F1-меры на 24% (до 0.75).

К тому же участку, что и в предыдущих экспериментах был применен комбинированный алгоритм, который предсказывает положения деревьев с модели CCDM, а маски и контуры крон строит с помощью локального водораздельного алгоритма. Пример сегментации с помощью комбинированного алгоритма представлен на рисунке 3. Можно видеть, что в случае, если баундинг-бокс правильно определен моделью, получившаяся маска кроны соответствующего дерева является достаточно точной. В противном случае, если размер баундинг-бокса значительно меньше истинного размера кроны, то маска также не охватывает крону полностью. При увеличении коэффициента увеличения баундинг бокса более чем в 1.5 раза данная проблема в целом решается, за исключением случая, когда соседние деревья имеют существенные различия в размере крон. В этом случае могут возникать дополнительные ошибки.

Для усовершенствования комбинированного алгоритма следует увеличить количество и точность обучающих данных, что в свою очередь повлечет за собой улучшение качества детектирования отдельных деревьев моделью Faster R-CNN. Также можно усовершенствовать пост-процессинг предсказанных нейросетевой моделью баундинг-боксов.

Заключение. Проведено исследование традиционных и нейросетевых методов решения задачи СКОД с использованием БПЛА ортофотопланов сверхвысокого пространственного разрешения. Реализованы традиционная модель TCDS на основе водораздельного алгоритма и нейросетевая модель CCDM с использованием Faster R-CNN для автоматического распознавания деревьев, построения баундинг-боксов крон, а также комбинированный метод для построения масок крон и их контуров. Проведены тестовые расчеты для изображений территории Павловского парка в осенний период. Разработана программа для полуавтоматической разметки обучающих данных модели CCDM, значительно ускоряющая ручную разметку. Для усовершенствования процесса валидации, предложена специальная метрика avg-M, в которой учитывается расстояние между центром кроны и центром предсказанного баундинг-бокса. Результаты сравнения показали превосходство нейросетевой модели CCDM по сравнению с традиционным подходом. Наибольшее повышение точности показано для изображений участков со смешанным типом древостоев. Для изображений хвойных древостоев оба подхода практически достигают точности, характерной для визуальной экспертной разметки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Отделения Московского центра фундаментальной и прикладной математики в ИВМ РАН (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2025-347).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gougeon F.A. Towards semi-automatic forest inventories using individual tree crown (ITC) recognition // Technology Transfer Note – Forestry Research Applications, Pacific Forestry Centre, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Victoria, BC, Canada, 2000. No. 22. 5 p.
- [2] Ke Y., Quackenbush L.J. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32, No. 17. P. 4725-4747.
- [3] Dralle K., Rudemo M. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos // Canadian Journal of Forest Research. 1996. Vol. 26, No. 7. P. 1228-1236.
- [4] Wulder M., Niemann K.O., Goodenough D.G. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery // Remote Sensing of environment. 2000. Vol. 73, No. 1. P. 103-114.
- [5] Wang L., Gong P., Biging G.S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2004. Vol. 70, No. 3. P. 351-357. DOI:10.14358/PERS.70.3.351.
- [6] Culvenor D.S. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery // Computers & Geosciences. 2002. Vol. 28, No. 1. P. 33-44.
- [7] Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. 3rd edition. London: Pearson, 2007. 976 p.
- [8] Leckie D.G., Gougeon F.A., Walsworth N., Paradine D. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis // Remote sensing of environment. 2003. Vol. 85, No. 3. P. 355-369.
- [9] Özcan A.H., Hisar D., Sayar Y., Ünsalan C. Tree crown detection and delineation in satellite images using probabilistic voting // Remote Sensing Letters. 2017. Vol. 8, No. 8. P. 761-770.
- [10] 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. Vol. 70. P. 88-98.
- [11] Wu W., Fan X., Qu H., Yang X., Tjahjedi T. TCDNet: tree crown detection from UAV optical images using uncertainty-aware one-stage network // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. P. 1-5.
- [12] Cai C., Xu H., Chen S. et al. Tree recognition and crown width extraction based on novel Faster-RCNN in a dense Loblolly pine environment // Forests. 2023. Vol. 14, No. 5. P. 863.

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕГИОНОВ С АКТИВНЫМИ ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ

Барановский Н.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Основные поражающие факторы лесного пожара в контексте социального ущерба – повышенная температура и вредные газообразные и дисперсные частицы. Настоящий проект посвящен воздействию углеродистых и сажевых частиц на дыхательную систему человека при активных лесных пожарах. Предлагается разработка математических моделей воздействия лесных пожаров на ткани человека. Такие математические модели могут быть использованы для специализированного программного обеспечения. Соответствующие программные средства могут быть интегрированы с медицинскими информационными системами в целях мониторинга здоровья населения.

Ключевые слова: медицинские информационные системы, лесной пожар, ткань человека, прогнозирование, тепломассоперенос.

ON THE DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION OF MEDICAL INFORMATION SYSTEMS FOR REGIONS WITH ACTIVE FOREST FIRES

Baranovskiy N.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The main damaging factors of forest fires in the context of social damage are elevated temperatures and harmful gaseous and particulate matter. This project examines the impact of carbon and soot particles on the human respiratory system during active forest fires. The development of mathematical models of the impact of forest fires on human tissue is proposed. Such mathematical models can be used in specialized software. The corresponding software can be integrated with medical information systems for public health monitoring.

Keywords: medical information systems, forest fire, human tissue, forecasting, heat and mass transfer

Настоящий проект посвящен воздействию углеродистых и сажевых частиц на дыхательную систему человека при активных лесных пожарах [1-3]. Именно эти факторы являются одной из причин обострения кардиореспираторных заболеваний и гибели пожарных и населения при нахождении на лесопокрытых территориях. Предложены новые математические модели тепломассопереноса в структуре углеродистых и сажевых частиц относительно малого размера и приповерхностных тканях дыхательных путей человека при воздействии поражающих факторов лесного пожара. Предлагается использовать общую теорию тепломассопереноса для формулировки физических и математических моделей теплового взаимодействия в системе «частица-живая ткань человека». Процессы тепломассопереноса в указанном объекте будут описаны системами уравнений в частных производных параболического типа с соответствующими начальными и граничными условиями. Для решения указанных уравнений будут использованы локально-одномерный и конечноразностный методы, а для решения разностных аналогов будет использован метод прогонки. Типичное распределение температуры в кожном покрове представлено на рисунке 1.

Кроме того, будет разработан вероятностный критерий (рисунок 2) воздействия эмиссии углеродистых и сажевых частиц от лесных пожаров на здоровье населения с использованием методов математической статистики и теории вероятностей.

Новые математические модели могут стать математическим содержимым новых медицинских информационных систем.

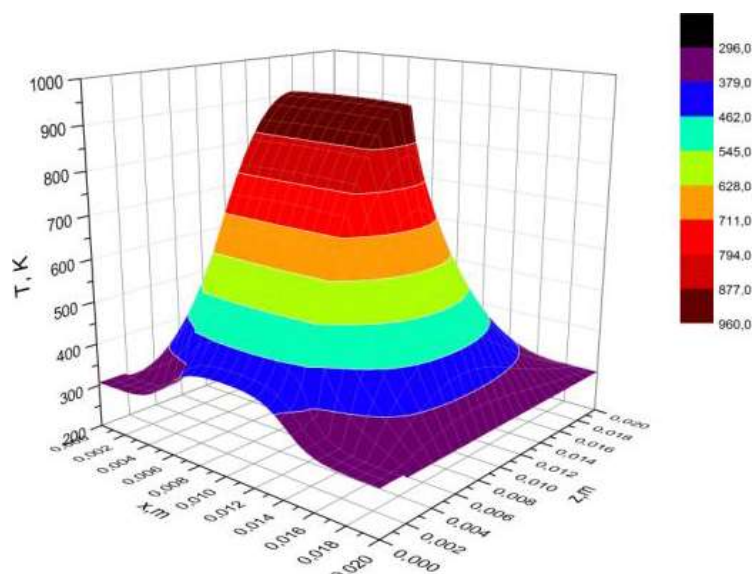


Рис. 1. Распределение температуры в кожном покрове.

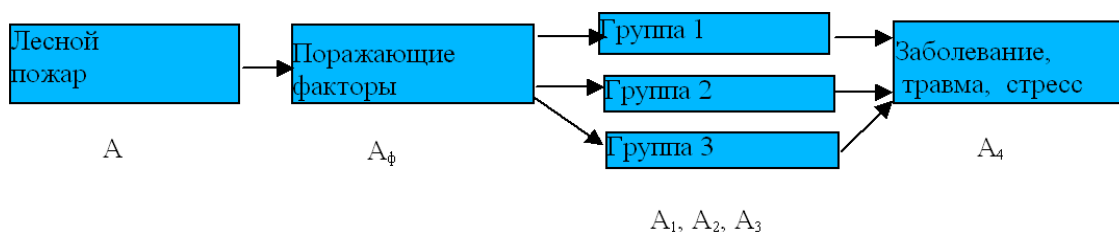


Рис. 2. Эстафетный механизм воздействия лесного пожара на человека.

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (грант № 25-21-00017, <https://rscf.ru/project/25-21-00017/>).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барановский Н.В., Барановская С.В., Исакова А.В. Методика оценки влияния лесных пожаров на здоровье населения // Пожарная безопасность. 2007. № 3. С. 71-74.
- [2] Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Закиров А.М., Качалкин В.А., Осипова Л.Э. Кинетика теплового поражения человека в чрезвычайных ситуациях // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 9. С. 30-36.
- [3] Dos Santos M. Climate change, air pollution, and human health in the Kruger to Canyons Biosphere Region, South Africa, and Amazonas, Brazil: a narrative review // Atmosphere. 2024. Vol. 15. P. 562.

ИССЛЕДОВАНИЕ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ И ФРАГМЕНТАЦИИ УГЛЕРОДИСТОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ЕЕ ВЫНОСЕ ИЗ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Барановский Н.В., Вяткина В.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Основные поражающие факторы лесного пожара – повышенная температура и вредные газообразные и дисперсные частицы. Проект нацелен на изучение воздействия углеродистых и сажевых частиц на дыхательную систему человека при активных лесных пожарах. Цель работы – математическое моделирование теплопереноса в углеродистой частице с учетом сажеобразования и ее фрагментации при выносе из фронта очага лесного пожара. Получены распределения температуры в частице, объемные доли сажевых частиц и определены количественные условия фрагментации углеродистой частицы.

Ключевые слова: сажеобразование, фрагментация, углеродистая частица, лесной пожар, тепломассоперенос, мониторинг, математическая модель.

STUDY OF SOOT FORMATION AND FRAGMENTATION OF CARBON PARTICLES DURING ITS REMOVAL FROM A FOREST FIRE FRONT FOR ECOLOGICAL MONITORING PURPOSES

Baranovskiy N.V., Vyatkina V.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The main damaging factors of forest fires are elevated temperatures and harmful gaseous and particulate matter. This project aims to study the impact of carbon and soot particles on the human respiratory system during active forest fires. The objective of this study is to mathematically model heat transfer in a carbon particle, taking into account soot formation and its fragmentation as it moves away from the forest fire front. Temperature distributions within the particle, volume fractions of soot particles, and quantitative conditions for carbon particle fragmentation are determined.

Keywords: soot formation, fragmentation, carbonaceous particle, forest fire, heat and mass transfer, monitoring, mathematical model.

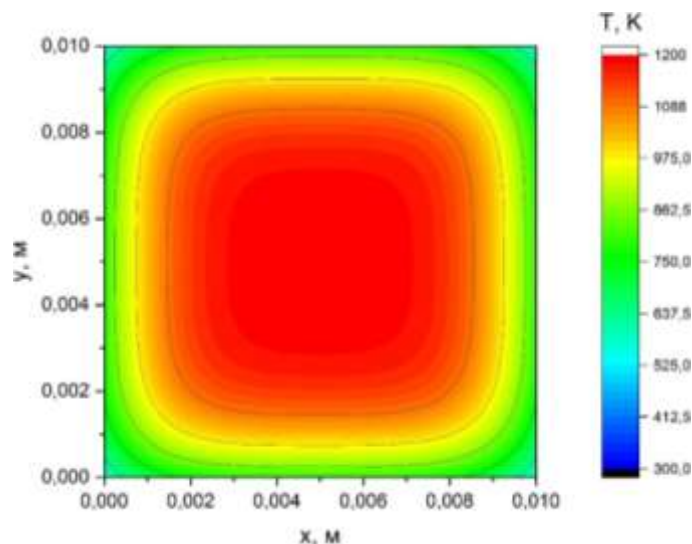
Основные поражающие факторы лесного пожара в контексте социального ущерба – повышенная температура и вредные газообразные и дисперсные частицы [1]. Настоящий проект нацелен на изучение воздействия углеродистых и сажевых частиц на дыхательную систему человека при активных лесных пожарах [2]. Именно эти факторы являются одной из причин обострения кардиореспираторных заболеваний и гибели пожарных и населения при нахождении на лесопокрытых территориях. Понятно, что необходима разработка методов, моделей и информационно-вычислительных систем для прогнозирования и оценки рисков социального ущерба для населения с использованием медицинских информационных систем. Эти аспекты обуславливают актуальность тематики предлагаемого проекта.

Цель настоящей работы – математическое моделирование теплопереноса в углеродистой частице с учетом сажеобразования и ее фрагментации при выносе из фронта очага лесного пожара. Предлагается использовать общую теорию тепломассопереноса для формулировки физических и математических моделей для исследования указанных процессов в углеродистой частице в процесс ее движения в атмосфере в приземном слое. Представлены одномерная и двумерная математические модели. Процессы тепломассопереноса в указанном объекте будут описаны системами уравнений в частных производных параболического типа с соответствующими начальными и граничными условиями. Для решения указанных уравнений будут использованы локально-одномерный и конечноразностный методы, а для решения разностных аналогов будет использован метод прогонки. Сам транспорт частицы в математической модели не учитывается. Воздействие внешней среды учитывается в граничных условиях на гра-

нице частицы с помощью граничных условий третьего рода. Кроме того, разработан вероятностный подход к оценке фрагментации углеродистой частицы в процессе ее движения в приземном слое атмосферы.

В результате сценарного моделирования получены распределения температуры в частице, объемные доли сажевых частиц и определены количественные условия фрагментации углеродистой частицы.

На рисунке приведен пример результатов расчёта температурных полей углеродистых частиц от различных типов лесных горючих материалов, образовавшихся во время разных типов лесных пожаров, в разные моменты времени.



Температурное поле углеродистой частицы из сосны размером 1 см во время огненного шторма во момент времени 10 секунд.

Анализ результатов показывает, что остывание более мелких углеродистых частиц происходит заметно быстрее, чем более крупных. Однако центральная часть относительно большой углеродистой частицы остается нагретой до начальной температуры в течение нескольких десятков секунд. Хотя уже частицы порядка 1 см могут иметь охлажденные приповерхностные слои до температур 650-700 К. Однако и этих температур, и запаса тепла частицы будет достаточно, чтобы при определенных условиях оседание такой частицы на наземном слое лесных горючих материалов привело к его возгоранию. Кроме того, были проведены численные расчеты для сценариев низового пожара высокой интенсивности, верхового пожара и огненного шторма. Сравнительный анализ результатов показывает, что наименьшие скорости остывания характерны для частиц, выбрасываемых с фронта низового лесного пожара низкой интенсивности. Это объясняется наименьшей скоростью их переноса шлейфом от лесного пожара в воздухе. Максимальные скорости остывания характерны для частиц, выделяющихся при возникновении огненного шторма. Так как в этом случае скорость удаления нагретых частиц будет максимальной.

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (грант № 25-21-00017, <https://rscf.ru/project/25-21-00017/>).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барановский Н.В., Барановская С.В., Исакова А.В. Методика оценки влияния лесных пожаров на здоровье населения // Пожарная безопасность. 2007. № 3. С. 71-74.
- [2] Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Закиров А.М., Качалкин В.А., Осипова Л.Э. Кинетика теплового поражения человека в чрезвычайных ситуациях // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 9. С. 30-36.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОТОКОВОЙ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ ПО СТЕРЕОПАРАМ РАЗЛИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

Представлена технология автоматической оценки высоты верхней границы облачности на основе стереоскопических наблюдений, реализованная для пар наблюдений различных космических аппаратов. Представлено описание технологии, её реализация, а также метод и результаты массового сравнительного анализа получаемых оценок высот с данными спутникового продукта CLTH (Cloud Top Height), показавшего их сопоставимую точность. *Ключевые слова:* стереопара, высота верхней границы облачности, Арктика-М, Himawari, Sentinel-3.

TECHNOLOGY OF STREAMING ESTIMATION OF CLOUD TOP HEIGHT BY STEREO PAIRS OF VARIOUS SPACECRAFT

Bril A.A., Burtsev M.A., Volkova E.E., Loupian E.A.
Space Research Institute RAS, Moscow

The paper presents the technology of automatic estimation of cloud top height based on stereoscopic observations implemented for pairs of observations from different spacecraft. A description of the technology, its implementation, as well as the method and results of mass comparative analysis of the obtained height estimates with the data of the CLTH (Cloud Top Height) satellite product, which showed their comparable accuracy, are presented. *Keywords:* stereopair, upper cloud boundary height, Arktika-M, Himawari, Sentinel-3.

Введение. Оперативная оценка высоты верхней границы облачности (ВГО) является одной из ключевых задач современной метеорологии. Традиционные методы, основанные на температурных профилях в инфракрасных каналах, эффективны до высот 8-12 км, но имеют ограничения на больших высотах из-за температурной инверсии в атмосфере. Лидарные методы обеспечивают высокую точность, но не позволяют получать единовременные поля облачности. Альтернативу составляют стереоскопические методы, основанные на одновременной съёмке с разных космических аппаратов, главным ограничением которых является требование строгой синхронизации наблюдений.

Цель работы заключается в разработке и верификации автоматического метода регулярного восстановления полей высот ВГО на основе стереоскопических наблюдений с различных космических аппаратов (КА), и реализации его для данных высокоэллиптического спутника «Арктика-М» [1] и геостационарного спутника Himawari-8/9, а также надирных и наклонных наблюдений со спутников серии Sentinel-3. Объектом интереса в нашем случае выступают Камчатка и прилегающие к ней территории.

Технология оценки высоты облачности по стереопаре. Метод восстановления высоты ВГО по одновременным съёмкам с разных КА основан на методе стереопары, то есть на вычислении трёхмерных координат объектов на основе анализа трёхмерных координат точек, из которых производятся наблюдения, углов, под которыми видны объекты из этих точек, и взаимных смещений оцениваемых объектов на изображениях [2,3].

Технология оценки высот реализована следующим образом: для всех поступающих данных автоматически формируются пары синхронных инфракрасных снимков, для каждой пары проводится предварительная обработка, поиск контрольных точек с помощью алгоритма SIFT [4], их фильтрация, вычисление высот по отфильтрованным точкам и запись результатов в специализированную базу данных [5].

Для формирования пар «Арктика-Himawari» используются данные приборов МСУ-ГС/ВЭ («Арктика-М») и АНІ (Himawari-8/9) в каналах 10.7 и 11.2 мкм соответственно. В силу особенностей съёмки приборов практически синхронные по времени пары составляют снимки в 15 (МСУ-ГС/ВЭ) и 20 (АНІ) минут, а также в 45 (МСУ-ГС/ВЭ) и 50 (АНІ) минут каждого

часа. Предварительная обработка подразумевает уравнивание пространственных разрешений снимков в силу их заметного различия (4 км – у «Арктика-М» и 2 км – у Himawari-8/9). Фильтрация контрольных точек производится с использованием трёх критериев: расстояние между сопоставленными точками должно быть менее 0.5° , пары точек должны совпадать по направлению смещения с другими парами, а также осуществляется фильтрация по порогу яркости для отделения облачности от поверхности Земли.

Пара Sentinel-3-Sentinel-3 (далее S3) формируется для каждого сеанса прибора SLSTR, для чего используются одновременные надирные и наклонные наблюдения в канале 10.85 мкм. Схема обработки таких пар отличается отсутствием предварительной обработки данных в силу идентичности камер, а также отсутствием фильтрации по расстоянию и направлению смещения из-за специфики входных данных.

С использованием данной технологии на текущий момент рассчитано несколько миллионов значений высот облачности.

Оценка точности метода. Для валидации полученных полей высот на базе языка программирования Python были реализованы автоматизированные процедуры сопоставления полученных высот по всем парам «Арктика-Himawari» и S3 с данными продукта CLTH, разработанного JMA [6,7]. Проанализированы массивы данных с ноября 2024 г. по апрель 2025 г. Для стереопары «Арктика-Himawari» было сопоставлено около 220 тыс. точек, для стереопары S3 – около 8 тыс., что объясняется гораздо меньшими зонами покрытия и частотой наблюдения КА Sentinel-3. Результаты анализа представлены на двумерных гистограммах сопоставления оценок полей высот ВГО по данным стереопар «Арктика-Himawari» (рисунок 1) и S3 (рисунок 2) с данными продукта CLTH. Из них видно, что для обеих стереопар достигается достаточно высокий коэффициент детерминации – около 0.67.

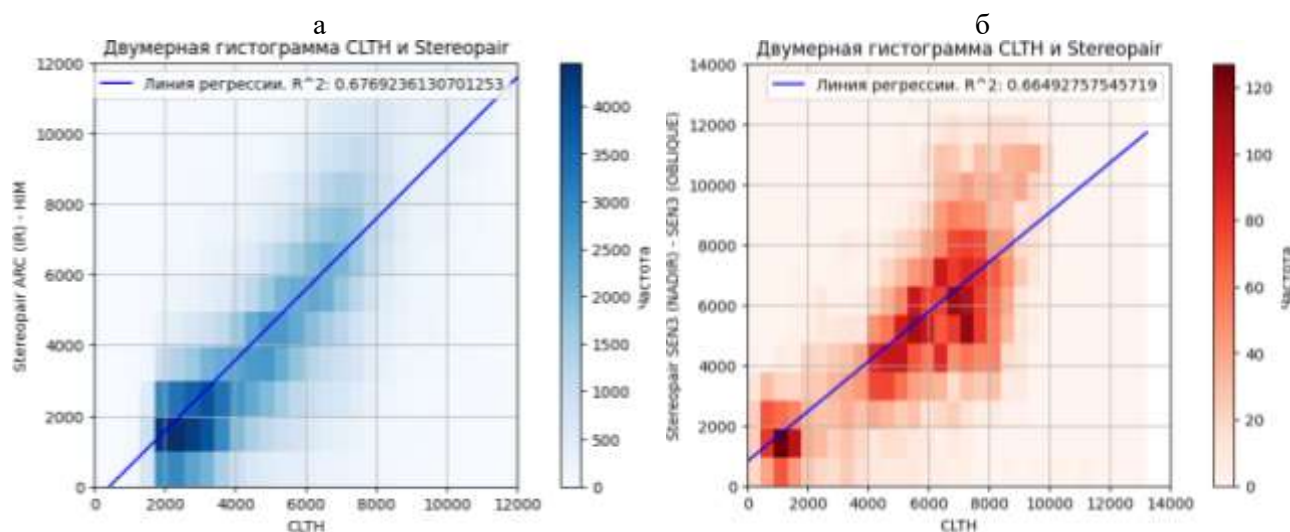


Рис. 1. Двумерная гистограмма сопоставления «Арктика-Himawari»-CLTH (а) и S3-CLTH (б).

Массовая верификация полученных результатов относительно стандартных продуктов для оценки высот ВГО на основе температурных методов показала, что:

- на малых высотах порядка 0-2000 метров данные, полученные по методу стереопары, слабо достоверны, что объясняется особенностями съёмочных систем, в частности, пространственным разрешением снимков, вынужденным закруглением данных Himawari-8/9 и качеством географической привязки данных для пары «Арктика-Himawari», для стереопары S3 – меньшей временной согласованностью наблюдений;
- на малых и средних высотах значения по стереопаре стабильно ниже, чем значения по CLTH;
- по мере роста высоты наблюдаемых объектов значения, полученные по методу стереопары, всё сильнее приближаются к значениям CLTH, и начиная с высот порядка 7000 м

становятся выше, чем CLTH, что предположительно объясняется зависимостью CLTH от температурной инверсии;

- значения, полученные по разным независимым стереопарам, достаточно хорошо согласованы между собой.

Заключение. В настоящей работе представлена разработанная и реализованная автоматическая технология оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных стереоскопических наблюдений с высокоэллиптического спутника «Арктика-М» и геостационарного спутника Himawari-8/9, а также наблюдений прибора SLSTR. Проведённый анализ показал, что предложенный метод позволяет получать поля высот облачности с высокой частотой обновления и точностью, сопоставимой с CLTH. Принципиальным преимуществом разработанного подхода является переход от единичных точечных измерений к массовому систематическому мониторингу высоты облачности. Метод значительно расширяет возможности оперативного мониторинга атмосферных процессов и чрезвычайных ситуаций. Для дальнейшей валидации метода необходимы дополнительные сравнения, в частности, с данными лидарных систем, таких как EarthCARE, а также проведение исследования сезонных зависимостей работы алгоритма по мере накопления массива обработанных данных.

За предоставленные данные спутников «Арктика-М» и Himawari-8/9 авторы выражают благодарность НИЦ «Планета».

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей Дальневосточного Центра НИЦ «Планета» и Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [8].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С. и др.* Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 12. С. 11-26. DOI:10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
- [2] *Argyriou V., Petrou M.* Photometric stereo: an overview // *Advances in Imaging and Electron Physics*. 2009. Vol. 156. P.1-54.
- [3] *Hasler A.F.* Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1981. Vol. 62, Is. 2. P.194-212.
- [4] *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. P. 91-110.
- [5] *Бриль А.А., Андреев А.И., Бурцев М.А. и др.* Новые возможности оценки высоты верхней границы облачности на основе синхронных наблюдений высокоэллиптических спутников «Арктика-М» и геостационарных спутников Himawari. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21, № 5. С. 387-396.
- [6] *Mouri K., Suzue H., Yoshida R., Izumi T.* Algorithm theoretical basis document for cloud top height product // *Meteorological Satellite Center Technical Note*. 2016. No. 61. P. 33-42.
- [7] *Huo, J., Lu, D., Duan, S. et al.* Comparison of the cloud top heights retrieved from MODIS and AHI satellite data with ground-based Ka-band radar // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13, No. 11. P. 1-11.
- [8] *Лузян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др.* 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.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ Г. КРАСНОЯРСКА

Володько О.С.¹, Лев Н.А.², Полянчикова Д.В.²

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

В работе предложена нейросетевая модель LSTM для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере г. Красноярск с использованием метеоданных с наземных постов мониторинга. LSTM показала лучшее качество прогноза при сравнении с регрессионными, временных рядов ARIMA и ARIMAX, ансамблевыми и бустинговыми моделями по метрикам $MAE \leq 1.63$ мкг/м³ и $R^2 \geq 0.99$. Наилучшие результаты достигнуты при сезонном разделении данных. Решение актуально для экологического мониторинга г. Красноярск.

Ключевые слова: $PM_{2.5}$, LSTM, временные ряды, загрязнение атмосферы, машинное обучение, модели прогноза, Красноярск.

NEURAL NETWORK TIME SERIES MODEL FOR FORECASTING POLLUTANT CONCENTRATION IN THE ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK

Volodko O.S.¹, Lev N.A.², Polaynchikova D.V.²

¹ Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk

The study proposes an LSTM neural network model for forecasting $PM_{2.5}$ concentration in the atmosphere of Krasnoyarsk using meteorological data from ground monitoring stations. Comparison with regression, time series models ARIMA/ARIMAX, ensemble and boosting models demonstrated the superiority of LSTM in terms $MAE \leq 1.63$ mkg/m³, $R^2 \geq 0.99$. The best results were achieved through seasonal data splitting. This solution holds practical significance for environmental monitoring in Krasnoyarsk.

Keywords: $PM_{2.5}$, LSTM, time series, air pollution, machine learning, prediction models, Krasnoyarsk.

Введение. Актуальность прогнозирования концентрации твердых взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в Красноярске обусловлена критическим уровнем загрязнения, влияющим на здоровье населения [1]. Спецификой города являются температурные инверсии, "запирающие" примеси в приповерхностном слое атмосферы, особенно в зимний период. Существующие системы мониторинга не обеспечивают возможности прогноза загрязнений, что требует разработки моделей для предупреждения населения и проведения превентивных мер.

Одними из наиболее эффективных и широко применяемых моделей прогнозирования загрязняющих веществ являются такие модели машинного обучения, как с регрессионные, временных рядов ARIMA и ARIMAX, ансамблевые и бустинговые модели, а также нейросетевые модели LSTM, которые показывают наиболее высокую точность прогноза [2,3].

Целью работы является создание нейросетевой модели LSTM для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере города Красноярск и сравнение качества прогноза с другими моделями машинного обучения.

Материалы и методы. Для прогнозирования были взяты данные наземных станций оперативного мониторинга [4] и метеоданные модели реанализа NCEP GFS [5] за 6 лет с 2019 по 2024 г. Использовались усредненные почасовые и посуточные данные по следующим датчикам: Николаевка, Овинный, Песчанка, Телевизорная и Ветлужанка. В этих районах датчики обычно показывают наиболее высокие концентрации $PM_{2.5}$, что является индикатором наличия загрязнений атмосферного воздуха в городе.

Также данные были разделены на временные периоды, в зависимости от величины концентрации $PM_{2.5}$, приблизительно соответствующие сезонам года [6]: зимний период (ноябрь – февраль); весенний период (март, апрель); летний период (май – июль).

В работе на основе модели рекуррентной нейронной сети LSTM проводился прогноз почасовых значений концентраций $PM_{2.5}$, который затем усреднялся за сутки. Модель LSTM (long short-term memory) представляет собой цепочку повторяющихся блоков, каждый из которых состоит из четырех слоёв, взаимодействующих между собой при помощи вентилях забывания, входа, выхода и внутреннего состояния [7].

Для оценки качества модели применялись следующие метрики качества: средняя квадратичная ошибка (MSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2).

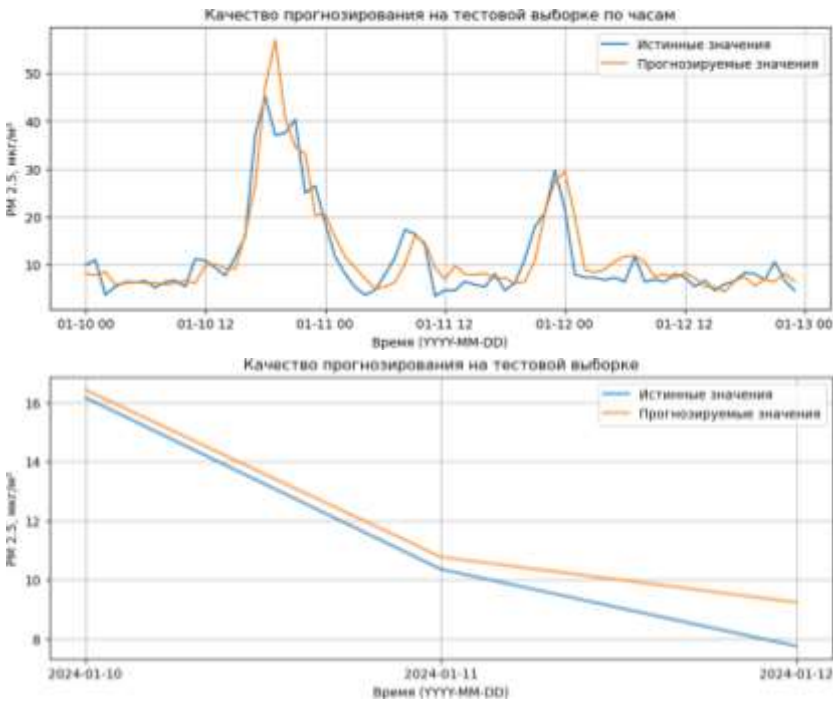
Результаты. Сравнение моделей машинного обучения между собой показало, что лучшее качество прогноза показывает модель временных рядов ARIMAX с добавлением метеопараметров в качестве экзогенных переменных [8]. LSTM превосходит конкурирующие модели на 68-85% по MAE . В таблице 1 представлено сравнение качества прогноза моделей LSTM и ARIMAX.

Табл. 1. Сравнение качества прогноза моделей LSTM и ARIMAX по метрике MAE .

Период прогнозирования		ARIMAX	LSTM	Период прогнозирования		ARIMAX	LSTM
20-22 декабря	2022	8.34	1.63	10-12 июля	2023	0.29	0.87
20-22 июля	2022	2.53	0.35	23-25 сентября	2023	4.77	0.84
12-14 августа	2022	3.09	1.61	23-25 октября	2023	5.26	0.82
10-12 марта	2023	5.43	4.05	10-12 января	2024	11.83	3.11
10-12 апреля	2023	3.81	0.72	10-12 февраля	2024	13.21	0.93
10-12 мая	2023	5.07	0.77	17-19 марта	2024	7.01	0.48

Табл. 2. Значения MSE для сезонной модели LSTM и при скользящем окне.

Временной период	Срез 1-2 месяца	Сезонная модель
Зима	366.82	247.87
Весна	103.12	64.27
Лето	35.35	35.07
Осень	29.89	29.64



Прогноз концентраций $PM_{2.5}$ за зимний период с 10 по 11 января 2024 г.: сверху – почасовой ($MAE = 2.92$; $R^2 = 0.79$), снизу – посуточный ($MAE = 0.72$; $R^2 = 0.93$).

Заключение. LSTM-модель показала максимальную эффективность для прогнозирования $PM_{2.5}$ в Красноярске, особенно в зимний период. Сегментация данных по сезонам улучшает точность примерно на 30%. Результаты внедряются в систему экологического мониторинга.

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». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 30.06.2025).
- [2] *Lin M.D. et al.* LSTM-based strategy for short-term prediction of $PM_{2.5}$ // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 906. P. 167892.
- [3] *Das R. et al.* High granular $PM_{2.5}$ forecasting: a comparative review // *Artificial Intelligence Review*. 2022. Vol. 55. P. 1253-1287.
- [4] Геопортал. Данные оперативного мониторинга. URL: <http://sensor.krasn.ru/sc> (дата обращения 30.06.2025).
- [5] NCEP GFS documentation. URL: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php (дата обращения: 21.06.2025).
- [6] *Volodko O.* Influences of meteorological conditions in $PM_{2.5}$ levels in Krasnoyarsk city atmosphere // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 392. P. 02022.
- [7] Нейросети для работы с последовательностями. Онлайн-учебник по машинному обучению. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/neiroseti-dlya-raboty-s-posledovatelnostyami> (дата обращения: 14.06.2025).
- [8] *Володько О.С., Лев Н.А., Полянчикова Д.В.* Прогнозирование величины концентрации загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска с помощью моделей машинного обучения // Материалы XI Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2024. С. 352-356.

ДИНАМИКА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Воронина П.В.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Работа посвящена анализу сроков установления, залегания и разрушения снежного покрова в Новосибирской области за период 2000-2025 гг. на основе спутниковых данных MODIS. Выявлены тенденции сокращения продолжительности зимнего сезона, увеличения периода залегания снега и ускорения фаз его установления и разрушения. Результаты согласуются с глобальными трендами, но демонстрируют региональную специфику, обусловленную континентальным климатом и ростом зимних осадков.

Ключевые слова: MODIS, обработка спутниковых данных, устойчивый снежный покров, сроки установления и разрушения снежного покрова.

SNOW COVER DYNAMICS ON THE NOVOSIBIRSK REGION FROM REMOTE SENSING DATA

Voronina P.V.^{1,2}

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

The study is devoted to the analysis of the timing of snow cover establishment, occurrence and destruction in the Novosibirsk Region for the period 2000-2025 based on MODIS satellite data. Trends toward a shorter winter season, an increase in the period of snow occurrence, and an acceleration of the phases of its establishment and destruction have been identified. The results are consistent with global trends, but demonstrate regional specifics due to the continental climate and increased winter precipitation.

Keywords: MODIS, satellite remote sensing data processing, snow cover, onset and destruction dates of snow cover.

Введение. Снежный покров является ключевым компонентом гидрологического цикла, играет ключевую роль в регулировании энергетического баланса Земли и поддержании экосистем. В условиях глобального потепления динамика снежного покрова становится важным индикатором климатических изменений. В Сибири таяние снега обеспечивает до 70% годового стока рек, что влечет повышенную уязвимость к климатическим изменениям [1,2]. Период залегания устойчивого снежного покрова, установление его осенью и разрушение весной являются важными этапами годового цикла, оказывающими влияние на энергетический и водный обмены в системе «почва-атмосфера», существенные последствия для экосистем холодных регионов. В ряде исследований [1-5] показано, что за последнюю четверть XX и начало XXI века в Северном полушарии произошло значительное изменение продолжительности снежного сезона, уменьшились площади снега весной и увеличились осенью и зимой. В Сибири и Центральной Азии [6] отмечается сокращение площади устойчивого снежного покрова, ускорение таяния снега из-за повышения температуры. Распределение снежного покрова, запаздывание или опережение сроков его установления и разрушения влияют на водообеспеченность территории, режим рек, формирование весеннего половодья, пополнение подземных вод, вегетационный период сельскохозяйственных культур, экономическое и экологическое развитие территории. Снежный покров в условиях изменяющегося климата Земли оказывает значительное влияние на региональную экономику, функционирование экосистем.

Данные дистанционного зондирования перспективны для мониторинга снежного покрова в связи с их широким пространственным охватом и регулярностью съемки. Для труднодоступных территорий и в местах, в которых отсутствуют метеостанции, привлечение спутниковых данных позволяет качественнее отслеживать динамику снежного покрова [7,8]. Использование данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения

Terra/MODIS несомненно обладает преимуществом, заключающемся в регулярной повторяемости съёмки и значительном охвате изучаемой, порой труднодоступной, территории.

В работе рассматривается период залегания снега от первого дня начала его установления на территории Новосибирской области до последнего дня обнаружения снега весной с выделением сроков установления и разрушения снежного покрова в качестве отдельных показателей. Одной из основных задач работы является получение климатических характеристик сроков установления и разрушения снежного покрова – средних и стандартного отклонения за 2000-2025 гг. по спутниковым данным MODIS на территории Новосибирской области.

Территория и материалы исследования. Как и в [9] территорией исследования является Новосибирская область, располагающаяся на юго-востоке Западно-Сибирской равнины [10-13]. В Новосибирской области, как и в целом в Западной Сибири, выражена весьма отчетливо широтная природно-климатическая зональность. В настоящей работе спутниковая информация отбиралась и обрабатывалась средствами облачной платформы для геопространственного анализа больших данных Google Earth Engine (GEE) [14].

Обсуждение результатов. Климат Новосибирской области резко-континентальный, с холодной и продолжительной зимой, которая длится около полугода. Зимний сезон делится на три периода: установление снежного покрова, залегание снега и разрушение снежного покрова.

На рисунке 1 представлена межгодовая изменчивость продолжительности зимнего сезона по спутниковым данным по Новосибирской области с зимы 2000-2001 гг. до зимы 2024-2025 гг. На диаграмме выделены все три периода от начала установления для каждой зимы. Средняя продолжительность сезона составляет 192 дня. Выделяются четыре короткие зимы с продолжительностью менее 178 дней (это среднее значение минус среднеквадратичное отклонение ± 14 дней) и четыре продолжительных зимы протяженностью более 205 дней (среднее значение плюс среднеквадратичное отклонение). Средним периодом установления снежного покрова для Новосибирской области является промежуток с 16 октября по 9 ноября (25 дней). В течение двух десятилетий прослеживается тенденция на более позднее начало установления снежного покрова и на более раннее его окончание, и в целом уменьшение длительности этого процесса по Новосибирской области.

Средняя продолжительность залегания снежного покрова по Новосибирской области составляет 145 дней. По двум десятилетиям выделяется тенденция на увеличение периода залегания снега по Новосибирской области, что согласуется с исследованиями [15] для Западной Сибири.

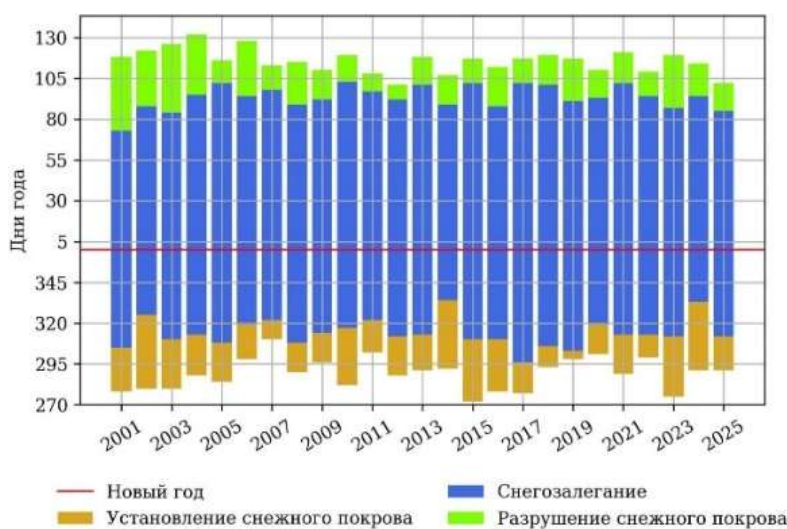


Рис. 1. Продолжительность зимнего периода по Новосибирской области с 2000 по 2025 гг.

Таяние снега в конце зимы это один из важнейших этапов сезонного цикла, влияющий на урожайность территории, ее водообеспеченность, формирование весеннего половодья. Опережение или запаздывание сроков схода снежного покрова территории может приводить

к образованию аномалий атмосферной циркуляции в весенний период [16]. Изучение изменений сроков разрушения снежного покрова и их особенностей – серьёзная задача для экономики региона. Процесс весеннего снеготаяния и разрушения устойчивого снежного покрова начинается в апреле и завершается окончательно в южных степных районах в конце апреля, в лесной зоне – в мае. Но в зависимости от характера зимних условий эти сроки могут сдвигаться на две недели или даже на месяц. По Новосибирской области средний промежуток окончания зимы это с 04.04 по 25.04 (22 дня).

Проведенный анализ сроков установления и разрушения снежного покрова в Новосибирской области согласуется с глобальными и региональными тенденциями, выявленными в современных исследованиях. Так, сокращение продолжительности зимнего периода и смещение сроков схода снега наблюдаются во многих северных регионах Евразии, что связано с усилением весеннего потепления [2,17]. Например, исследования [1,15,17] демонстрируют значительное сокращение периода залегания снежного покрова на севере Евразии с середины XX века, обусловленное ростом температур и изменением циркуляционных процессов.

Заключение. Снежный покров может рассматриваться как один из наиболее чувствительных индикаторов изменения окружающей среды. Климатообразующая функция заключается в возможности снежного покрова оказывать влияние на распределение некоторых климатических показателей на той или иной территории. Являясь «продуктом» климата, сам снежный покров оказывает влияние на компоненты климата: распределение солнечной радиации, температуру, атмосферное давление, влажность, циркуляцию воздуха.

В результате проведенных исследований по выявлению сроков установления, залегания и схода снежного покрова по данным дистанционного зондирования по Новосибирской области с 2000 по 2022 гг. выявлена направленность на сокращение зимнего периода, при этом прослеживается тенденция на сокращение периодов установления и разрушения снежного покрова, но период залегания снега увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Chen X., Liang S., Cao Y.* Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013 // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11. Art. No. 084002. DOI:10.1088/1748-9326/11/8/084002.
- [2] *Musselman K.N., Clark M.P., Liu C., Ikeda K., Rasmussen R.* Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7, No. 3. P. 214-219.
- [3] *Allchin M.I., Déry S.J.* A spatio-temporal analysis of trends in Northern Hemisphere snowdominated area and duration, 1971-2014 // *Annals of Glaciology*. 2017. Vol. 58, No. 75, Pt 1. P. 21-35, DOI: 10.1017/aog.2017.47.
- [4] *Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N.* Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6. Art. No. 045204. DOI:10.1088/1748-9326/6/4/045204.
- [5] *Masloumidis I., Dafis S., Kyros G., Lagouvardos K., Kotroni V.* Snow cover and depth climatology and trends in Greece // *Climate*. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 34. DOI:10.3390/cli13020034.
- [6] *Li H., Zhong X., Zheng L., Hao X., Wang J., Zhang J.* Classification of snow cover persistence across China // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 933. DOI:10.3390/w14060933.
- [7] *Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57, № 1. С. 25-33. DOI:10.15356/2076-6734-2017-1-25-33.
- [8] *Истомина Е.А., Максютова Е.В.* Возможность использования продукта MODIS «snow cover» для характеристики пространственной структуры снежного покрова Предбайкалья // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54, № 1. С. 66-72. DOI:10.15356/2076-6734-2014-1-66-72.
- [9] *Воронина П.В.* Сроки установления и разрушения снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2024. Т.4, № 1. С.69-77.
- [10] *Почвенно-климатический атлас Новосибирской области.* Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1978. 121 с.
- [11] *Западно-Сибирская низменность.* М.: География, 1963. 262 с.

- [12] *Кравцов В.М., Донукалова Р.П.* География Новосибирской области. Новосибирск: Инфолио-пресс, 1999. 205 с.
- [13] *Кузнецов А.В., Кузнецов Н.А.* Охотничьи угодья Новосибирской области. Новосибирск: Новосибирское книжное издательство, 1987. 232 с.
- [14] *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. Vol. 202. P. 18-27. DOI:10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [15] *Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А.* Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950-2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII, № 4. С 65-75.
- [16] *Вильфанд Р.М., Садоков В.П., Тищенко В.А.* О связи границы снежного покрова с интенсивностью циклонической деятельности в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 9. С. 32-39.
- [17] *Попова В.В., Полякова И.А.* Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936-2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Лёд и Снег*. 2013. Т. 53, № 2. С. 29-39. DOI:10.15356/2076-6734-2013-2-29-39.

ПОСТРОЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Воронкин Е.Ю.¹, Кикин П.М.², Колесников А.А.¹, Шарыпаев П.С.¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

² ООО «Газпромнефть-Региональные продажи», Санкт-Петербург

Объем, гетерогенность и мультимодальность пространственных данных создают серьезные вызовы для традиционных методов машинного обучения. В рамках исследования проанализированы существующие подходы к построению распределенных моделей машинного обучения, способных эффективно обрабатывать пространственные данные, находящиеся в разных географических или вычислительных узлах. Рассмотрены архитектуры распределенных вычислений, методы пространственного моделирования, а также вопросы обеспечения приватности, согласованности моделей и масштабируемости.

Ключевые слова: большие пространственные данные, распределенная обработка, хранилища пространственных данных, машинное обучение.

BUILDING DISTRIBUTED MACHINE LEARNING MODELS FROM SPATIAL DATA

Voronkin E.Yu.¹, Kikin P.M.², Kolesnikov A.A.¹, Sharypaev P.S.¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

² Gazpromneft-Regional Sales LLC, St. Petersburg

The volume, heterogeneity, and multimodality of spatial data pose significant challenges to traditional machine learning methods. This paper analyzes existing approaches to building distributed machine learning models that can efficiently process spatial data located in different geographic or computational nodes. It considers distributed computing architectures, spatial modeling methods, and issues of ensuring privacy, model consistency, and scalability.

Keywords: big spatial data, distributed processing, spatial data warehouses, machine learning.

Введение. Геопространственных данных становится все больше с точки зрения объемов и разнообразия, однако хранить, управлять, обрабатывать, анализировать, визуализировать и извлекать полезную информацию из них с помощью традиционных подходов на локальных машинах становится все сложнее с точки зрения требуемых ресурсов. И, как следствие, получается проблема сложности в построении эффективных распределенных моделей машинного обучения для географически распределенных данных.

Особенности построения распределенных моделей. Ключевыми аспектами распределенного машинного обучения являются:

- защита данных, в виде использования методов дифференциальной приватности, гомоморфного шифрования и применения ограничений на обмен сырыми данными между узлами с учетом стандартов на секретность картографических данных;
- согласованность моделей, базирующаяся на алгоритмах синхронизации (консенсусные протоколы, федеративная агрегация), а также проблемы расхождения значений одних и тех же параметров в распределенных системах.
- масштабируемость, реализуемая посредством оптимизация коммуникационных затрат и баланс между локальными вычислениями и глобальной моделью.

В исследовании приведен сравнительный анализ архитектур распределенных вычислений в виде федеративное обучение, распределенные графовые модели, edge computing на примере классических методов пространственного моделирования (геостатистика, пространственная интерполяция). Критериями сравнения были скорость обучения, точность и устойчивость результатов.

Заключение. По результатам экспериментов была сформирована сравнительная таблица с обобщенными показателями перечисленных подходов.

Общие выводы из сравнения:

- федеративное обучение подходит для задач, требующих высокой точности, но требует стабильного центрального сервера;
- распределенные графовые модели устойчивы к сбоям, но сложны в настройке и могут быть медленнее других;
- Edge Computing обеспечивает быструю обработку на местах, но страдает от недостаточной обобщающей способности моделей.

Перспективные направления дальнейших исследований представляются гибридные архитектуры, оптимизация процессов коммуникаций, формирование цифровых двойников территорий на основе рассмотренных подходов.

Различные значения по колонкам.

Критерий	Федеративное обучение	Распределённые графовые модели	Edge computing
Скорость обучения	Средняя (зависит от частоты агрегации)	Низкая (из-за сложности синхронизации графов)	Высокая (локальная обработка)
Точность	Высокая (глобальная модель)	Зависит от структуры графа (риск переобучения)	Средняя (локальные модели менее обобщённые)
Устойчивость	Средняя (зависит от центрального сервера)	Высокая (децентрализованная структура)	Высокая (отказоустойчивость edge-узлов)
Коммуникационные затраты	Высокие (частый обмен градиентами)	Средние (зависит от связности графа)	Низкие (минимальный обмен данными)
Приватность	Высокая (данные не покидают устройство)	Средняя (риск утечки в графовых связях)	Зависит от реализации (возможна локальная анонимизация)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Garov A.S., Karachevtseva I.P., Matveev E.V. Development of a heterogenic distributed environment for spatial data processing using cloud technologies // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. B4. P. 385-390.
- [2] Karna N., Supriana I., Maulidevi N. A survey on knowledge transfer between knowledge-based systems // Telkomnika. 2018. Vol. 16, No. 1. P. 265-273.
- [3] Guberović E., Alexopoulos Ch., Bosnić I., Čavrak I. Framework for federated learning open models in e-government applications // Interdisciplinary Description of Complex Systems. 2022. Vol. 20, No. 2. P. 162-178. DOI:10.7906/indecs.20.2.8.
- [4] Tripathi D. R., Deshlahare H. T., Markhande R. R. Edge-cloud continuum: integrating edge computing and cloud computing for IOT applications // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2024. Vol. 12, No. 10. P. 335-342. DOI:10.22214/ijraset.2024.64517.
- [5] Al-Gaashani M., Muthanna M. S. A., Abdukodir K. Intelligent system architecture for smart city and its applications based edge computing // 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2020. Brno, October 05-07, 2020. Brno: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 269-274. DOI:10.1109/ICUMT51630.2020.9222460.

МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЭМБЕДДИНГОВ В ВОПРОС-ОТВЕТНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Гавенко О.Ю.^{1,2}, Шашок Н.А.²

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

В обработке информации по экологическим исследованиям ключевым требованием к географическим эмбедингам – векторным представлениям пространственных данных – становится объединение гетерогенных данных: географических координат, экологических параметров и семантических признаков. В докладе обсуждаются методы интеграции таких данных для использования в вопрос-ответной информационной системе, обрабатывающей экологическую информацию.

Ключевые слова: обработка информации, географические эмбединги, вопрос-ответная информационная система.

METHODS OF INTEGRATING ENVIRONMENTAL DATA USING GEOGRAPHICAL EMBEDDINGS IN A QUESTION-ANSWER INFORMATION SYSTEM

Gavenko O.Yu.^{1,2}, Shashok N.A.²

¹ Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

In ecological information processing, the unification of heterogenous data such as coordinates, environmental parameters and semantic features is the key requirement for geographic embeddings, which are the vector representation of spatial data. This paper discusses possible methods of integrating such data within a question-answering information system designed for processing ecological information.

Keywords: information processing, geographic embeddings, QA information system.

Введение. В сфере экологических исследований обработка информации требует интеграции разнородных (гетерогенных) данных: географических координат, экологических параметров и семантических признаков. Географические эмбединги, или векторные представления пространственных данных, являются эффективным инструментом для решения этой задачи, в частности, при построении интеллектуальной вопрос-ответной системы, обрабатывающей экологическую информацию. Такие эмбединги могут обеспечить интеграцию географического контекста с моделями машинного обучения и искусственного интеллекта, повышая релевантность ответов на пространственно-ориентированные запросы пользователей.

Применение географических эмбедингов. Географические эмбединги применяются в задачах анализа пространственных зависимостей, таких как прогнозирование транспортных потоков [1], кластеризация локаций для рекомендательных систем или семантическая сегментация городских зон [2,3]. Их использование в вопрос-ответных системах позволяет обогащать ответы географическим контекстом, что критично для запросов, связанных с локализацией объектов, маршрутизацией или анализом пространственных закономерностей.

Алгоритмы генерации векторных представлений. Методы генерации географических эмбедингов зависят от целевых задач и ограничений данных. Такие алгоритмы, такие как Space2Vec [4], Place2Vec [5], Tile2Vec [6] и Loc2Vec [7], специализируются на трансформации пространственной информации в векторное пространство. Так, Place2Vec кодирует координаты, сохраняя информацию о пространственной близости объектов, хотя и игнорирует направление и стороны света, что может ограничивать применимость. Алгоритмы Tile2Vec и Loc2Vec ориентированы на решение задач кластеризации и классификации посредством генерации эмбедингов из небольших фрагментов карт или локаций.

В контексте экологических исследований ключевая задача заключается в эффективном хранении и интеграции гетерогенных данных для создания эмбедингов, указывающих на множество данных, связанных с одной территориальной единицей. Решению этой задачи могут способствовать подходы, аналогичные Loc2Vec, где мультисканальный тензор, представляющий фрагмент карты, кодирует совокупность информационных слоев. К базовым пространственным данным, описываемым авторами этого подхода, относятся дорожные сети, границы водных объектов и береговые линии.

Расширение кодируемой эмбедингами информации. Однако экологические параметры охватывают более широкий спектр информации: данные рельефа, атмосферы, биосферы, гидросферы и антропогенного воздействия, а также иные данные. Соответственно, возникает необходимость использования спутниковых снимков, гидрологических замеров или климатических моделей в качестве исходных данных. Это позволяет создавать эмбединги, с помощью которых можно осуществлять поиск данных для решения широкого круга экологических задач.

В частности, для того, чтобы данные, используемые для генерации эмбедингов, отображали полноту экологических характеристик конкретной территории, предполагается возможным дополнительное использование таких, практически неизменяемых характеристик рельефа, как высоты над уровнем моря и типы почв, поскольку эти данные определяют температурные градиенты, распределение осадков и стока, а также могут быть использованы для оценки эрозийных рисков и устойчивости склонов.

Дополнительной задачей при реализации вопрос-ответных систем является обработка динамических данных. Интеграция каналов с высокой временной изменчивостью, например, показателей уровня воды, концентрации газов или активных пожаров, требует разработки подходов, учитывающих временные ряды и зависимость от времени модели. Сложность также представляет объединение таких разнородных данных в эффективные мультисканальные эмбединги. Это влечет за собой необходимость адаптации существующих или разработки новых алгоритмов генерации эмбедингов, способных учитывать специфику изменяемых во времени экологических данных и задач, в которых возможно их применение.

Заключение. Таким образом, использование географических эмбедингов представляет собой эффективный подход для хранения, интеграции и анализа гетерогенных экологических данных в рамках вопрос-ответных систем при учете специфики поставленных задач принятия решений и предоставления ответов на основе имеющихся данных. Методы их генерации, основанные на интеграции информации из множества каналов, позволяют значительно повысить релевантность и контекстную осведомленность ответов системы. Перспективы развития лежат в области решения задач интеграции динамических данных, совершенствования алгоритмов для специализированных экологических сценариев и исследования возможностей искусственного интеллекта для комплексного пространственно-экологического прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Li Y., Yu R., Shahabi C., Liu Y. Diffusion convolutional recurrent neural network: data-driven traffic forecasting // International Conference on Learning Representations. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=SJiHXGWAZ> (дата обращения 18.06.2025).
- [2] Каледин А. Что. Гео. Когда. Гео-решения в индустрии. URL: <https://storage.yandexcloud.net/ds-ods/files/files/Каледин.pdf> (дата обращения 18.06.2025).
- [3] Танасевич П. Мультимодальные гео-эмбединги: методы, результаты и внедрение. URL: <https://storage.yandexcloud.net/ds-ods/files/files/Танасевич.pdf> (дата обращения 18.06.2025).
- [4] Mai G., Janowicz K., Yan B., Zhu R., Cai L., Lao N. Multi-Scale representation learning for spatial feature distributions using grid cells // International Conference on Learning Representations. 2020. URL: <https://openreview.net/pdf?id=rJljdH4KDH> (дата обращения 18.06.2025).
- [5] Zhai W., Bai X., Shi Y., Han Y., Peng Z., Gu C. Beyond Word2vec: an approach for urban functional region extraction and identification by combining Place2vec and POIs // Computers, Environment and Urban Systems. 2019. Vol. 74. P. 1-12.

- [6] *Jean N., Wang S., Samar A., Azzari G., Lobell D., Ermon S.* Tile2Vec: unsupervised representation learning for spatially distributed data // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 33, No. 1. P. 3967-3974.
- [7] Loc2Vec: learning location embeddings with triplet-loss networks. URL: <https://sentiance.com/loc2vec-learning-location-embeddings-w-triplet-loss-networks> (дата обращения 18.06.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАСКИ ОБЛАЧНОСТИ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

Голомолзин В.В., Чурсин В.В., Пермяков Е.В.

Сибирский центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Новосибирск

В работе рассмотрено детектирование облачности на спутниковых снимках в инфракрасном диапазоне. Предлагается методика на основе применения методов компьютерного зрения и кластеризации изображений с последующим определением классов, относящихся к облачности. Комплексное применение этих методов позволяет достичь точности близкой к нейросетевым решениям, при экономии вычислительных ресурсов и обеспечении интерпретируемости и быстрой адаптации к новым данным.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, метеорологические спутники, инфракрасные каналы, маска облачности.

APPLICATION OF COMPUTER VISION AND AUTOMATIC CLUSTERING METHODS TO CONSTRUCTING A CLOUD MASK IN THE IR WAVE RANGE

Golomolzin V.V., Chursin V.V., Permyakov E.V.

Siberian Center of State Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», Novosibirsk

The possibility of cloud detection on satellite images in the infrared wave range is discussed. A technique is based on the use of computer vision methods and image clustering with subsequent determination of classes related to the surface. The integrated use of these methods allows achieving an accuracy which is close to neural network solutions, while saving computing resources and ensuring interpretability and rapid adaptation to new data.

Keywords: remote sensing, meteorological satellites, infrared channels, cloud mask.

Введение. Задача детектирования облачности на спутниковых снимках является одной из ключевых в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Точная маска облачности важна для последующего анализа данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности. Обзор используемых методов для детектирования облаков разными сенсорами представлен в [1,2]. В последние годы для решения этой задачи чаще всего используется глубокое обучение (DL), особенно свёрточные нейронные сети (CNN), которые обеспечивают высокую точность [3,4]. Однако, обучение и эксплуатация DL-моделей приводят к присущим им недостаткам: требуются мощные вычислительные ресурсы и длительное обучение; необходимость в больших размеченных наборах данных, создание которых трудоемко, а перенос модели на новые сенсоры или регионы может потребовать нового обучения. Параметры обученной модели трудно интерпретируемы и не поддаются коррекции без дополнительного обучения. В данной работе рассмотрены методы, использующие библиотеки компьютерного зрения (CV) и автоматической кластеризации, которые могут служить эффективной и ресурсосберегающей альтернативой или дополнением к машинному обучению (ML) и, в частности, нейросетям, применительно к данным инфракрасных каналов метеорологических космических аппаратов (КА) серий «Электро-Л» и «Арктика-М».

Постановка задачи. Используемые в настоящее время методы формирования маски облачности [1,2] требуют дополнительных настроек в зависимости от времени года, точки стояния (для КА «Электро-Л») и характеристик подстилающей поверхности. При использовании методов ML дополнительные ошибки может вносить разметка больших наборов данных. В данной работе решалась задача разработки технологии создания маски облачности по данным ИК-каналов многозонального сканирующего устройства гидрометеорологического обеспечения (МСУ), устанавливаемого на КА серий «Электро-Л» и «Арктика-М», которая позволяет автоматически обрабатывать данные без дополнительных настроек за счет внутренней адаптации.

Конфигурации облаков на спутниковых изображениях видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов могут значительно отличаться. Изображение видимого диапазона образуется за счет отражения солнечных лучей от облаков. Инфракрасное изображение создается путем регистрации излучения, исходящего от облаков. Температура облака определяет диапазон длин волн с максимальной энергией, испускаемой облаком. Преимущества изображений видимого диапазона заключаются в том, что они имеют более высокое разрешение, лучше отображают текстуру облака и могут быть использованы для получения представления о толщине облака. Преимущества инфракрасной съемки в том, что ее можно использовать днем и ночью, в том числе для определения температуры и высоты облаков и особенностей земной поверхности. Однако, маски облачности в видимом и ИК-диапазонах могут значительно отличаться из-за разного физического механизма формирования изображений. Кроме того, важно исключить ошибки установки пороговых значений, разметки обучающей выборки и другие ошибки, вносимые при настройке человеком.

Для автоматизации задачи формирования маски облачности предложена комбинация методов, основанных на компьютерном зрении (библиотека OpenCV) и кластеризации (библиотека sklearn), представленных на языке Python.

Краткое описание технологии применения компьютерного зрения. Геостационарные КА серии «Электро-Л» и высокоорбитальные КА серии «Арктика-М» в настоящее время производят съемку с интервалом 15 или 30 минут. За это время облака, как правило, успевают сместиться относительно «неподвижной» подстилающей поверхности. Это позволяет выделить контуры облачных образований на снимке, используя текущий и предшествующий сеансы съемки. Такой подход дополнительно упрощает проблему определения границ облаков, так как визуальное восприятие облаков в видимом и инфракрасном диапазонах отличается, что сказывается при подготовке, например, данных для машинного обучения. Расчет маски облачности с использованием библиотеки OpenCV включает в себя:

- расчет модуля разности значений температур массивов изображений. Для КА «Арктика-М» массивы рассчитываются для одинаковой сетки координат;
- создание маски на базе порогового выделения изменений. Используется адаптивный порог, рассчитываемый по гистограмме в окрестности заданного окна (матрицы заданного размера);
- обнаружение контуров на бинарном изображении, используя функцию `cv2.findContours` в OpenCV [5]. Контуры соединяют непрерывные точки с одинаковой интенсивностью. Функция возвращает список контуров, каждый из которых представляет собой массив координат точек, составляющих контур, и иерархию контуров, описывающую их взаимосвязи;
- заполнение областей, ограниченных контурами с помощью функции `cv2.drawContours` с флагом `cv2.FILLED` вместо задания цвета.

Краткое описание технологии применения кластеризации. В практике обработки спутниковых данных широко применяются методы, использующие классификацию пикселей на основе фиксированных порогов по различным физическим величинам, например, яркостная температура в инфракрасном диапазоне, текстурным признакам и пространственным характеристикам. К основным недостаткам относят ограничение в достижении высокой точности во всех условиях окружающей среды из-за использования фиксированных порогов.

В отличие от классификации, где классы должны быть заранее определены на уровне статистических характеристик, кластеризация пикселей изображения — это группировка пикселей на основании их свойств без заранее заданных классов. Алгоритм сам формирует группы (кластеры) по сходству пикселей. Поэтому кластеризация изображений на заданное число классов позволяет разнести в разные классы различные типы облаков и подстилающей поверхности. Для формирования маски облачности достаточно производить разбиение на 8-10 классов. При этом 2-3 класса будут относиться к поверхности Земли.

Для определения конкретных номеров классов, относящихся к поверхности в каждом случае кластеризации, предложено находить пиксели в диапазонах температур вблизи максимальных значений на выбранных однородных участках земной поверхности значительной протяженности. К таким можно отнести участки мирового океана и суши с покрытием, близком к однородному, например, Аравийский полуостров, Гималаи, тундра. С учетом большой протяженности выбранных участков земной поверхности, полное покрытие облаками на этих участках практически исключается.

Алгоритм определения маски облачности включает в себя:

- формирование многомерного массива из выбранных ИК-каналов;
- кластеризацию с помощью функции `sklearn.cluster` библиотеки `sklearn`;
- нахождение индексов пикселей, которые отнесены к поверхности, не являющейся облаками из условия близости их температур к максимальной на выбранных тестовых участках изображения;
- определение номеров классов в массиве, полученном кластеризацией, не относящихся к облакам по найденным индексам и, соответственно, номера классов облаков;
- формирование двоичной маски облачности, присвоением значения «0» и «1» классам поверхности и облаков, соответственно.

Результаты. На рисунке 1 показано применение рассмотренных методов к данным КА «Электро-Л» № 3 за 19.05.2025г., сеанс 07.30 UTC.

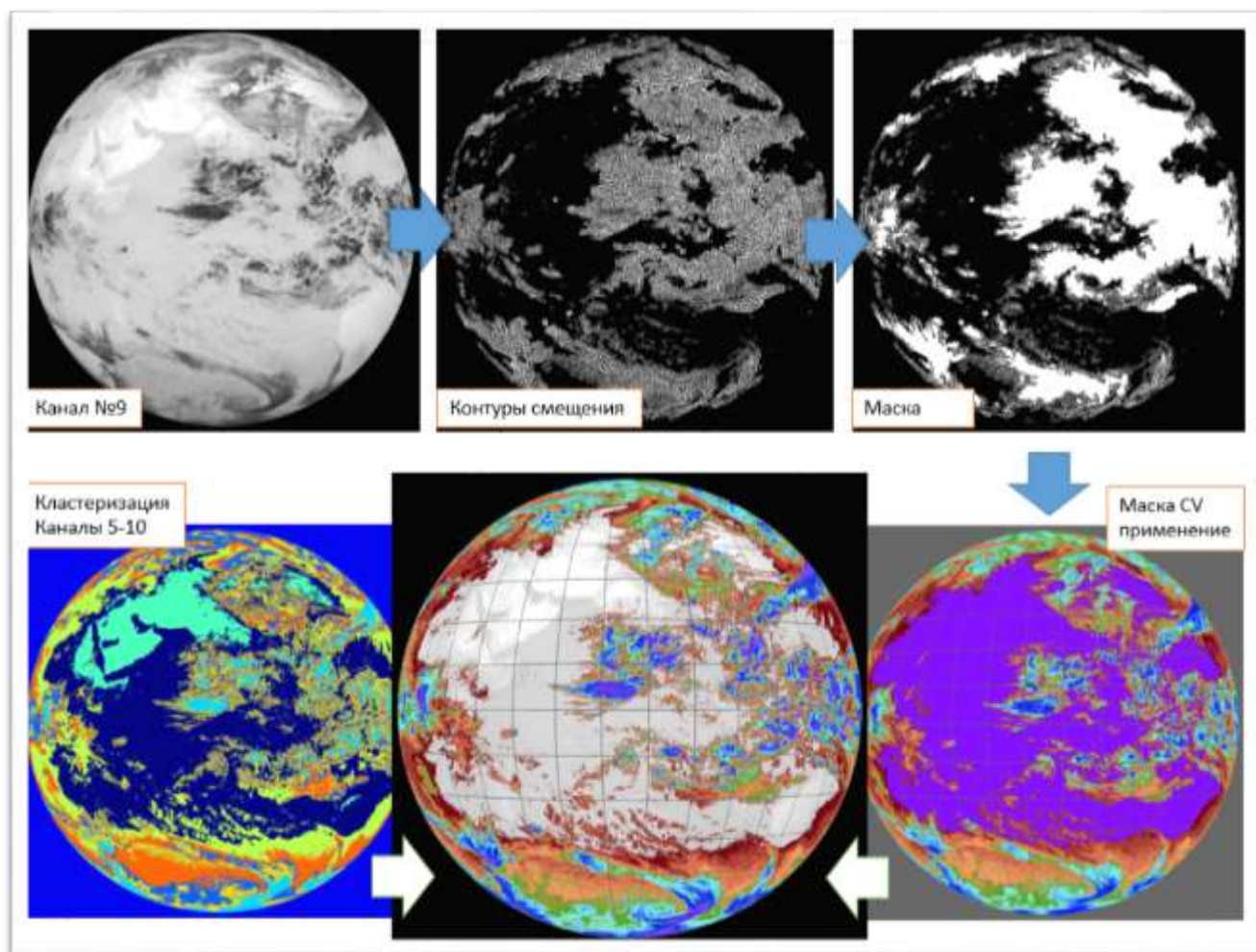


Рис. 1. Пример применения маски облачности для представления температуры верхней границы облака (ВГО).

Результаты выполненной работы показывают, что предложенные методы обработки для данных геостационарных КА серии «Электро-Л» и высокоорбитальных КА серии «Арктика-М», при сопоставимой точности обработки с помощью нейросетей, обеспечивают значительную экономию вычислительных ресурсов (обучение и инференс) и возможность быстрой адаптации к новым сенсорам или регионам. При этом алгоритмы легко интерпретируются и имеют понятный физический смысл.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Mahajan S., Fataniya B.* Cloud detection methodologies: variants and development – a review // *Complex & Intelligent Systems*. 2020. Vol. 6. P. 251-261.
- [2] *Chandran G., Jojy C.* A survey of cloud detection techniques for satellite images // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2015. Vol. 02, Is. 09. P. 2485-2490.
- [3] *Чурсин В.В., Косторная А.А., Голомолзин В.В.* Использование машинного обучения в задачах детектирования и мониторинга атмосферных явлений // Сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023)». Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С.174-180.
- [4] *Блощинский В.Д., Андреев А.И., Андреев Е.Э., Мальковский С.И.* Валидация алгоритмов детектирования облачности по данным геостационарных космических аппаратов // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 15.
- [5] Обнаружение контуров с использованием OpenCV – записки преподавателя. URL: <https://waksoft.susu.ru/2021/11/30/obnaruzhenie-kongurov-s-ispolzovaniem-opency> (дата обращения 02.06.2025).

ИВС УГЛЕРОД КАК ПРОТОТИП ИНСТРУМЕНТА АНАЛИЗА ПУЛОВ И ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ И БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Гордов Е.П.^{1,2}, Турчановский И.Ю.^{1,2}, Ахлестин А.Ю.¹, Богомолов В.Ю.^{1,2}, Генина Е.Ю.¹,
Гордова Ю.Е.¹, Рязанова А.А.¹, Титов А.Г.^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

Запланированный на 2060 год переход России на низкоуглеродную экономику требует достоверной оценки антропогенных и естественных источников и стоков парниковых газов на ее территории. Болота Западной Сибири вносят существенный вклад в региональный цикл углерода. Для оценки потоков и прогнозирования их изменений в первую очередь необходимы надежные наборы измеренных и рассчитанных на основе модели поверхности суши данных, описывающих гидротермические характеристики атмосферы, почвы и потоки парниковых газов. Для хранения получаемых больших архивных и потоковых данных, анализа и предоставления заинтересованным сторонам его результатов создается информационно-вычислительная система «Углерод» (<https://carbon.imces.ru>). Представлены предварительные результаты разработки прототипа тематической веб-ГИС и планы ее развития.

Ключевые слова: потоки парниковых газов, веб-ГИС, болота, информационно-вычислительная система.

ICT CARBON AS A PROTOTYPE OF A TOOL FOR ANALYSIS OF CARBON POOLS AND FLOWS IN FOREST AND SWAMP ECOSYSTEMS OF THE SOUTHERN TAIGA ZONE OF WESTERN SIBERIA

Gordov E.P.^{1,2}, Turchanovsky I.Yu.^{1,2}, Akhlestin A.Yu.¹, Bogomolov V.Yu.^{1,2}, Genina E.Yu.¹,
Gordova Yu.E.¹, Ryazanova A.A.¹, Titov A.G.^{1,2}

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

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

Russia's planned transition to a low-carbon economy by 2060 requires a reliable assessment of anthropogenic and natural sources and sinks of greenhouse gases on its territory. Western Siberian wetlands make a significant contribution to the regional carbon cycle. To assess flows and predict their changes, reliable sets of measured and calculated data based on the land surface model describing the hydrothermal characteristics of the atmosphere, soil and greenhouse gas flows are primarily needed. The Carbon information and computing system (<https://carbon.imces.ru>) is being created to store the resulting large archival and streaming data, analyze it and provide stakeholders with its results. Preliminary results of creation of a thematic web GIS prototype and plans for its development are presented.

Keywords: greenhouse gases fluxes, Web-GIS, bogs, information-computation system.

Для достижения целей Парижского соглашения необходимо оценить антропогенные и естественные источники и стоки парниковых газов на соответствующей территории. Для Западной Сибири болота вносят существенный вклад в региональный цикл углерода. Для оценки потоков и прогнозирования их изменений в первую очередь необходимы надежные наборы данных, описывающих гидротермодинамические характеристики атмосферы, почвы и потоков парниковых газов, как измеренные, так и рассчитанные на основе модели поверхности суши, что приводит к генерации больших архивных и потоковых данных. Для их хранения и анализа, а также для предоставления результатов заинтересованным сторонам требуется разработка соответствующей ИТ-поддержки.

Сообщаются предварительные результаты разработки решающей эти задачи информационно-вычислительной системы «Углерод» (<https://carbon.imces.ru>). Прототип основанной на

апробированном ранее подходе [1] системы состоит из пяти основных компонентов: структурированные архивы пространственных данных и их метаданные, цифровая тень водно-болотных экосистем на основе измеренных характеристик, вычислительное ядро, геопортал и веб-клиент ГИС. Цифровая тень болота описывает его инструментально измеренные биологические и геофизические характеристики, а также REST API (интерфейс прикладной программы) для доступа к базам данных интегрированы в систему с помощью разработанного пакета промежуточного программного обеспечения.

Программное обеспечение представляет собой инструмент для анализа данных, описывающих гидротермические характеристики, потоки тепла, влаги и углерода для болот юга таежной зоны Западной Сибири. Он состоит из следующих компонентов:

1. Модуль веб-доступа, реализующий унифицированный REST API для доступа к цифровой тени/двойнику как к единому объекту. Использование разработанного программного обеспечения позволяет клиенту обращаться к «цифровому двойнику», не вникая в тонкости структур данных на стороне сервера, а использовать для запросов известные параметры, такие как, например, наименование интересующей геофизической величины (температура почвы, влажность воздуха, поток углекислого газа и т.д.), требуемый уровень относительно поверхности земли (высота 2 м, уровень поверхности, глубина 30 см и т.д.), интересующий временной диапазон и географическая область.
2. Клиентское программное обеспечение на стороне геопортала прототипа системы, состоящее из серверного приложения на PHP и клиентских компонентов, реализованных на базе библиотеки ExtJS JavaScript. Проанализированные архивы включают наборы данных расчетов модели поверхности земли TerM [2], наборы данных инструментально измеренных характеристик и открытые наборы метеорологических и климатических данных.

Двухязычный (русский и английский) портал CARBON предоставляет доступ к базовой информации по проекту IMCES «Система мониторинга пулов и потоков углерода лесных и болотных экосистем южно-таежной зоны Западной Сибири», а также к разделу «Анализ», который ориентирован на квалифицированных пользователей, готовых выполнять расчеты и интерпретировать полученные результаты. В частности, раздел позволяет использовать программное обеспечение для анализа наборов данных, характеризующих гидротермический режим южно-таежной зоны Западной Сибири, а также потоки тепла и парниковых газов в болотах этого региона. Анализ проводится на персональном компьютере с доступом в Интернет. Портал постоянно развивается, возможны некоторые изменения в интерфейсе. Для облегчения работы с веб-ГИС-системой существует открытая демонстрационная версия с ограниченной функциональностью. Для ее использования необходимо выбрать в меню слева «Программное обеспечение», а затем «Веб-ГИС «Carbon 1.0 demo». Для полного доступа к процедурам обработки данных портала необходимо зарегистрироваться, обратившись к администратору сайта по адресу webmaster@scert.ru и получить логин и пароль. После получения логина и пароля можно авторизоваться, нажав на иконку «Гость» в правом верхнем углу окна. Ознакомиться с наборами данных и их характеристиками можно в пункте меню «Технические характеристики».

При проведении исследований и получении результатов с использованием системы Веб-ГИС «Carbon» (<https://carbon.imces.ru/climate>) ссылка на систему обязательна. Рисунки 1-3 иллюстрируют некоторые функциональные возможности веб-ГИС CARBON.

Работа выполнена при поддержке проекта ИМКЭС «Система мониторинга пулов и потоков углерода лесных и болотных экосистем южной таежной зоны Западной Сибири», являющегося частью ключевого инновационного проекта национального значения «Национальная система мониторинга динамики климатически активных веществ в наземных экосистемах Российской Федерации», а также программы фундаментальных исследований РАН ИМКЭС (проект FWRG-2021-0004) и государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.



Рис. 1. Стартовая страница системы.

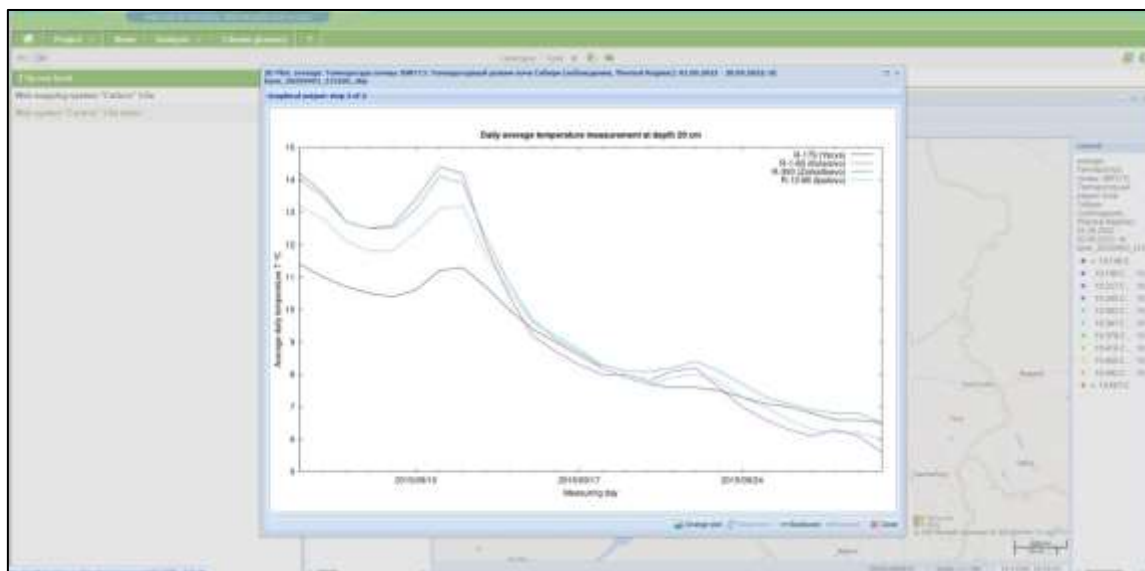


Рис. 2. Графики суточных температур почвы на глубине 40 см, измеренных на нескольких площадках.



Рис. 3. Средний поток метана за август 2020 г. болот юга Западной Сибири при выбранном уровне воды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *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, № 2. С. 132-135. DOI:10.15372/AOO20220208.
- [2] *Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Yu. Bogomolov V., Shangareeva S.K., Ryazanova A.A., Faykin G.M., Ryzhova I.M., Suiazova V.I., Debolskiy A.V., Chernenkov A.Yu.* Land surface scheme term: the model formulation, code architecture and applications // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2024. Vol. 39, No. 6. P. 363-377.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Гостева А.А.¹, Матузко А.К.², Якубайлик О.Э.²

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Задача получения корректной температуры поверхности Земли решается авторами работы уже более пяти лет, полученный за это время опыт показал, что для увеличения эффективности обработки спутниковых данных важным этапом является автоматизация этого процесса. По этой причине после успешного опыта в получении достоверной температуры поверхности Земли была поставлена задача в автоматизации процесса обработки. В работе будут описаны несколько вариантов для автоматизации получения температуры поверхности Земли по спутниковым данным Landsat 8/9 и TERRA/AQUA MODIS. В частности, рассматриваются такие инструменты автоматизации как использование готовых плагинов в программном обеспечении QGIS (Semi-Automatic Classification Plugin), использование геомоделей QGIS для упрощения процесса обработки больших массивов однородных данных, пакетная обработка снимков с низким пространственным разрешением. После прохождения всех вышеописанных этапов по обработке спутниковых данных для получения температуры поверхности Земли авторами было разработано программное обеспечение для данных Landsat 8/9.

Ключевые слова: MODIS, Landsat 8-9, гео модель, температура поверхности Земли.

AUTOMATION OF SPATIAL DATA PROCESSING TO OBTAIN EARTH SURFACE TEMPERATURE

Gosteva A.A.¹, Matuzko A.K.², Yakubailik O.E.²

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modelling of the SB RAS, Krasnoyarsk

The authors of this paper have been solving the problem of obtaining the correct temperature of the Earth's surface for more than five years. The experience gained during this time has shown that automation of this process is an important step in increasing the efficiency of satellite data processing. For this reason, after a successful experience in obtaining reliable temperature of the Earth's surface, the task of automating the processing process was set. The paper will describe several options for automating the procedure for obtaining the Earth's surface temperature using Landsat 8-9 and TERRA, AQUA (Modis) satellite data. In particular, such automation tools as the use of ready-made plugins in the QGIS (Semi-Automatic Classification Plugin) software, the use of QGIS geomodels to simplify the process of processing large arrays of homogeneous data, and batch processing of images with low spatial resolution will be considered. After passing all the above stages of processing satellite data to obtain the Earth's surface temperature, the authors developed software for Landsat 8-9 data.

Keywords: MODIS, Landsat 8-9, geomodel, Land surface temperature.

Введение. Современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают оперативный сбор данных о температуре земной поверхности, играющих ключевую роль в мониторинге климатических изменений, управлении агропромышленным комплексом, прогнозировании чрезвычайных ситуаций природного характера и пространственном планировании урбанизированных территорий. Однако обработка больших массивов спутниковой информации требует эффективных программно-технологических решений, автоматизации повторяющихся алгоритмов и навыков архивирования больших объемов данных. Файлы дистанционного зондирования требуют много дискового пространства, производительных компьютеров и специализированный опыт по их дешифрированию. В этой связи актуализируется задача разработки специализированного программного обеспечения (ПО), направленного на упрощение доступа к данным и автоматизацию их обработки. Авторами проведен анализ существующих методов расчета температуры земной поверхности по спутниковым данным, а также

апробированы различные подходы к их реализации. Установлено, что значительная часть вычислительных операций носит повторяющийся характер, что позволяет существенно оптимизировать процесс за счет внедрения автоматизированных алгоритмов, реализованных в рамках специализированного ПО или оригинальных программных решений.

Материалы и методы. Основными открытыми источниками данных для определения температуры поверхности Земли являются спутниковые снимки Landsat 8/9 и TERRA/AQUA MODIS. Спутниковые снимки Landsat 8/9 Collection 2 Level 2 Science Product (L2SP), научные продукты Landsat 2-ого уровня генерируются на основе входных данных 1-го уровня и включают необходимые вспомогательные входные данные для создания научно обоснованного продукта [1]. Научные продукты Landsat Collection 2 признаны на международном уровне как данные, готовые к анализу. Эта сертификация признает спутниковые данные, которые были обработаны в соответствии с минимальным набором требований и организованы в структуру, которая позволяет проводить немедленный анализ с минимальными усилиями пользователя и совместимостью как с течением времени, так и с другими наборами данных. Изображение использовано с разрешения CEOS [2]. Таким образом, на большую часть поверхности Земли данные спутников Landsat 8/9 можно применять без дополнительной обработки, но на некоторые территории нет полного покрытия, в частности, на территорию города Красноярска потеря составляет около 25% от площади города в местах постоянных тепловых аномалий. В рамках исследований был определен порядок действий для устранения потерь данных, который авторы описывали в своих предыдущих работах [3].

Данные MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) доступны с марта 2000 г. Спектрорадиометр 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 [4].

В работе использованы данные продукта MOD11A2, который содержит информацию о 8ми дневной температуре поверхности Земли и ее излучательной способности с пространственным разрешением около 1 км, полученные данные предоставляются с точностью 1°K [5].

Результаты. После анализа предметной области авторами были выделены основные группы повторяющихся операций, которые хорошо подходят для автоматизации определения температуры поверхности. В зависимости от поставленной задачи, исходных данных, компетенций исполнителя необходимо выбрать один из вариантов. Ручная обработка, создание гео-модели в QGIS, пакетная обработка BAT-файлом или разработка специализированного ПО.

При ручном вычислении температуры поверхности Земли использовался Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Это популярный плагин для QGIS, разработанный для работы с данными ДЗЗ, автоматизированной классификации спутниковых изображений. Плагин предоставляет инструменты для предобработки данных, такие как конвертация исходных данных в отражательную способность, атмосферная коррекция (например, методом DOS) и обрезка изображений по заданным областям интереса. В ручном режиме эта процедура была трудоемкой, требовала много времени, за счет большого количества ручных операций увеличивалась вероятность ошибок, и для новых данных было необходимо проходить всю цепочку действий повторно.

Когда авторами был накоплен большой опыт ручной обработки пространственных данных Landsat 8-9, была попытка частично автоматизировать обработку с помощью гео-моделей. Чтобы создавать гео-модели в QGIS, необходимо использовать модуль «The model designer», который находится во вкладке «Анализ данных» («Processing»). Любая модель состоит из трех основных условий, без которых она не может существовать: вход (input), алгоритмы

(algorithms) и выход (output). Этих блоков достаточно для реализации алгоритма по вычислению земной поверхности.

Подход с использованием геомоделей QGIS хорошо подходит для обработки однотипных данных [6]. Однако существенным недостатком этого метода является то, что воспользоваться им могут только опытные пользователи. Для преодоления этого ограничения авторами было разработано специализированное программное обеспечение. Специфика разработанного ПО заключается в том, что оно вычисляет температуру поверхности Земли только на основе данных дистанционного зондирования Landsat 8/9 Collection 2 Level 2 Science Product.

Применение ПО за счет автоматизации позволяет ускорить вычисление температуры и снизить ошибки, которые могут возникать при ручной обработке. Такой подход позволяет легко обрабатывать несколько сцен за один запуск, не создает множество лишних файлов. Интерфейс за счет своей понятности дает возможность получения данных даже не экспертам в ГИС технологиях, гарантия стандартизированные и точные результаты, и значительно повышает эффективность обработки данных.

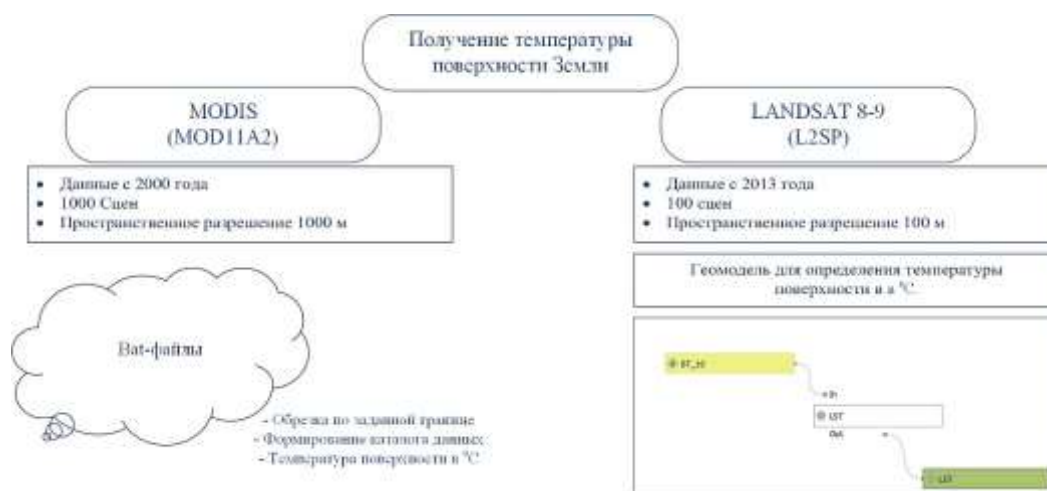


Рис. 1. Варианты получения температуры поверхности Земли.

ПО апробировано на коллекции данных Landsat 8/9 с 2013 года, что составляет больше 100 сцен только на территорию города Красноярска. Написанное ПО универсально и работает с любой территорией.

Коллекция MODIS на исследуемую территорию составляет порядка 1000 сцен, обработка готовых карт температуры поверхности, для этого была проведена предварительная обработка массивов геопространственных данных MODIS, GFS утилитами GDAL через BAT-файлы.

Заключение. В ходе проведённой работы авторами были успешно освоены и автоматизированы методы определения температуры поверхности Земли по данным дистанционного зондирования Landsat 8/9 и MODIS. Применение различных подходов, включая использование BAT-файлов для пакетной обработки, построение геомоделей пространственного распределения температур и ручную верификацию данных, позволило создать надежную методику анализа. Разработанное специализированное программное обеспечение значительно упрощает процесс обработки тепловых изображений и повышает точность расчетов.

Полученные результаты планируется применять для решения широкого круга практических задач. В городской среде методика может быть использована для выявления тепловых аномалий, связанных с эффектом «городского острова тепла», а также для создания карт локально-климатических зон с целью оптимизации планирования застройки и озеленения. В гидрологических исследованиях данные о температуре поверхности позволят отслеживать тепловое загрязнение водоемов, изучать динамику нагрева рек и озер, а также анализировать состояние прибрежных зон. Реализованные решения открывают новые возможности для мониторинга окружающей среды, климатических исследований и устойчивого территориального планирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25, No. 1. P. 261-274. DOI:10.1080/01431160310001164.
- [2] USGS. Landsat 8-9 collection 2 level 2 science products // U.S. Geological Survey. 2021. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products> (дата обращения 23.06.2025).
- [3] Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Алгоритм вычисления температуры поверхности для восстановления потери данных Landsat 8-9 collection 2 level 2 // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29, № 1. С. 318-329. DOI:10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329.
- [4] Мамаи 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 г. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. С. 113-117.
- [5] Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Version 3.3. NASA, 1999.
- [6] Автоматизируем QGIS с помощью GeoModeler // Cartetika. URL: <https://cartetika.ru/tpost/mhzvua6bo1-avtomatiziruem-qgis-s-pomoschyu-geomodel> (дата обращения: 07.07.2024).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЛАНДШАФТОВ НА ПРИМЕРЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Григорьева О.В., Спесивцева К.А., Терентьева В.В.

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

В работе изучается возможность использования сверточных нейронных сетей типа 1D-CNN для классификации природных территорий по спектральным характеристикам, зарегистрированным мультиспектральными съемочными системами в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах спектра. Проводится исследование влияния числа классов на точность обучения и предсказания нейронной сети. Предложен оригинальный подход к определению максимального числа классов природных элементов ландшафта, при котором сеть будет работать наиболее качественно. Он заключается в итерационном процессе добавления классов с помощью традиционных методов спектральной разделимости и позволяет существенно сократить время на разметку изображений и обучение нейронной сети. Показаны примеры реализации сети для сегментации мультиспектральных изображений, полученных с космического аппарата Sentinel-2 на территорию заповедника «Утриш» в Краснодарском крае.

Ключевые слова: мультиспектральные данные, датасет, нейронные сети, природные ландшафты.

APPLICATION OF DEEP LEARNING METHODS FOR LANDSCAPE CLASSIFICATION USING THE EXAMPLE OF MULTISPECTRAL SATELLITE DATA

Grigorieva O.V., Spesivtseva K.A., Terentyeva V.V.

A.F. Mozhaysky's Military-Space Academy, Saint Petersburg

The paper examines the possibility of using ultra-precise neural networks of the 1D-CNN type to classify natural territories according to spectral characteristics recorded by multispectral survey systems in the visible, near and short-wavelength infrared ranges of the spectrum. The influence of the number of the classes on the accuracy of learning and prediction of a neural network is being investigated. An original approach to determining the maximum number of classes of natural landscape elements is proposed, in which the network will work most efficiently. It consists in the integration process of adding classes using traditional spectral separability methods and significantly reduces the time spent on image markup and neural network training. Examples of network implementation for segmentation of multispectral images obtained from the Sentinel-2 spacecraft to the territory of the Utrish Nature Reserve in the Krasnodar Territory are shown.

Keywords: multispectral data, dataset, neural networks, natural landscapes.

Введение. В последние годы было проведено много исследований по методам классификации растительности с использованием технологий искусственного интеллекта. Данные исследования рассматривают как традиционные методы машинного обучения (Machine Learning, ML), так и методы глубокого обучения (Deep Learning, DL) [1].

Традиционные методы машинного обучения (такие как метод максимального правдоподобия, алгоритм случайного леса, метод опорных векторов, метод градиентного бустинга, дерево решений) хорошо интерпретируемы и требуют меньше вычислительных ресурсов, но зависят от качества информативных признаков, определенных вручную, и могут не выявлять сложные закономерности в данных. На фоне ограниченности производительности этих методов и их простоты широкое развитие получили методы глубокого обучения, для которых характерна более высокая степень автоматизации и больший уровень производительности. Методы DL, особенно сверточные нейронные сети (СНС), заслуживают отдельного внимания в вопросах решения задач классификации растительности по материалам ДЗЗ. Нейросетевые модели обучаются на многомерных и сложных наборах данных и могут фиксировать неочевидные закономерности и пространственные зависимости на изображениях. Преимуществом

алгоритмов DL является то, что извлечение глубоких информативных признаков объектов (которые к тому же могут быть нелинейными), происходит в процессе обучения, по сравнению с методами ML, где признаки необходимо извлекать вручную, при условии формирования репрезентативной пространственно-спектральной базы данных изучаемых объектов местности.

Нейросетевые технологии прочно вошли в современную жизнь, включая такие области науки, как цифровую обработку изображений с целью классификации, сегментации и обнаружения на них объектов. Методы глубокого обучения хорошо себя зарекомендовали при обработке RGB-изображений пространственного разрешения до 5-6 м в большинстве случаев для обнаружения антропогенных объектов. Для сегментации разнородных природных элементов ландшафта, не имеющих устойчивой формы и размеров, наиболее перспективно использование мультиспектральных (МС) изображений, которые предоставляют более богатую спектральную информацию об объектах и позволяют повысить точность сегментации для решения задач ландшафтного картирования [2]. Однако одним из основных факторов, сдерживающих успешное применение нейронных сетей для сегментации ландшафтов по МС данным, является более высокая размерность данных и вариативность спектральных характеристик природных объектов (в зависимости от сезона года и природно-климатических условий местности), что сильно затрудняет подготовку репрезентативного набора данных для обучения сети. От качества подготовки репрезентативного набора исходных данных (обучающего, тестового и валидационного) зависит точность прогнозирования модели на реальных данных, для чего должно быть выполнено подробное семантическое описание выбранных элементов ландшафта, отражающих свойства каждого класса [3]. При этом под классификацией в DL понимается несколько иное, чем в традиционных методах дешифрирования. Основные отличия связаны с формированием обучающей выборки. При классификации оценивается либо принадлежность фрагмента изображения какому-либо классу, но тогда теряются точные границы объекта, либо осуществляется попиксельная классификация по спектральным значениям яркости пикселя, отнесенного к объекту, в разных спектральных каналах МС изображения. Во втором случае теряется пространственная информация об объекте, которая является приоритетной при решении некоторых задач, особенно для данных съемки с высоким пространственным разрешением. Методы семантической сегментации в терминологии DL предлагают присвоению каждому пикселю определенной семантической категории, в соответствии с которыми должны быть размечены обучающие изображения с указанием границ классов для захвата пространственных признаков объектов, что достаточно трудозатратно, особенно для растительного покрова разных природно-климатических зон. Исключение составляют данные среднего пространственного разрешения (больше 10 м), подобные МС данным с космического аппарата Sentinel-2, Канопус-В и др., для которых в некоторых случаях допустимо использование методов классификации DL на уровне пикселей по спектральным характеристикам. Особенно это касается растительности, когда информация о пространственных характеристиках местности (сомкнутости крон, проективном покрытии и т.п.) теряется на уровне пикселей. При этом до конца остается неясным вопрос о глубине обработки данных, заключающийся в выборе количества классов, на которые сегментировать изображение (например, существующие карты природных заказников могут содержать до 30 растительных сообществ [3,4]). Решению этого вопроса посвящена данная работа, которая заключалась в:

- создании обучающего датасета, содержащего спектральные характеристики максимально возможного количества классов элементов ландшафтов.
- обучении нейронной сети и оценке точности обучения сети на разных количествах классов.
- исследовании влияния количества классов на точность обучения и прогнозе сети на реальных данных.

Исходные данные. В работе использовались мультиспектральные изображения территории заповедника Утриш, полученные с КА Sentinel-2. Спутник Sentinel-2 оборудован мультиспектральной камерой, работающей в видимом, ближнем инфракрасном (VNIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) спектральных диапазонах (от 443 нм до 2190 нм, всего 13

каналов) и обеспечивающей получение данные в пространственным разрешением 10-60 м. Заповедник Утриш находится на крайнем западе Северо-Черноморской провинции Большого Кавказа, характеризуясь преобладанием лесных предгорных и низкогорных ландшафтов. Горный характер местности обуславливает высотную поясность растительности заповедника. Здесь выделяют два высотных пояса: пояс ксерофитных средиземноморских формаций и пояс мезофитных широколиственных лесов.

В качестве исходной информации о распределении классов растительности для разметки мультиспектральных изображений была использована карта, представленная в [4]. Для изучения было выделено 24 класса элементов ландшафта. Для каждого класса были размечены 10-12 участков размером 10×10 пикселей. Размер тестовой выборки составил 20% от общего количества меток (рисунок 1).



Рис. 1. Спутниковое изображение территории заповедника Утриш с КА Sentinel-2 в естественных псевдоцветах (а), используемая для разметки карта распределения элементов ландшафта (б) и пример разметки (в)

Методы и алгоритмы.

1. Модель искусственной нейронной сети. В работе использовалась модель одномерной сверточной нейронной сети (1-D CNN), учитывающая только спектральную информацию об объектах. Вводилось допущение, что для МС данных со средним пространственным разрешением 20 м, к которому были приведены все спектральные каналы Sentinel-2, достаточно применять 1-D CNN, поскольку пространственная информация об объектах (текстурные и структурные признаки) в большинстве случаев теряется при таком разрешении на уровне пикселей. Сеть содержала два сверточных слоя с размерами ядра свертки равным 5 и 3, три полносвязных слоя, в качестве функции активации использовалась ReLU, применялась регуляризация во избежание возможности переобучения.
2. Алгоритм выбора количества разделимых классов ландшафта. Определение оптимального числа классов заключалось в итерационном процессе увеличения количества классов до тех пор, пока можно получать приемлемые показатели качества обучения и валидации НС. Схема алгоритма исследования приведена на рисунке 2.

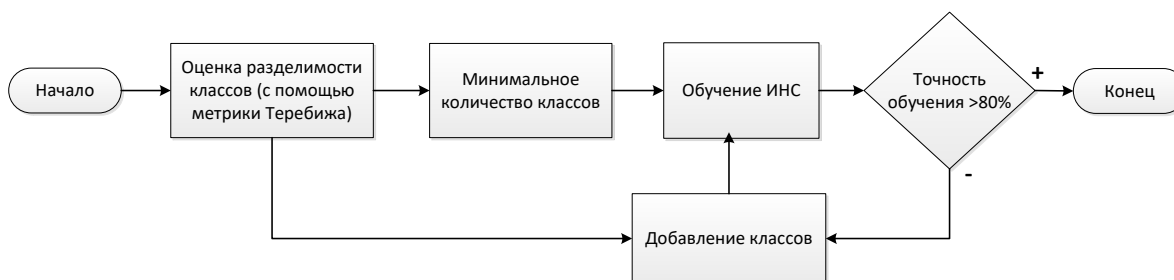


Рис. 2. Схема алгоритма определения оптимального числа классов для обучения НС.

В качестве показателей точности работы сети использовались метрика Overall accuracy (OA) и Mean intersection over union (mIoU). В статье приведены результаты работы нейронной сети для 3, 8 и 11 классов элементов ландшафта. Дальнейшее разделение классов не представлялось возможным и приводило к уменьшению точности работы сети. Добавление классов и очередность их обработки осуществлялись с помощью традиционных метрик спектральной разделимости классов, к которым относятся метрики Теребижа, Махаланобиса и др. [5,6]. Класс добавлялся в обучающий процесс, если его суммарная метрика была максимальной. При этом, если измеренные значения суммарной метрики для двух классов, входящих в одно растительное сообщество, были наибольшими, то классы объединялись. На рисунке 3 приведена матрица Теребижа для 11 классов.

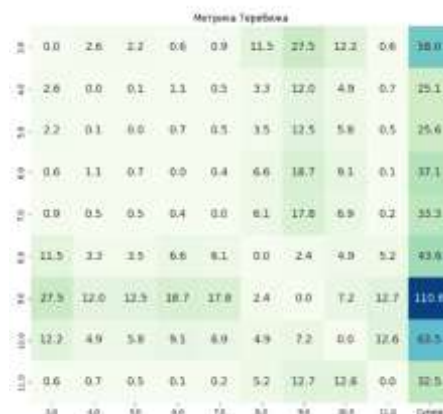


Рис. 3. Матрица расстояний Теребижа для 9 классов растительности, исключая классы пляжей, клифов, скал и водной поверхности.

На первом шаге было инициализировано три класса: в первый была включена вся растительность, к оставшимся двум отнесены вода и грунт с максимальной разделимостью. Показатель точности на валидационной выборке составил 85.7%, минимальное значение функции потерь составило 0.2. На последующих итерациях добавлялось по одному классу, имеющему максимальную разделимость с существующими с учетом рассчитанной метрики. Так, на пятой итерации были добавлены 3 класса (3, 10 и 11), и 3 класса, полученных путем объединения классов 4 и 5, 6 и 7, 8 и 9. Объединение обосновано, во-первых, тем, что эти классы относятся к одному растительному сообществу и, во-вторых, метрика Теребижа между ними самая маленькая. Таким образом, сеть обучалась на 8 классах. На следующей итерации разделялись 8 и 9 классы, так как метрика между ними была наибольшей, и сеть обучалась на 9 классах. На восьмой итерации добавилось еще 2 класса растительности и сеть обучалась на 11 классах, названия которых представлены в таблице 1.

Табл. 1. Перечень изучаемых 11 классов элементов ландшафта.

№ класса	Названия
1	Пляжи, клифы, скалы, осыпи
2	Водная поверхность
3	Буково-грабовые широколиственные леса
4	Грабинниково-пушистодубовые леса с ясенем и липой на вершинах
5	Грабинниково-пушистодубовые леса с ясенем и липой на склонах
6	Скальнотубовые леса и редколесья
7	Сосновые и дубово-сосновые
8	Грабинниково-пушистодубовые
9	Фисташково-можжевельниковые и можжевельниковые леса с дубом пушистым и ясенем
10	Антропогенно-измененная растительность (сорные и луговые виды)
11	Липово-скальнотубовые с грабинником и кизилом

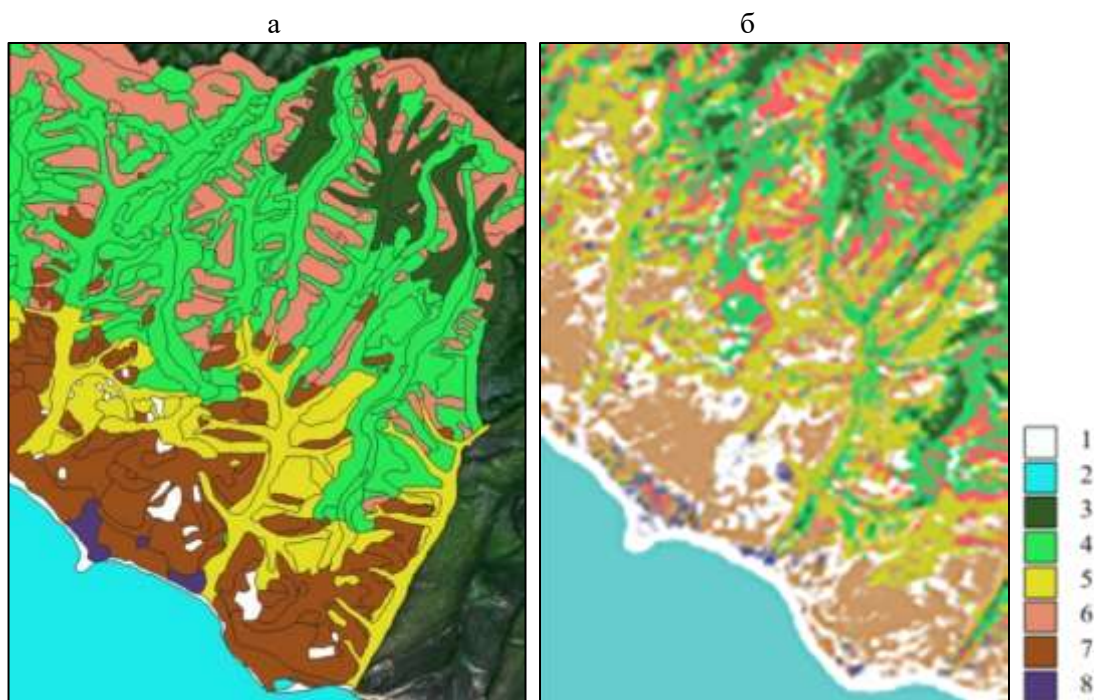


Рис. 4. Сегментация изображения на 8 классов: распределение классов по карте (а) и результат сегментации (б).

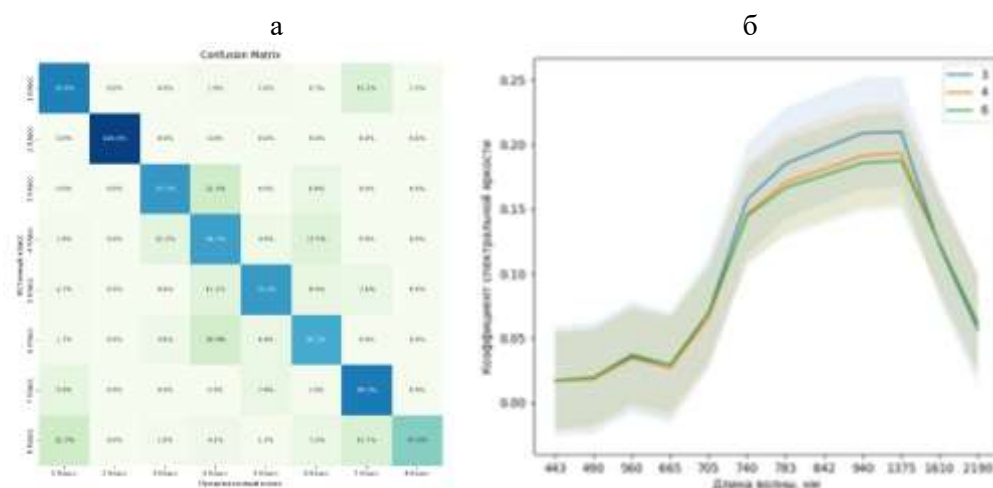


Рис. 5. Матрица ошибок (несоответствий) результатов работы НС для 8 классов (а) и график коэффициентов спектральной яркости классов 3, 4, 6 (б).

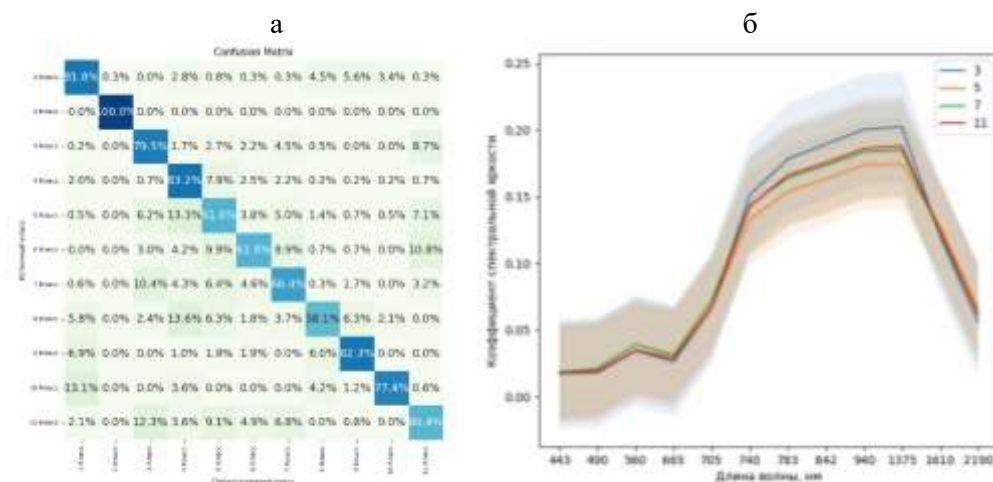


Рис. 6. Матрица ошибок (несоответствий) для 11 классов (а) и график коэффициентов спектральной яркости классов 3, 5, 7, 11 (б).

На всех итерациях контролировалась сбалансированность объема выборок между классами с целью предупреждения переобучения для какого-либо класса. Значения точности обучения сети на 5 классах снизились в сравнении с первыми итерациями. Показатель точности на валидационной выборке составил 74.5%, минимально значение функции потерь составило 0.6. На рисунке 4 показан пример результатов сегментации для 8 классов. Видно, что при сегментации изображения на 5 классов классы 4 и 6 не везде разделены нейросетью в соответствии с разметкой. Матрица ошибок показывает, что класс 4 определен как классы 3, 6 и в меньшей степени как класс 5 (рисунок 6,а). Из описания неразделяемых классов видно, что в них входят деревья, принадлежащие к одинаковым породам, следовательно, обладающие схожими спектральными характеристиками, что видно на графиках спектральных сигнатур на рисунке 5,б. При сегментации изображения на 11 классов элементы класса 6 определились как класс 11 (рисунок 6). При тестировании сети на 11 классах показатель точности на валидационной выборке составил 68%, минимальное значение функции потерь составило 0.85.

Выводы. При тестировании модели было выявлено, что точность оценки принадлежности класса к определенному виду растительности падает с увеличением количества классов. Показано, что при использовании 1D-CNN для выбора числа классов, на которые сегментируется изображение, можно использовать традиционные меры разделимости спектров. Доказательством этого также является сравнение суммарных значений метрики Теребижа и диагональных значений матрицы ошибок, коэффициент корреляции между этими показателями достигает 0.84 по результатам двух обучений ИНС (рисунок 7). Одинаково низкие значения этих показателей можно наблюдать для одних и тех же пар классов (см. рисунок 6,а и 3).

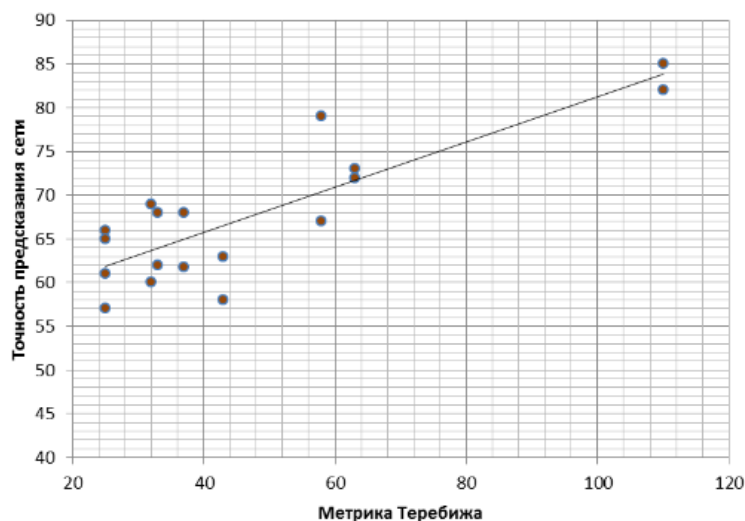


Рис. 7. График корреляции суммарных значений метрики Теребижа и диагональных значений матрицы ошибок, полученных в результате обучения 1D-CNN.



Рис.8. Результаты сегментации МС данных на 8 классов.

Результат работы применяемой сверточной сети показал, что по мере увеличения количества классов точность разделения на тестовой выборке упала от 85.7% до 69%, потери увеличились от 0.29 до 0.85, а показатель MIOU уменьшился от 77 до 52. На рисунке 8 представлены результаты наилучшей сегментации МС изображения Sentinel-2 на 8 классов природных элементов ландшафта. Чтобы достичь относительно высоких показателей сегментации для большого количества классов было увеличено количество эпох для обучения от 200 до 600, а также скорость обучения от 0.0003 до 0.0007. Так при сегментации МС данных на 11 классов точность сегментации снижается до 52% при 200 эпохах по сравнению с 70% при 600 эпохах. Отмечается, что дальнейшее увеличение данного гиперпараметра не приводит к значительному приросту точности.

С учетом того, что нейросетевые алгоритмы требуют больших объемов размеченных данных для обучения, при наличии спектральных характеристик элементов ландшафта сначала рекомендуется проводить исследования их разделимости, например, с помощью традиционных метрик расстояний. На сегодняшний момент спектральные характеристики растительности, собранные по результатам многолетних исследований в специальные базы данных [7,8], должны быть заблаговременно учтены при обучении нейронных сетей с целью сокращения времени на разметку данных, т.к. большое количество классов может привести к ухудшению показателей точности работы сети. Дальнейшие исследования будут направлены на определение количества классов при 3D-CNN сегментации (с помощью моделей ConvNeXt, Unetformer, DC-Swin, ST-UNet, DeepLabV3+ и ABCNet) путем исследования карт признаков (features map), отражающих не только спектральную, но и пространственную информацию об объектах [9,10]. Для эффективного использования такого подхода к классификации растительности на территории России должны быть созданы соответствующие базы данных изображений для обучения сети. При этом они должны собираться на региональном уровне за счет большого разнообразия природных ландшафтов страны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- [2] *Wang B., Yao Y.* Mountain vegetation classification method based on multi-channel semantic segmentation model // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 2. P. 256. DOI:10.3390/rs16020256.
- [3] Природная среда и биологическое разнообразие архипелага Березовые острова (Финский залив). СПб., 2007. 368 с.
- [4] Биоразнообразие государственного природного заповедника «Утриш». Научные труды. Т. 1. 2012. 340 с.
- [5] *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
- [6] *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- [7] *Чапурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. Ч. 1. МО СССР, 1986. 160 с.
- [8] *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
- [9] *Flood N., Watson F., Collett L.* Using a U-net convolutional neural network to map woody vegetation extent from high resolution satellite imagery across Queensland, Australia // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 82. Art. No. 101897. DOI:10.1016/j.jag.2019.101897.
- [10] *Московченко М.Д.* Использование свёрточных нейронных сетей для геопространственного моделирования породной структуры и таксационных характеристик лесов (на примере ХМАО – Югры) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 2. С. 75-93.

ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ МОДУЛЕЙ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В КЛИЕНТСКИХ ВЕБ-СИСТЕМАХ

Дергунов А.В., Малимонов М.И., Токарев А.В., Якубайлик О.Э.
Красноярский научный центр, Красноярск

Рассматриваются методы разработки интерактивных геоинформационных систем с использованием фреймворка Vue и вспомогательных библиотек, таких как OpenLayers, Chart.js, Apache Echarts и других. Описаны ключевые модули для работы с данными, включая их загрузку, обработку и преобразование, а также интеграцию с интерфейсом. Статья также затрагивает вопросы реактивности и взаимодействия между модулями клиентской части.

Ключевые слова: vue, openlayers, plotly, echarts, фреймворк, разработка.

THE APPROACH TO INTEGRATION OF SPATIAL DATA PROCESSING AND VISUALIZATION MODULES IN CLIENT WEB SYSTEMS

Dergunov A.V., Malimonov M.I., Tokarev A.V., Yakubailik O.E.
Krasnoyarsk Scientific Center, Krasnoyarsk

The methods of developing interactive geographic information systems using the Vue framework and supporting libraries such as OpenLayers, Chart.js, Apache Echarts and others are covered. Key modules for working with data are described, including loading, processing, and transforming them, as well as integrating with the interface. The article also touches on issues of reactivity and interaction between client-side modules.

Keywords: vue, openlayers, plotly, echarts, framework, development.

Введение. Современные технологии позволяют создавать сложные веб-приложения, способные отображать и анализировать большие объемы данных в реальном времени [1-4]. Примером таких систем являются Ventusky и Windy, которые предоставляют точные метеорологические данные, а также The World Air Quality Project, демонстрирующий уровень загрязнения воздуха по всему миру. Эти инструменты не только визуализируют данные, но и предлагают прогнозы, что делает их незаменимыми для исследователей и обычных пользователей.

Разработка подобных систем требует использования современных фреймворков и библиотек. В данной статье основным инструментом выбран Vue, который обеспечивает реактивность и удобную интеграцию различных компонентов. Дополнительно применяются библиотеки для работы с картами, создания графиков и другие вспомогательные инструменты.

Материалы и методы. Основным инструментом является фреймворк Vue. Фреймворк дает возможность связать воедино множество различных библиотек вместе и обеспечить их работоспособность. С помощью фреймворка создаются необходимые слои приложения, которые позволяют передавать данные между библиотеками и модулями приложения. По умолчанию, сторонние библиотеки не имеют функционала для работы с реактивностью (обновились данные – обновляется отображение и наоборот), реактивность и инструменты для привязки библиотек к данным предоставляет фреймворк Vue.

Следующим инструментом являются библиотеки готовых пользовательских компонент или UI-библиотеки. На самом деле библиотек такого рода огромное множество. Только оптимизированных под Vue последней версии вышло несколько десятков UI-библиотек. UI-библиотеки предоставляют готовые элементы интерфейса (кнопки, формы, таблицы, шаблоны страниц и т.д.) и логику работы этих элементов (например, у таблиц можно добавить «из коробки» кнопку «выделить все» и т.д.). На данный момент в моих проектах используются следующие UI-библиотеки: Primevue и Native UI.

Визуализация картографических данных реализовано через библиотеку Openlayers, которая позволяет создавать карты на основе программного интерфейса (API). Компонент карты привязывается к выбранному элементу веб-страницы, чаще всего это тег «div», в котором

Openlayers сделает рендер карты. Есть возможность добавить растровые или векторные слои, маркеры, подписи и другие элементы.

Для отображения данных используются библиотеки для создания графиков. Для создания простых графиков без каких-либо модификаций используется библиотека Chart.js. Если необходимо создать что-то сложное, то используются библиотеки Apache Echarts или Plotly.

Это основные инструменты, которые используются для разработки приложений. В зависимости от задач набор библиотек может меняться. Существует множество всяких дополнительных утилит и расширений для разработки: Pinia, Vue router, Json2csv и т.д.

Перейдем к основным модулям для работы с данными. Модули представляет собой классы, от которого создаются потомки с указанием типа потомка. Модули имеет ветвистую внутреннюю структуру, потому что разные данные необходимо запрашивать и обрабатывать по-разному, со своими уникальными параметрами.

Первый модуль – это модуль загрузки данных, который загружает данные из внешних источников и передает их на дальнейшую обработку. Одним из основных источников является система научно-исследовательского мониторинга Геопортала ИВМ СО РАН. В ней организован автоматический сбор, хранение и агрегация данных из разных источников об уровне загрязнения атмосферы города, почвы, воды. Доступ реализован через прикладной программный интерфейс (API) для интеграции с внешними информационными системами посредством веб-сервиса на основе REST подхода.

Второй модуль – модуль обработки данных. Данный модуль обрабатывает данные по заданному маршруту в зависимости от типа переданных данных. Для каких-то данных необходимо создать новую временную сетку, где-то необходимо проверить корректность присланных данных, где-то удалить участки данных, потому что существуют сильные отклонения или необходимо сделать интерполяцию данных и т.д.

Третий модуль – модуль преобразования данных. Данные получили, данные обработали теперь необходимо их преобразовать так, чтобы эти данные отдать библиотекам для визуализации. У библиотек есть свои требования для структур данных, под которые необходимо подстроиться. Данный модуль преобразует обработанные данные под необходимый формат.

Теперь перейдем к частям программы, которые написаны для фреймворка Vue. Модули выше друг о друге ничего не знают, теперь их необходимо объединить в единую цепочку вызовов. Для связывания данных, модулей и библиотек используются составные функции Vue. Составные функции отдают готовые данные для отображения и использования в сторонних расчетах (например, в расчете корреляции). В составных функциях прописывается логика реагирования на изменения данных и как правильно реагировать сторонним библиотекам на такие изменения. Внутреннее устройство выглядит следующим образом: есть реактивные переменные, которые передаются дочерним шаблоны Vue. Составные функции вызывают модули для запроса и обработки данных, затем изменяют реактивные переменные. Шаблоны Vue следят за изменениями реактивных переменных и при изменении вызывают функции для обновления данных в библиотеках.

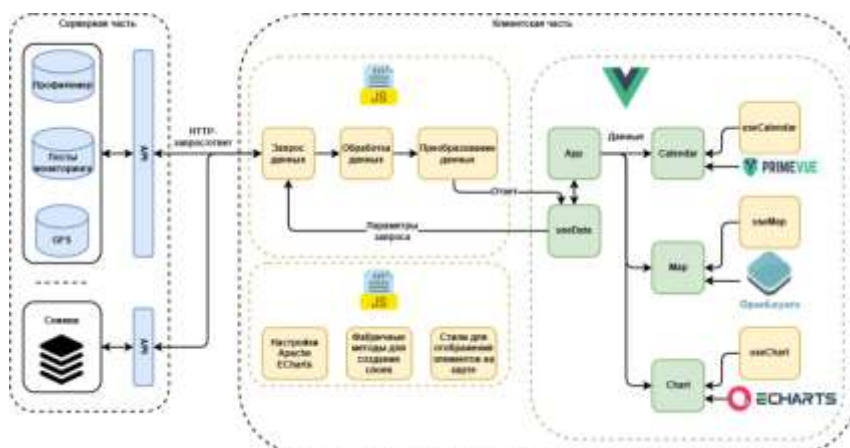


Рис. 1. Общая схема приложения.

На рисунке представлена общая схема приложения, состоящая из двух частей: серверной и клиентской. Серверная часть представляет собой множество различных баз данных и сервисов по выдаче данных, которые сгруппированы в единую точку доступа. Клиентская часть разбита на три группы: работа с данными, шаблоны и составные функции Vue, различные утилиты и вспомогательные элементы. Первая группа содержит первые три модуля для работы с данными. Вторая группа – это шаблоны Vue и составные функции (начинаются со слова «use»). Последняя группа – вспомогательные функции для работы.

Заключение. Разработана программно-технологическая архитектура для построения интерактивных геоинформационных систем, основанная на разделении функциональности и реактивных принципах. При этом использованы открытые стандарты, технологии и программные библиотеки. Примененные решения успешно зарекомендовали себя при создании ряда специализированных систем для анализа метеорологических и экологических данных [6-12]:

- 1) метеоинформация ИВМ СО РАН;
- 2) система мониторинга воздуха г. Красноярск;
- 3) данные температурного профилера;
- 4) система анализа температуры воздуха по данным МТП-5 и NCEP GFS;
- 5) сервис для хранения и обработки данных рефлектотрии и навигационных спутников;
- 6) геоинформационная система СФУ;
- 7) наземные данные спутников.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Songnian L. Advances in web-based GIS, mapping services and applications. CRC Press, 2011. 400 p.
- [2] Lobell D.B. A scalable satellite-based crop yield mapper // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 164. P. 324-333.
- [3] Bastin L. Open-source mapping and services for web-based land-cover validation // Ecological Informatics. 2013. Vol. 14. P. 9-16.
- [4] Sample J.T. Geospatial services and applications for the internet. US, Springer Verlag, 2008. 179 p.
- [5] Mari R. A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy) // Renewable Energy. 2011. Vol. 36. P. 754-763.
- [6] Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Веб-технологии для геоинформационной системы оперативной оценки загрязнения атмосферы и климатических условий в Красноярске // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов. 2017. С. 44-48.
- [7] Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Токарев А.В. Программно-технологическое обеспечение для визуализации спутниковых данных // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 11-1. С. 82-85.
- [8] Макаров Д.С., Харламов Д.В., Малимонов М.И. Оптимизация высоты расположения антенны при регистрации интерференционных рефлектограмм от ледового покрова с использованием сигналов навигационных спутников в диапазоне L1 // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 93-98. DOI:10.25743/sdm.2023.58.16.016.
- [9] Малимонов М.И., Якубайлик О.Э. Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилера // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 3. С. 41-49.
- [10] Макаров Д.С., Харламов Д.В., Малимонов М.И. Облачный сервис обработки данных рефлектотрии и радиопросвечивания сигналов навигационных спутников // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 99-103. DOI:10.25743/sdm.2023.22.13.017.
- [11] Малимонов М.И., Дергунов А.В. Сервис анализа метеоданных GFS и МТП-5 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, RU 2024666143, 10.07.2024.
- [12] Кадочников А.А., Малимонов М.И., Токарев А.В., Якубайлик О.Э., Заворуев В.В. Программа аналитической обработки данных температурных профилеров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023664585, 05.07.2023.

ЦИФРОВОЙ АТЛАС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Захарова Н.Б., Пармузин Е.И.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

Цифровой атлас «ИВМ РАН – Черное море» представляет собой веб-ГИС платформу для комплексного анализа термогидродинамических характеристик морской среды. Разработка сочетает результаты моделирования по модели INMOM с вариационной ассимиляцией данных спутниковых наблюдений и еженедельных вертикальных профилей, что обеспечило высокую точность воспроизведения гидрофизических полей. Система предоставляет интерактивные инструменты для визуализации пространственно-временной изменчивости температуры на 27 глубинных уровнях (1-2000 м) с месячным разрешением за 2015-2023 гг. Реализованные функции включают построение вертикальных профилей, анализ сезонной динамики и сравнение многолетних тенденций.

Ключевые слова: Черное море, дистанционное зондирование, численное моделирование, веб-атлас, мониторинг окружающей среды.

DIGITAL ATLAS FOR MONITORING AND ANALYSIS OF THE BLACK SEA ENVIRONMENT

Zakharova N.B., Parmuzin E.I.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Moscow

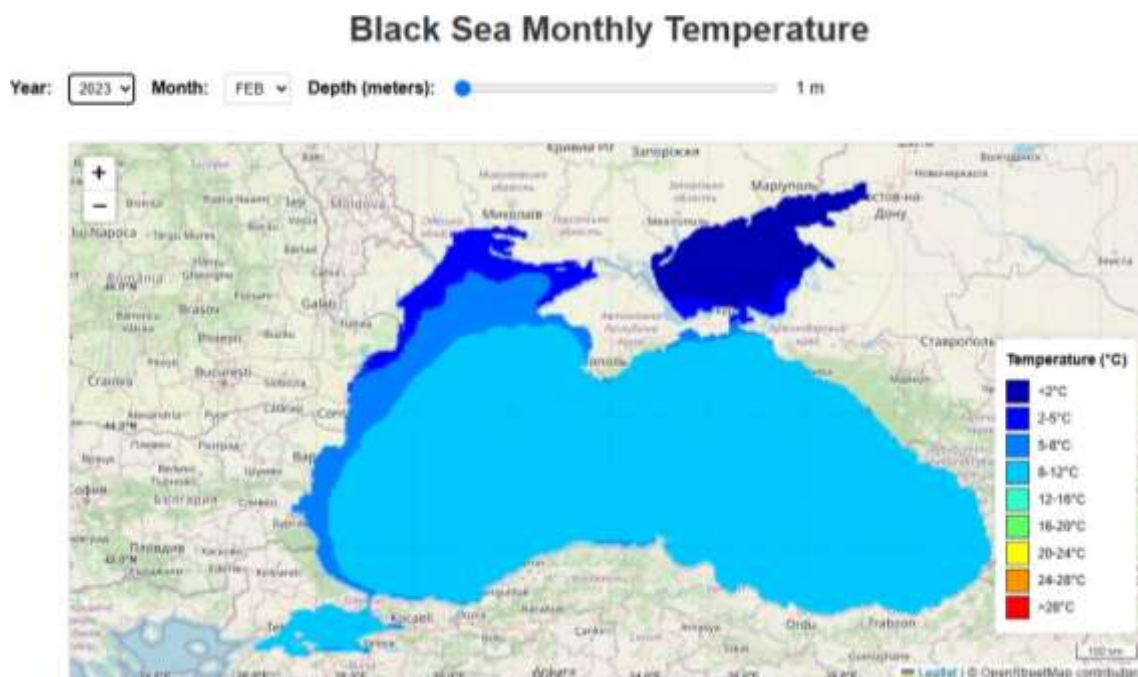
The INM RAS – Black Sea Digital Atlas represents a web-GIS platform for comprehensive analysis of thermohydrodynamic characteristics of the marine environment. The development integrates modeling results from the INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) with variational assimilation of satellite observation data and weekly average profile data, ensuring high accuracy in reproducing hydrophysical fields. The system provides interactive tools for visualizing spatiotemporal temperature variability across 27 depth levels (1-2000 m) with monthly resolution for the period 2015-2023. Implemented functionalities include vertical profile generation, seasonal dynamics analysis, and comparison of multi-year trends.

Keywords: Black Sea, remote sensing, numerical modeling, web-atlas, environmental monitoring.

Современные методы мониторинга морской среды требуют комплексного подхода, объединяющего данные дистанционного зондирования Земли и результаты численного моделирования. В работе представлен цифровой атлас Черного моря, разработанный как специализированный веб-инструмент, обеспечивающий интерактивный доступ к термогидродинамическим характеристикам акватории за период с 2015 по 2023 год. Система сочетает научную точность расчетов с удобными средствами визуализации, предлагая исследователям и практикам эффективный инструмент для анализа состояния морской среды.

Основу разработки составляет численная модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1], дополненная алгоритмами вариационной ассимиляции данных [2]. Для обеспечения высокой достоверности результатов использованы спутниковые измерения температуры поверхности моря с приборов MODIS (установленных на платформах Aqua и Terra) и VIIRS (спутник Suomi NPP), предоставленные ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [3], а также профильные наблюдения, усредненные по недельным интервалам [4].

Техническая реализация системы основана на современных веб-технологиях, включая библиотеки Leaflet для картографической визуализации и Chart.js для построения аналитических графиков. Архитектура атласа организована по трехуровневому принципу. На уровне данных используются файлы формата GeoTIFF, содержащие информацию о температурных полях на различных глубинах. Обработка и интерпретация данных осуществляется с помощью специализированных JavaScript-библиотек, в частности GeoTIFF.js для работы с растровыми данными.



Страница Атласа с температурой Черного моря за февраль 2023 г., глубина 1 м.

Пользовательский интерфейс предоставляет интерактивные инструменты для анализа (визуализация среднемесячных полей температуры на разных глубинах, вывод статистических характеристик и графиков), включая возможность построения вертикальных профилей температуры в любой точке акватории. Пользователи могут исследовать пространственное распределение температуры Черного моря, сравнивать данные за разные периоды, анализировать сезонную и межгодовую динамику параметров. Система поддерживает визуализацию данных с дискретной цветовой шкалой (см. рисунок), что позволяет четко выделять температурные зоны. Реализованные механизмы обработки и представления данных обеспечивают высокую информативность и удобство работы с системой.

В дальнейшем планируется расширение функциональных возможностей за счет добавления новых параметров (соленость, течения), а также добавления сезонных и годовых полей. Перспективы развития системы включают реализацию инструментов для прогнозирования изменений морской среды и усовершенствование пользовательского интерфейса. Дополнительные возможности могут включать модернизацию пользовательского интерфейса и создание тематических модулей для решения конкретных научных и прикладных задач.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-71-20035).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н. Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // Известия РАН, физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6, С. 699-716.
- [2] Агошков В.И., Шутяев В.П., Пармузин Е.И., Захарова Н.Б., Шелопут Т.О., Лезина Н.Р. Вариационная ассимиляция данных наблюдений в математической модели динамики Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 585-599.
- [3] Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычуглов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5, С. 263-284.
- [4] Guinehut S., Dhomp A.-L., Larnicol G. and Le Traon P.-Y. High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations // Ocean Science. 2012. Vol. 8. P. 845-857.

СИСТЕМЫ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Кабанов А.А.^{1,2}, Москвичев В.В.², Симонов К.В.³

¹ Некоммерческое партнерство «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов», Красноярск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск

³ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Предложены и обоснованы параметры приборного и информационного обеспечения систем геофизического мониторинга за сейсмическими процессами, естественными электромагнитными и геохимическими полями с целью выделения аномальных характеристик изучаемых полей для оценки геодинамической и геоэкологической опасности исследуемого региона.

Ключевые слова: геоэкологическая безопасность, сейсмический мониторинг, землетрясения, аппаратное обеспечение, структуры-предвестники.

SYSTEMS, METHODS AND TECHNOLOGIES OF REGIONAL GEOPHYSICAL MONITORING FOR ASSESSING GEODYNAMIC AND GEOECOLOGICAL HAZARDS

Kabanov A.A.^{1,2}, Moskvichev V.V.², Simonov K.V.³

¹ Non-profit Partnership «Ecological Center of Rational Development of Natural Resources», Krasnoyarsk

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk

³ Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk

The parameters of instrumentation and information support for geophysical monitoring systems for seismic processes, natural electromagnetic and geochemical fields are proposed and substantiated with the aim of identifying anomalous characteristics of the studied fields for assessing the geological and geoecological hazard of the studied region.

Keywords: geoecological safety, seismic monitoring, earthquakes, equipment, precursor structures.

Введение. Усиление в последние годы сейсмической активности очаговых зон сильных землетрясений Алтае-Саянской сейсмоактивной области – АССО, представляющих реальную опасность для южной и центральной части Красноярского края, вызвало необходимость создания эффективной системы геодинамического мониторинга на территории региона.

В свою очередь создание сейсмологической сети на территории края повлекло за собой необходимость детальных неотектонических и сейсмогеологических исследований для решения актуальных задач оценки геодинамической опасности. Значительные научные достижения в рамках долгосрочной оценки сейсмической опасности (разработка карт общего сейсмического районирования) только подчеркивают актуальность решения проблемы краткосрочной оценки геодинамической и геоэкологической опасности.

В настоящее время в методологическом отношении признан приоритет методов среднесрочной оценки сейсмической опасности (месяцы, до 1-2 лет), которые, по экспертным оценкам, могут предсказывать до 80 % сильных землетрясений, но с некоторой неопределённостью (в сотни километров) по территориальной привязке.

Для обеспечения геодинамической и геоэкологической безопасности населения и техногенных объектов промышленных агломераций региона, плотин и водохранилищ крупных ГЭС, необходимо осуществлять непрерывные геодинамические наблюдения, с использованием, как региональной сети сейсмических станций, так и системы локальных сетей геодинамического мониторинга (геодинамические полигоны).

Широкое использование локальных сейсмических сетей обуславливается их высокой чувствительностью к сейсмодинамическим процессам в земной коре, высокоточным определением координат эпицентров и глубин очагов землетрясений, возможностью картирования

потенциальных очагов активизации и одновременно объемного (сейсмотомографического) моделирования геосреды по скоростным и энергетическим характеристикам сейсмических волн. Обеспечивая важную фактическую информацию о пространственно-временном поведении слабых землетрясений, локальная сейсмическая сеть (геодинамический полигон) становится незаменимым инструментом при оценке геодинамической опасности исследуемой территории.

Результаты геомониторинга очаговых областей сильных землетрясений в рамках полигонных исследований являются методической и информационной основой обеспечения геодинамической безопасности региона. В этой связи, актуальными становятся разработки новых подходов при организации и аппаратурном обеспечении геомониторинга естественных геофизических полей (естественное импульсное электромагнитное поле Земли – ЕИЭМПЗ, наблюдения уровня воды в скважинах и уровня эмиссии радона). При этом важной задачей является разработка адекватного алгоритмического обеспечения для анализа комплекса данных геомониторинга очаговой зоны подготовки сильного землетрясения, включая низкоэнергетическую составляющую сейсмического режима для изучаемой территории.

Выделение и анализ сочетания структур-предвестников различной природы для прогноза сильного землетрясения в Алтае-Саянской сейсмоактивной области и других регионах на основе полигонных наблюдений является ключевой идеей исследования.

Аппаратурное и методическое обеспечение пунктов геодинамического мониторинга естественных геофизических полей. Создание системы полигонных исследований в первую очередь сводится к разработке схемы геодинамического мониторинга, которая позволяет решить проблему оперативной оценки параметров подготовки сильного землетрясения. Разработанная схема должна обеспечивать регистрацию геодинамических процессов на всей территории исследуемой области рациональностью размещения режимных пунктов с минимальным уровнем микросейсмического фона. Данным фактором определяется возможность регистрации низкоэнергетических землетрясений.

Оснащения режимных пунктов полигона для ведения мониторинга сейсмических, электромагнитных и газгидрогеохимических полей, должно позволять вести качественную регистрацию геодинамического поля в рамках полигонных исследований для решения оперативной оценки параметров подготовки землетрясения, что обеспечивается комплексом разнотипной аппаратуры на каждом пункте наблюдения. Расстановка аппаратуры выполняется, исходя из цели наиболее полной и качественной регистрации геодинамических полей в исследуемой области.

Геодинамический мониторинг является обязательным элементом государственной системы безопасности в сейсмически активных регионах. Научно-методические основы геодинамического мониторинга исторически развиваются в рамках РАН. Кроме мониторинговых сетей РАН, на территории РФ функционируют геодинамические полигоны различных ведомств (Минобороны, МЧС РФ, МПР, Минэнерго, Минатом и т.д.). Начиная с 2000 года получили развитие и региональные наблюдательные геодинамические сети в различных субъектах Сибирского федерального округа (Красноярский край, Кемеровская область, Республика Тыва и др.). При этом, используются как сейсмологические сети, так и комплексные сети, регистрирующие различные геолого-геофизические параметры.

В МПР РФ (Роснедра) мониторинг эндогенных процессов базируется на гидрогеодеформационном поле Земли (ГГД мониторинг). В различных сейсмоактивных регионах России (Кавказ, Алтае-Саянская область, Байкал, Камчатка, Сахалин, Хабаровский край) получили развитие геофизические полигоны для контроля напряжённо-деформированного состояния (НДС) геологической среды в промышленных зонах, включая крупные города, для прогноза сейсмической опасности. При этом, идеология развития геодинамических полигонов МПР РФ базируется на комплексировании различных геолого-геофизических методов (сейсмология, электромагнитные измерения, ГГД мониторинг, мониторинг газов и т.д.).

В связи с многообразием энергетических процессов в геологической среде, объективно необходима регистрация (мониторинг) различных по физической природе методов. Таким образом, комплексный подход к организации геодинамического мониторинга является своеобразным «стандартом» МПР РФ, в отличие от «моносетей» геодинамического мониторинга различных ведомств.

Методы оценки напряжённо-деформированного состояния (НДС) геологической среды. Вместе с тем, несмотря на длительное использование комплекса геолого-геофизических методов, применяемых при геодинамическом мониторинге, нормативно-методическая основа упомянутого комплекса не разработана. В основном регламентированы такие виды геодинамического мониторинга: ГГД мониторинг; разработаны нормативные документы для организации и эксплуатации сейсмологических сетей в системе РАН; электромагнитный мониторинг, в частности, на основе регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), осуществляемого на основе авторских разработок; мониторинг радона и других газов, осуществляемый также на основе разработок различных исследователей. За последние 17 лет накоплен значительный экспериментальный материал геолого-геофизических методов, используемых на геодинамических полигонах МПР РФ.

Геологическая среда подвержена воздействию механических полей различной природы и, как следствие, находится в напряжённо-деформированном состоянии. В общем случае в любой точке геологической среды действуют три независимых силовых поля: литостатическое, обусловленное весом вышележащих пород; тектоническое, связанное с тектоническими процессами; поле, обусловленное космогоническими факторами (лунно-солнечные приливы, нестабильность вращения Земли и т.д.). Возникающие при этом напряжения могут многократно, иногда на 1-2 порядка, превосходить литостатические напряжения.

Изменение полей напряжений имеет место не только во времени, но и в пространстве. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) является важнейшей характеристикой геологической среды, влияющей на накопление и разрядку напряжений при землетрясениях, горных ударах, оползнях и т.д. Разрядка полей напряжений способна спровоцировать техногенные катастрофы и таким образом влияет на безопасность людей и сооружений. В течение 2007-2025 гг. на геодинамических полигонах в Алтае-Саянской сейсмоактивной области Центральной Сибири, вокруг оз. Байкал, на п-ове Камчатка, о. Сахалине, и в Хабаровском крае проводится мониторинг НДС геологической среды комплексом геолого-геофизических методов – регистрация ГГД-поля в скважинах, сейсмический мониторинг, регистрация естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), газгидрогеохимический мониторинг на основе эмиссии радона.

Результаты исследований. Разработаны и обоснованы новые подходы при организации и аппаратурном обеспечении геомониторинга естественных геофизических полей (естественное импульсное электромагнитное поле Земли – ЕИЭМПЗ, наблюдения уровня воды в скважинах и уровня эмиссии радона) в рамках полигонных исследований.

Усовершенствованно алгоритмическое обеспечение для анализа комплекса данных геомониторинга очаговой зоны подготовки сильного землетрясения, включая низкоэнергетическую составляющую сейсмического режима для изучаемой территории.

Модифицирована методика выявления предвестников сейсмических событий в данных геомониторинга для оценки геодинамической опасности техногенных и природных объектов. Получены оценки сейсмической активности исследуемых территорий.

Адаптированы модели, информационное и алгоритмическое обеспечение для комплексного анализа данных о предвестниках сильных землетрясений различной природы в рамках созданных геодинамических полигонов (АССО, Камчатка, Сахалин, и др.).

Предложен способ анализа данных сейсмического режима, систем разломов и характера геонеоднородностей на исследуемых территориях на основе обработки космоснимков, при этом использовались алгоритмы спектральной декомпозиции визуальных данных (вейвлет- и шиарлет преобразования) и цветового кодирования.

Получены новые результаты экспериментальных исследований. Благодаря созданной системе мониторинга и методике анализа комплекса геодинамических и газгидрогеохимических предвестников подготовки сильного землетрясения за 17 лет наблюдений выполнено более 300 оценок (по трём параметрам: магнитуда, время и положение эпицентра) сейсмогеодинамической опасности с подтверждаемостью до 75%. Дальнейшие исследования в этой области способны повысить этот процент до 85-90%.

Для решения новых задач геодинамического мониторинга разработана методика интерпретации данных наблюдений космической системы GRACE за гравитационными аномалиями в очаговой зоне в процессе подготовки сильнейших землетрясений XXI века, на примере мега-землетрясений: Суматра, 2004; Симушир, 2006; Япония, 2011; Охотское море, 2013; Чили, 2010, 2014, 2015.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПЕКТРОМЕТРА TROPOMI

Карамзина А.Е., Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А.
Алтайский государственный университет, Барнаул

В работе представлен метод прогнозирования урожайности яровых зерновых культур с упреждением в 2-3 месяца на территории юга Западной Сибири с использованием данных об интенсивности индуцированного солнечным светом флуоресцентного излучения (SIF). Информационной основой данной работы являются измерения потоков SIF, выполненные спектрометром TROPOMI спутника Sentinel-5 Precursor, а также размер посевных площадей по данным Росстата. Проведенный анализ показал высокую степень соответствия прогностических оценок урожайности с отчетами Росстата, где коэффициент корреляции лежит в диапазоне от 0.84 до 0.96.

Ключевые слова: урожайность, яровые зерновые культуры, юг Западной Сибири, фотосинтез, флуоресценция хлорофилла, спутниковые измерения, прогноз.

YIELD PREDICTION OF SPRING CEREAL CROPS IN THE SOUTHERN PART OF WESTERN SIBERIA USING DATA FROM THE TROPOMI SPECTRORADIOMETER

Karamzina A.E., Mordvin E.Yu., Lagutin A.A.
Altai State University, Barnaul

The paper presents a method for predicting spring cereal crop yields with an advance period of 2-3 months on the territory of southern Western Siberia using data on solar-induced fluorescence emission intensity (SIF). The information basis of this work includes measurements of SIF fluxes performed by the TROPOMI spectrometer aboard the Sentinel-5 Precursor satellite, as well as sown area sizes provided by Rosstat. The analysis conducted demonstrated high correspondence between yield prediction estimates and Rosstat reports, where the correlation coefficient ranges from 0.84 to 0.96.

Keywords: yield, spring cereals, southern part of Western Siberia, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, satellite measurements, forecast.

Юг Западной Сибири – регион с развитым агропромышленным комплексом, где основная часть сельскохозяйственных угодий отведена под зерновые и кормовые культуры. Территория классифицируется как зона рискованного земледелия, что требует внедрения инновационных методов контроля посевов и прогнозирования урожайности для снижения экономических рисков.

Целью данного исследования является разработка прогностической модели, связывающей урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур юга Западной Сибири с потоками флуоресцентного излучения, регистрируемыми прибором TROPOMI, установленным на спутнике Sentinel-5P [1].

Одним из возможных признаков, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур, является прирост зеленой биомассы. Эту величину принято называть «общая первичная продукция растения» (GPP, gross primary production), которая формируется благодаря процессу фотосинтеза и секвестрации растением диоксида углерода из окружающей среды.

GPP, как правило, оценивается по данным NDVI, но более точным методом является регистрация флуоресценции хлорофилла (SIF, sun-induced chlorophyll fluorescence), что подтверждается исследованиями, показывающими линейную зависимость между GPP и SIF [2]. SIF напрямую связана с интенсивностью фотосинтеза, так как она индуцируется солнечным излучением во время световой фазы [3] при условии открытой устьичной щели [2]. Последнее обеспечивает беспрепятственный газообмен между растением и окружающей средой.

В настоящее время SIF может регистрироваться с помощью ряда спутниковых инструментов, таких как FTS-2/GOSAT2, OCO-2 и OCO-3, ACGS/TanSat, и TROPOMI/Sentinel-5P

(Sentinel-5 Precursor), данные которого используются в представленной работе. Основным инструментом спутника Sentinel-5P – спектрометр TROPOMI, который измеряет излучение в UV, VIS, NIR и SWIR диапазонах, осуществляет мониторинг содержания озона, диоксида серы, монооксида углерода, аэрозолей, метана, формальдегида и оксида азота в атмосфере [1]. Прибор обладает широкой полосой сканирования 2670 км и пространственным разрешением 5.5×3.5 км, что позволяет осуществлять ежедневные наблюдения на глобальном уровне. Продукт TROPOSIF [4] содержит данные о флуоресценции хлорофилла, извлекаемые из измерений спектрометра TROPOMI, а также включает оценку суточного интеграла SIF, обозначенного как SIF_Corr.

На начальном этапе исследования была построена маска сельскохозяйственных земель юга Западной Сибири, включая Алтайский край, Новосибирскую, Омскую и Кемеровскую области, выделенных под возделывание сельскохозяйственных культур. Для этой цели использовался продукт MCD12Q1 [5], полученный с помощью прибора MODIS, который установлен на спутниках Terra и Aqua. MCD12Q1 является результатом анализа годовых вариаций коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности, сигнатуры которых соответствуют различным типам ландшафта (см., например, [6-7]). Так как в обозначенных регионах преобладает возделывание зерновых и зернобобовых культур, то в работе использовалась обобщенная карта обрабатываемых земель по данным MCD12Q1.

Результаты MCD12Q1 послужили основой для маскирования информации о флуоресценции хлорофилла на длине волны 743 нм, полученной с помощью алгоритма TROPOSIF. Данная процедура применялась для каждого снимка TROPOMI. В результате была создана база наблюдений SIF сельскохозяйственных земель региона для периода 2020-2024 гг.

Существующая функциональная зависимость между GPP и удельной продуктивностью «полезной» биомассы W в виде зерна (далее удельная урожайность) [8], позволила сделать предположение о корреляции между максимумом SIF (далее SIF_{max}) и W . Оценка удельной урожайности зерновых и зернобобовых культур W выполнялась с использованием выражения

$$W = \frac{M}{S},$$

где M – фактическая урожайность (в млн. тонн), S – обрабатываемая площадь (в млн га), которые получены по данным Росстата.

Далее был определен коэффициент перехода от SIF_{max} для каждого вегетационного периода к удельной урожайности W :

$$W = C \times SIF_{max}.$$

Расчет SIF_{max} выполнялся с помощью метода скользящего среднего на временном ряде SIF с окном 5 дней для каждого пикселя серии изображений TROPOMI. После этого находилось среднее значение по всей области исследования.

Ключевым фактором, влияющим на снижение прогнозируемой урожайности, являются неблагоприятные погодные условия в начале вегетационного периода, такие как дефицит влаги и температурные аномалии. Также следует учитывать потери во время уборочной кампании, которые обусловлены климатическими факторами. В этом случае SIF_{max} отражает потенциальную удельную урожайность $\tilde{W}$, которую можно связать с фактической W (данные Росстата) через функцию потерь l согласно выражению:

$$W = \tilde{W}(1 - l).$$

В работе предполагается, что основная часть потерь обусловлена избыточной увлажненностью в период уборочной кампании, которая приводит к затруднениям в механизированной обработке. Тогда предлагается оценивать функцию потерь l через гидротермический коэффициент Селянинова P [9] для периода август-сентябрь

$$l = (P - t) \times \varepsilon,$$

где t – пороговое значение, при котором возможны потери, ε – масштабирующий множитель.

На заключительном этапе исследования для 2020-2024 гг. был найден коэффициент перехода C для двух случаев: без учета потерь $C1$ и с учетом потерь – $C2$. Поиск этих параметров выполнялся нелинейным методом наименьших квадратов (алгоритм Левенберга-Марквардта),

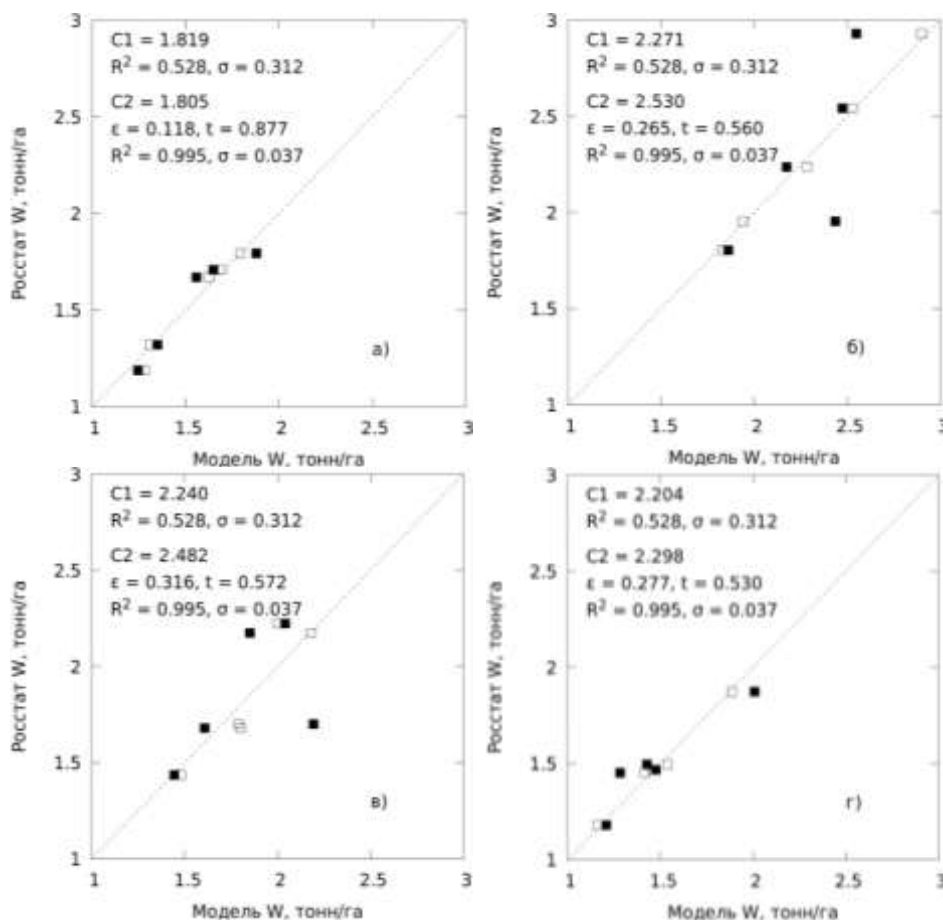
а P был рассчитан с использованием данных реанализа ERA5-Land [10]. В таблице в качестве примера показаны входящие в модель переменные для Алтайского края.

На рисунке хорошо видно, что включение функции потерь в модель значительно улучшило согласование прогностических оценок W и фактических значений (Росстат). Это особенно заметно для более влажных регионов, таких как Новосибирская и Кемеровская области, что подтверждается увеличением коэффициентов детерминации, которые представлены в таблице.

Таким образом, предварительный прогноз урожайности можно рассчитать с использованием коэффициента $C1$ во второй половине июля. Однако в условиях высокой увлажненности в августе-сентябре ($P > 0.7$) ошибка прогноза может достигать 25%, как, например в 2024 году. В дальнейшем исследование будет направлено на построение долгосрочного прогноза P , основанного на результатах моделей S2S (англ. Sub-seasonal to seasonal), таких как CMA или GFDL.

Переменные, используемые для построения модели связывающей урожайность яровых зерновых и зернобобовых культур для Алтайского края с потоками SIF

Год	SIF_{max} , Вт/(м ² ·ср·мкм)	S , млн га	M , млн тонн	ГТК
2020	0.734	3.289	3.913	0.563
2021	0.958	3.235	5.529	0.599
2022	0.900	3.353	5.597	0.446
2023	0.773	3.353	4.431	1.059
2024	1.074	3.115	5.469	1.202



Диаграммы рассеяния удельной урожайности по данным SIF TROPOMI/Sentinel-5P и ГТК для 4-х регионов юга Западной Сибири в 2020-2024 гг.: а – Алтайский край, б – Кемеровская область, в – Новосибирская область, г – Омская область; □ – потери учтены; ■ – потери не учтены.

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] Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. *et al.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 70-83. DOI:10.1016/j.rse.2011.09.027.
- [2] Xiao J., Fisher J. B., Hashimoto H. *et al.* Emerging satellite observations for diurnal cycling of ecosystem processes // *Nature Plants*. 2021. Vol. 7. P. 877-887. DOI:10.1038/s41477-021-00952-8.
- [3] Liu Z., Zhao F., Liu X. *et al.* Direct estimation of photosynthetic CO₂ assimilation from solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) // *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 271. Art. No. 112893. DOI:10.1016/j.rse.2022.112893.
- [4] Guanter L., Bacour C., Schneider A. *et al.* The TROPoSIF global sun-induced fluorescence data set from the Sentinel-5P TROPOMI mission // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13, No. 11. P. 5423-5440. DOI:10.5194/essd-13-5423-2021.
- [5] Friedl M., Sulla-Menashe D. MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. 2022. DOI:10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (accessed 03.07.2025).
- [6] Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. *et al.* Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. P. 287-302. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00078-0.
- [7] Friedl M. A., Sulla-Menashe D., Tan B. *et al.* MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114. P. 168-182. DOI:10.1016/j.rse.2009.08.016.
- [8] Marshall M., Tu K., Brown J. Optimizing a remote sensing production efficiency model for macro-scale GPP and yield estimation in agroecosystems // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 258-271. DOI:10.1016/j.rse.2018.08.001.
- [9] Кельчевская Л.С. Методы обработки наблюдений в агроклиматологии. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 215 с. URL: <http://mgmtmo.ru/edumat/agro/kelchevskaya.pdf>.
- [10] ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (accessed 03.07.2025).

ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБСКОЙ ГУБЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Кириллов В.В., Ковалевская Н.М., Худяков Н.В., Рыбкина И.Д.
Институт водных и экологических проблем, Барнаул

Исследованы сезонная и многолетняя динамики пространственного распределения биооптических характеристик Обской губы за период с 2013 по 2024 годы на основе многоспектральных данных спутниковых изображений, полученных с помощью многозональной оптико-электронной целевой спутниковой аппаратуры с сенсорами MERIS/ENVISAT, Landsat-8-9, Sentinel-2/MSI, Sentinel-3/OLI. Для расчета концентрации хлорофилла «а», взвешенных веществ и поглощения желтым веществом используется программный комплекс ESA SNAP, в котором реализованы водные процессоры C2RCC, C2X и C2X COMPLEX.

Ключевые слова: многоспектральные спутниковые снимки, водные процессоры C2RCC и C2X, Обская губа, хлорофилл «а», взвешенные вещества, экологический мониторинг.

DYNAMICS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF BIOOPTICAL CHARACTERISTICS OF THE OB BAY ACCORDING TO SATELLITE MEASUREMENTS

Kirillov V.V., Kovalevskaya N.M., Khudyakov N.V., Rybkina I.D.
Institute for Water and Environmental Problems, Barnaul

The seasonal and long-term dynamics of the spatial distribution of the bio-optical characteristics of the Ob Bay for the period from 2013 to 2024 have been studied based on multispectral data from satellite images obtained using multizonal optical-electronic target satellite equipment with MERIS/ENVISAT, Landsat-8-9, Sentinel-2/MSI, and Sentinel-3/OLI sensors. The ESA SNAP software package, which includes the C2RCC, C2X and C2X COMPLEX water processors, is used to calculate the concentration of chlorophyll «a», suspended matter, and yellow substance absorption.

Keywords: multispectral satellite images, C2RCC and C2X water processors, Ob Bay, chlorophyll «a», suspended matter, ecological monitoring.

Введение. Спутниковые данные позволяют получать информацию, включая характеристики качества воды, по всей акватории водного объекта и практически непрерывно во времени в период открытой воды. Это отличает дистанционное зондирование от традиционных подходов экологического мониторинга водоемов, основанных на локальных и дискретных во времени наблюдениях с использованием контактных методов. И это особенно актуально для самого большого по акватории залива Карского моря – Обской губы, где, как и в других прибрежных системах, динамичный характер процессов, в том числе, вследствие происходящего здесь взаимодействия континентального пресноводного стока с солеными морскими водами, требует проведения более масштабного мониторинга, как во временном, так и в пространственном измерениях [1,2,3]. Однако, до настоящего времени государственный экологический мониторинг Росгидромета в Карском устьевом районе и производственный экологический контроль (мониторинг) (ПЭК(М)), осуществляемый организациями Росморпорт и Росатома при проведении гидротехнических работ в районах проведения дноуглубительных работ на акватории морского порта Сабетта и терминала «Утренний», при реконструкции «Морского канала» не включает дистанционные методы [4,5]. Не только в России, но и в США и странах ЕС, остается открытым вопрос, почему управленческие решения по оптимизации использования и сохранения природных ресурсов по результатам мониторинга обычно не основываются на спутниковых данных о качестве воды, имеющем и экономическое значение? Чтобы наилучшим образом реализовать весь потенциал применения новых технологий, необходим открытый и эффективный диалог между учеными, политиками, менеджерами по охране окружающей среды и заинтересованными сторонами на федеральном и региональном уровнях [6,7].

Цель работы – исследование сезонной и многолетней динамик пространственного распределения биооптических характеристик Обской губы, сравнение разных методов оценки

концентраций хлорофилла, содержания взвешенного вещества и поглощения желтым веществом на основе глобальных многоспектральных данных.

Материал и методы. Для исследования биооптических характеристик Обской губы, в соответствии с глобальными международными протоколами и алгоритмами, использовались спутниковые данные Геологической службы США (USGS), космических агентств США (NASA) и Европы (ESA). Сбор многоспектральных данных спутников Sentinel-2 и Landsat-8/9 осуществлялся через портал EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) и DataspaceCopernicus (<https://scihub.copernicus.eu>). Критерием отбора снимков являлся низкий процент облачности не более 10%. Снимки должны были быть сделаны в летний период, с интенсивной инсоляцией и отсутствием льда, при различной длительности периода открытой воды, который отличался в разные годы. Период отбора – с начала июля до середины сентября – соответствовал времени максимального уровня развития гидробиоценозов. С учетом всех вышеперечисленных условий, был сформирован каталог космических снимков первого уровня обработки с 2013 по 2024 гг. для двух участков:

Участок 1 (северный) расположен в северной части Обской губы, общей площадью 5091.35 км². Ближайшие населенные пункты: пос. Тамбей, порт Сабетта, терминал «Утренний». Участок 2 (южный) расположен в южной части Обской губы, площадью 8474.12 км². Ближайшие населенные пункты: пос. Мыс Каменный и пос. Новый Порт.

В рамках данного исследования, впервые для северных регионов России, для извлечения биооптических характеристик участков Обской губы на основе многоспектральных спутниковых снимков Landsat-8/9 (30 м) и Sentinel-2 (10 м) используется программный комплекс ESA SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap>), в котором реализованы специализированные водные процессоры C2RCC, C2X и C2X COMPLEX обработка в которых выполняется на основе использования набора нейронных сетей.

Эти инструменты разработаны специально для анализа вод типа Case-2, где оптические свойства зависят от нескольких компонентов, таких как органические и неорганические примеси. Подобный подход ранее не применялся на акватории Обской губы, что делает его экспериментальным и открывает новые возможности для экологического мониторинга в таких труднодоступных регионах, как Субарктика.

В ходе исследования была сформирован каталог снимков, включающий 98 сцен. Из них для участка 1 было отобрано 30 сцен спутника Sentinel-2 (2016-2024) и 17 сцен спутника Landsat-8/9 (2013-2024), для участка 2 было отобрано 33 сцены Sentinel-2 (2017-2024) и 18 сцен спутника Landsat-8/9 (2013-2024).

Базы данных пространственного распределения ключевых параметров были созданы на основе сеток точек с шагом 0.5 км для Sentinel-2 и 1 км для Landsat-8/9. Полученные базы содержат информацию о концентрации хлорофилла «а», взвешенных веществах и поглощения желтым веществом за период с 2013 по 2024 годы.

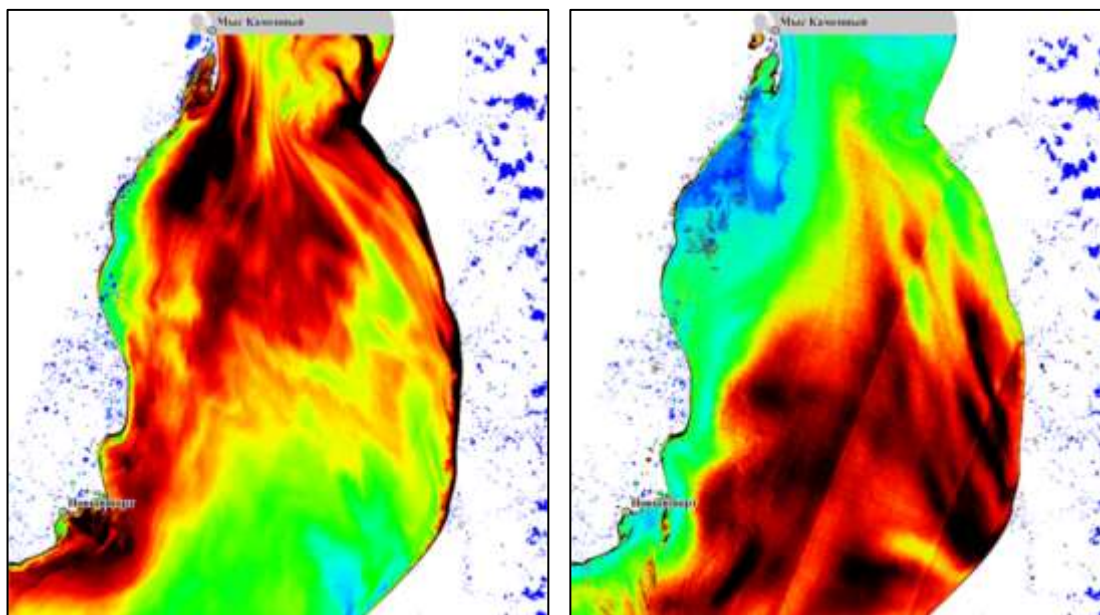
Результаты исследований и обсуждение. Результаты обработки проанализированы с точки зрения:

- кумулятивного эффекта природных и антропогенных факторов, формирующих условия на северном и южном участках и, соответственно, условия среды обитания водных биологических ресурсов;
- возможностей определения зон распространения в воде взвешенных веществ в ходе хозяйственной деятельности (дноуглубительные работы, захоронение донного грунта, строительство переходов через водные объекты, причалов).

При анализе динамики модельных значений особый интерес представляют снимки с высокими значениями искомых параметров, полученные с различными интервалами во времени. Это позволят, например, исследовать нестабильность положения эстуарного максимума мутности в течение 40 дней в июле-августе 2017 года на южном участке (см. рисунок).

Анализ многолетней динамики модельных концентраций хлорофилла «а» и взвешенного вещества на северном участке свидетельствует о влиянии взвеси на развитие фитопланктона.

Повышение мутности изменяет физико-химические свойства воды, увеличение количества взвешенных частиц ограничивает доступ света, необходимого для фотосинтеза.



Положения эстуарного максимума мутности (участок 2, C2RCC, Sentinel-2): слева – пространственное распределение концентрации взвеси 18.07.2017, справа – 27.08.2017.

На южном участке Обской губы модельные концентрации взвешенных веществ значительно выше, а модельные концентрации хлорофилла «а» значительно ниже, чем на северном участке. Это согласуется с тем, что Обь приносит с континентальным стоком большое количество взвешенных частиц, включая органические и минеральные вещества, которые негативно влияют на развитие фитопланктона. И содержание хлорофилла «а» здесь значительно ниже, чем на северном участке. Например, согласно данным за 2023 год, максимальная концентрация TSM на юге (участок 2) достигала 39.09 г/м^3 , что позволяет относить воду к категории «слабозагрязненная». Но, уровень содержания хлорофилла оставался в пределах $0.48\text{--}27.46 \text{ мг/м}^3$, что указывает на наличие сложных взаимосвязей между параметрами.

Особенности пространственного распределения исследованных параметров зависят от антропогенных факторов, таких как судоходство, строительство и промышленная деятельность. Вблизи портовых зон наблюдается локальное повышение уровня загрязнений. Но, воздействие посёлков Тамбей и Сабетта, центров добычи углеводородов и строительства, на концентрацию взвешенных веществ и хлорофилла остаётся локальным и менее выражено по сравнению с естественными процессами включая многолетнее влияние континентального речного стока Оби на усреднённые значения биооптических характеристик Обской губы.

Естественные факторы, такие как сезонные изменения уровня рек и активность ветров, оказывают существенное влияние на распределение взвешенного вещества. Высокие значения TSM наблюдаются, когда речной сток достигает максимума. Так, в июле 2020 года уровень TSM (C2RCC) составил 61.54 г/м^3 (класс «слабозагрязненная»), а в августе уже снизился до 20.42 г/м^3 (класс «достаточно чистая»). Это позволяет делать выводы об определяющей роли естественных факторов в экологических процессах и в формировании состояния водной среды.

Заключение. При рассмотрении различных методов исследования состояния водных объектов с использованием космических данных, можно заключить, что многоспектральные спутниковые данные предоставляют значительные возможности для экологического анализа. В частности, Sentinel-2 и Landsat-8/9 позволяют оценивать концентрацию хлорофилла «а», содержание взвешенных веществ и поглощение желтым веществом на больших акваториях. Эти данные особенно важны для труднодоступных регионов, таких как Обская губа, где традиционные натурные исследования становятся затруднительными из-за суровых климатических

условий. Было установлено, что региональная нейросетевая модель Case 2 Regional CoastColour показывает лучшие результаты при анализе качества воды на исследуемых участках по сравнению с моделью Case 2 Extreme, которая обучена на экстремальных ситуациях. Это подтверждается данными обработки снимков за разные годы. Снимки каталога обработаны с помощью различных водных процессоров и был обнаружен водный процессор (C2RCC), как наиболее работоспособный для обоих участков.

В процессе адаптации методики определения параметров качества воды и гидрооптических характеристик было выявлено, что применение нейросетевых процессоров позволяет получать точные и стабильные значения исследуемых параметров. Несмотря на неоспоримость представляемых спутниковых возможностей, для создания *региональных* алгоритмов и верификации расчетов концентрации хлорофилла, взвешенных и органических веществ, полученных методами дистанционного зондирования Земли, используются соответствующие подспутниковые и последующие лабораторные измерения физических, химических и биологических характеристик водоема, в том числе, полученные в рамках мониторинга состояния природных (морских) вод на участках проведения дноуглубительных работ, ближайшей акватории и в районах захоронения извлеченных донных грунтов.

Развиваемый подход может рассматриваться как технология для классификации водных участков, подвергающихся различной антропогенной нагрузке, и для разработки методики экологического районирования морской среды, в том числе, для геоэкологической типизации акватории Обской губы в ходе производственного экологического контроля.

Дальнейшее развитие технологии возможно с использованием данных, получаемых с российских космических аппаратов, в том числе, на основе мультиспектральных и гиперспектральных изображений необходимого разрешения с целесообразными периодичностью и шириной полосы съёмки.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием по теме «Исследование разнообразия и структурно-функциональной организации водных экосистем для сохранения и рационального использования водных и биологических ресурсов Западной Сибири» (№ государственной регистрации 0306-2021-0001) и при финансовой поддержке Российского Центра освоения Арктики (г. Салехард) по теме «Комплексные научные исследования Обской губы в рамках реализации проекта «Экологическая безопасность Обь-Иртышского речного бассейна» проект (№ государственной регистрации 122041300036-8).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кириллов В.В., Ковалевская Н.М., Павлов В.Е., Котовицков А.В., Семчуков А.Н., Печкин А.С., Скороспехова Т.В., Хворова Л.А., Колисниченко Н.А., Мышляков С.Г., Скачкова А.С. Исследование динамики параметров качества воды в заливах Карского моря и прилежащем Карском шельфе на основе архивной и оперативной спутниковой информации // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 4. С. 65-82. DOI:10.25743/ICT.2018.23.16491.
- [2] Кириллов В.В., Ковалевская Н.М., Рыбкина И.Д., Худяков Н.В. Мониторинг пространственной неоднородности и динамики биооптических характеристик Обской губы по данным различных спутников // Научно-практическая конференция «Состояние и задачи мониторинга природных условий Обь-Енисейского устьевоего региона на фоне изменяющегося климата и интенсивной хозяйственной деятельности», АНИИ. Санкт-Петербург, 2024. С.44-48.
- [3] Худяков Н.В., Кириллов В.В., Рыбкина И.Д., Ковалевская Н.М. Исследование динамики параметров качества воды в Обской губе на основе результатов обработки многоспектральных спутниковых данных (2013-2023) // Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=293&thesis=10357>.
- [4] Кириллов В.В., Ковалевская Н.М., Семчуков А.Н. и др. Противоречия и перспективы мониторинга экотональной экосистемы Обской губы // Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием «II Лавёровские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы». Архангельск, 2023. С. 393-397.

- [5] *Фольваркова К.Е.* Осуществление производственного экологического мониторинга на объектах строительства, реконструкции и эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) ФГУП «Гидрографическое предприятие» // Научно-практическая конференция «Состояние и задачи мониторинга природных условий Обь-Енисейского устьевого региона на фоне изменяющегося климата и интенсивной хозяйственной деятельности», АНИИ, Санкт-Петербург, 2024. С.88-94.
- [6] *Агарков С.А., Матвишин Д.А.* Влияние экономической деятельности Актического региона на безопасность среды обитания водных биологических ресурсов // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 3(105). С. 55-62.
- [7] *Schaeffer B.A., Schaeffer K.G, Keith D., Lunetta R.S., Conmy R., Gould R.W.* Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management // International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34, No. 21. P. 7534-7544. DOI:10.1080/01431161.2013.823524.

АНАЛИТИКА РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДО 2035 ГОДА НА ОСНОВЕ ЗАРУБЕЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

Клименко О.А.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

В исследовании Всемирного экономического форума и консалтинговой компании McKinsey предполагается, что к 2035 году космическая экономика составит в 1,8 триллиона долларов. Исследование опиралось на интервью с более чем 60 лидерами и экспертами в космической отрасли и других сегментах, чтобы получить представление о траектории космических технологий и их влиянии – часто косвенном – на ряд секторов экономики. Эксперты считают, что широко будет применяться GeoAI – это использование методов ИИ для получения знаний посредством анализа пространственных данных и изображений. В частности, GeoAI будет применяться для управления умными городами.

Ключевые слова: космические инновации, GeoAI, умный город.

ANALYTICS OF THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES UP TO 2035 BASED ON FOREIGN SOURCES OF INFORMATION

Klimenko O.A.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

A study by the World Economic Forum and McKinsey estimates that the space economy will be worth \$1.8 trillion by 2035. The study relied on interviews with more than 60 leaders and experts in the space industry and other segments to gain insight into the trajectory of space technologies and their impact – often indirect – on a range of economic sectors. The experts believe that GeoAI – the use of AI techniques to gain insights through the analysis of spatial data and images – will be widely used. In particular, GeoAI will be used to manage smart cities.

Keywords: space innovation, GeoAI, smart city.

Введение. Статья представляет собой результат аналитической работы по анализу открытой информации из зарубежных научно-технических отчетов, научных статей, сайтов правительственных организаций и частных компаний.

Будущее космического рынка. Исследователи Всемирного экономического форума и консалтинговой компании McKinsey считают, что отсутствие регулирования за пределами атмосферы Земли создает огромный потенциал космических инноваций, и в ближайшее десятилетие можно ожидать бурный рост космического рынка [1,2]. Многие организации привлекаются на растущий новый рынок обещаниями, казалось бы, невероятных проектов, от фармацевтических компаний, создающих лабораторию на космической станции для изучения роста клеток, до полупроводниковых компаний, производящих чипы на внеземных заводах.

К ключевым тенденциям, которые помогут укрепить будущее космического рынка, относятся более широкая спутниковая связь, мобильные услуги позиционирования и навигации, а также предоставление информации на основе искусственного интеллекта и машинного обучения. Эксперты отмечают, что в сельском хозяйстве фермеры уже используют спутниковые снимки для отслеживания роста урожая и прогнозирования урожайности, принимая более обоснованные решения о том, когда сажать и собирать урожай.

В транспорте спутниковые навигационные системы повышают эффективность операций по доставке и логистике. А в здравоохранении и образовании спутниковая связь соединяет сельские районы с городскими центрами.

GeoAI. Геопространственный искусственный интеллект, часто называемый GeoAI, в последнее время вызывает большой интерес. Возросшая доступность геопространственных данных, достижения ИИ и доступность огромной вычислительной мощности привели к растущей актуальности и потенциалу GeoAI [3].

Пример применения GeoAI. Kuwait Vision 2035, или «Новый Кувейт 2035», это долгосрочная программа развития, направленная на преобразование Кувейта в глобально конкурентоспособную страну к 2035 году, умный город. Частью программы является бесплатный сервис Kuwait Finder, который должен обеспечивать геопространственную визуализацию всей страны. Для создания сервиса использовались карты, планы строительства, спутниковые снимки, данные оборудования IoT (Интернета вещей). Однако, когда информация была введена, инфраструктура города Кувейт снова изменилась. Тогда команда Kuwait Finder обучила искусственный интеллект распознавать здания на спутниковых снимках, сравнивать снимки и находить новые объекты [4]. Модель машинного обучения GeoAI позволяет Kuwait Finder автоматически обновлять базовые карты Кувейта новыми улицами и зданиями, как показано на рисунке.



Сервис Kuwait Finder

Анализ данных об инфраструктуре. Армия США является пионером в использовании генеративного ИИ в военном планировании. В этой новаторской инициативе армия использует ИИ для моделирования сложных военных сценариев в контролируемой среде видеоигры. Эти симуляции включают разнообразные ландшафты поля боя, расположение дружественных и вражеских сил и множество исторических военных данных [5].

Закключение. На основе анализа зарубежных публикаций можно отметить перспективность фундаментальных и прикладных исследований применения методов искусственного интеллекта к геопространственным данным.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Analyst: space industry worth \$1.8tn by 2035. URL: <https://www.advanced-television.com/2025/01/28/analyst-space-industry-worth-1-8tn-by-2035> (дата обращения 10.07.2025).
- [2] WEF and McKinsey: space economy to hit \$1.8 trillion by 2035. URL: <https://www.consultancy.uk/news/37119/space-economy-to-hit-18-trillion-by-2035> (дата обращения 10.07.2025).
- [3] Esri – компания США, производитель геоинформационных систем (ГИС). URL: <https://www.esri.com/en-us/home> (дата обращения 10.07.2025).
- [4] Alastal A.I., Shaqfa A.H. GeoAI technologies and their application areas in urban planning and development: concepts, opportunities and challenges in smart city (Kuwait, study case) // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2022. Vol. 10, No.2. Art. No. 116308. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=116308> (дата обращения 10.07.2025).
- [5] Uppal R. Unveiling the military potential of generative AI or large language models (LLMs). URL: <https://idstch.com/technology/ict/unveiling-the-military-potential-of-generative-ai-or-large-language-models-llms> (дата обращения 10.07.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КООРДИНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАВЕЛОГОВ

Колесников А.А., Жданов С.С.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Рассмотрены существующие примеры обработки документов, содержащих географические наименования, и интеграция результатов в базы данных геоинформационных систем. В исследовании анализируются степень автоматизации с помощью технологий обработки естественного языка и точность создания базы данных маршрутов для текстов травелогов. Приведены результаты сравнения нескольких вариантов больших языковых моделей с точки зрения итоговой точности определения элементов маршрутов передвижения по неструктурированным текстам.

Ключевые слова: большие языковые модели, геокодирование, травелог, обработка естественного языка.

USING LARGE LANGUAGE MODELS TO AUTOMATE COORDINATION OF TRAVELOGUE OBJECTS

Kolesnikov A.A., Zhdanov S.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The article reviews existing examples of processing documents containing geographic names and integrating the results into geographic information system databases. The study analyzes the degree of automation using natural language processing technologies and the accuracy of creating a route database for travelogue texts. The article presents the results of comparing several versions of large language models in terms of the final accuracy of determining elements of travel routes using unstructured texts.

Keywords: large language models, geocoding, travelogues, natural language processing.

Введение. Обработка исторических текстовых данных, содержащих имена и обозначения объектов окружающего пространства, посредством сочетания методов геоинформатики и анализа текстов позволяет учитывать пространственный и национальные аспекты, позволяют формировать базы знаний о национальной специфике и самоидентификации, отслеживать динамики народностей относительно ее локальных, историко-временных вариантов, а также учитывать специфику отдельных авторов. Примером источника таких данных является травелог. Травелог – это особый вид литературного жанра, объединяющий литературу и историю путем описания впечатления путешественников за определенный временной период в виде путевого рассказа, который содержит информацию о наблюдениях и свидетельствах путешествий и служит одним из инструментов историографии.

Геопространственный анализ травелогов подразумевают реферирование текста, распознавание именованных сущностей, их связывание, структурирование и интеграцию в базу пространственных данных. Упрощение интеграции этих функций в геоинформационные системы и сервисы позволит историкам, журналистам, музейным работникам и другим выполнять автоматизированный анализ подобных текстов качественнее и эффективнее.

В данном исследовании рассматриваются подходы, выполняется оценка степени автоматизации обработки травелогов с помощью технологий обработки естественного языка, анализируются способы оценки точности результатов и типовая структура описания извлеченных элементов маршрутов в виде источника данных для геоинформационных систем.

Использование таких технологий обработки естественного языка, как большие языковые модели, в процессах обработки текстов травелогов для цели картографирования маршрутов является актуальной задачей как для геоинформатики, так и для методов машинного обучения, анализирующих текстовые данные. Их совместное использование позволяет улучшить использование данных о путешествиях, обеспечить более наглядные способы графического

представления маршрутов и проводить более глубокий анализ повествования. Решение обратной задачи позволит автоматизировать формирование представлений картографических и геоинформационных материалов в виде текстовых описаний.

Методы и материалы. Большинство существующих подходов по автоматизированному анализу тревелогов основаны на технологиях машинного обучения и основаны на модульном подходе, т.е. используют выходные данные анализаторов зависимостей между токенами, типов объектов реального мира, систем обработки частей речи для классификации именованных сущностей. Наиболее качественные результаты были достигнуты с помощью совместного использования систем извлечения объектов и событий, т.е. подходы, которые суммируют вывод комбинации моделей, чтобы минимизировать ошибки, вносимые каждой в отдельности. С точки зрения концепции семантического повествования существует несколько подходов и программных систем, в том числе ориентированных на предоставление контента для развлекательных целей, сюжетов в компьютерных играх, сводок погоды. Одним из наиболее практико-ориентированных является подход, использующий интерактивную платформу для создателей контента и конечных пользователей, позволяющую создавать свои собственные сюжетные миры, наполнять их персонажами и объектами, формировать события, использовать инструменты автоматического синтеза повествования.

Данное исследование состоит из построения запросов к большим языковым моделям, которые должен преобразовать исходный текст в JSON структуру, оценке качества результата, последующей обработкой с помощью инструментов геокодирования для формирования объектов пространственной базе данных на основе базовой структуры элемента тревелога. Она определяется как событие действия движения (англ. Movement Action Events, MAE). Под этим понятием подразумеваются события физического движения, происходящие, когда человек перемещается из одного места в другое, используя тот или иной вид транспорта. MAE состоит из шести элементов: P – человек или группа людей; LO – место отправления; LD – место назначения; TD – время отправления; TA – время прибытия; V – вид транспорта.

Были использованы следующие модели: нейронная сеть на основе архитектуры Transition Based (в реализации SpaCy, обученной на наборе данных `ru_core_news2`), большие языковые модели Llama, Mistral, Openbuddy, Saiga. Для улучшения качества результатов с учетом специфики задачи выполняется их тонкая настройка на основе правильных ответов для конкретных фрагментов текстов. В данной работе выполнено дообучение с помощью метода QLoRA с целью повышения точности формирования MAE. В обоих случаях (базовый вариант LLM и его fine-tuning версия) для оценки качества использованы метрики ROUGE и расстояние Левенштейна. Кроме того, также применена предлагаемая авторами метрика RMAE, ориентированная на конкретную задачу анализа тревелогов. Анализируемый набор документов содержит 150 текстов, написанных в период XVIII–XX вв., общим объемом 46 тыс. слов (среднее количество слов на документ: 308, включая адреса).

Результаты. С точки зрения повышения комплексности результатов анализа, авторами исследования предлагается расширить список элементов MAE, добавив цель поездки PT и идентификатор маршрута ID (для связывания последовательных перемещений), а также наложить ограничения в виде того, что для последовательных событий подразумевается, что место назначения является местом отправления следующей поездки и, что время отправления следующей поездки не должно быть меньше времени прибытия предыдущей. Данные условия легко реализуются посредством запросов в геоинформационной системе или базе пространственных данных

Извлеченных кандидатов MAE можно визуализировать на карте, основываясь на координатах из сервисов геокодирования, а также выполнять фильтрацию по документам. По результатам обработки формируется файла открытого формата GeoJSON, который может быть использован в разных системах, например, картографическом web-сервисе, геоинформационной системе и т. д.). Основываясь на результатах использования больших языковых моделей, степень автоматизации анализа текстов тревелогов, по сравнению с традиционными техниками определения и структурирования составляет до 85%.

Заключение. Большие языковые модели показали в данном исследовании наибольшую точность, но при этом очень важным замечанием является то, что для их работы требуется гораздо больше аппаратных ресурсов (примерно в 4 раза) по сравнению с базовыми сверточными нейронными сетями, применяемыми для обработки естественного языка и, тем более, по сравнению с алгоритмами на основе правил.

Также нужно отметить, что использование технологий Retrieval Augmented Generation для картографирования текстов травелогов позволяет автоматизировать (на величину порядка 40%) ряд процессов сравнительного анализа текстовых и картографических данных, в силу того, что становится возможным сочетать преимущества больших языковых моделей, а также точные и актуальные значения из геоинформационных баз данных. Становится возможным автоматизировать процессы верификации и анализа текстов травелогов, использовать шаблоны генерации описания местности и отдельных объектов по геоинформационным моделям.

Дальнейшими исследованиями в данной области могут быть: отслеживание изменений топонимов в зависимости от временных периодов; поиск возможных ошибок в авторских текстах; позиционирование объектов маршрута только по описанию, основываясь на данные о маршруте и скорости передвижения; учет мультязычности в названиях одних и тех же мест у разных авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант № 24-28-01431 «Репрезентация пространства Украины в русской культуре конца XVIII-XIX вв. (на материале отечественных травелогов): дискурсы, нарративы, топосы», <https://rscf.ru/project/24-28-01431/>), реализуемого по направлению Стратегии научно-технологического развития РФ (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») «Н5 – Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Mayga A.A.* Литературный травелог: специфика жанра // *Филология и культура*. 2014. № 3(37). С. 254-259.
- [2] *Bourgonje P., Schneider J. M., Rehm G., Sasaki F.* Processing document collections to automatically extract linked data: semantic storytelling technologies for smart curation workflows // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Natural Language Generation and the Semantic Web (WebNLG)*. ACL, Edinburgh, UK, 2016. P. 13-16.
- [3] *Gervas P.* Metrics for desired structural features for narrative renderings of game logs // *Entertainment Computing*. 2014. Vol. 5(4). P. 245-250. DOI:10.1016/j.entcom.2014.08.001.
- [4] *Moreno-Schneider J., Bourgonje P., Rehm G.* Towards user interfaces for semantic storytelling // *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2017. Vol. 10274. P. 403-421. DOI:10.1007/978-3-319-58524-6_32.
- [5] *Nothman J., Ringland N., Radford W., Murphy T., Curran J.R.* Learning multilingual named entity recognition from Wikipedia // *Artificial Intelligence*. 2012. Vol. 194. P. 151-175. DOI:10.1016/J.ARTINT.2012.03.006.
- [6] *Poulakos S., Kapadia M., Schupfer A., Zund F., Sumner R., Gross M.* Towards an accessible interface for story world building // *AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*. 2015. С. 42-48.
- [7] *Rehm G., Moreno-Schneider J. M., Bourgonje P., Srivastava A., Nehring J., Berger A., Konig L., Rauchle S., Gerth J.* Event detection and semantic storytelling: generating a travelogue from a large collection of personal letters // *Events and Stories in the News Workshop*. Vancouver, Canada: Association for Computational Linguistics, 2017. P. 42-51. DOI:10.18653/v1/W17-2707.
- [8] *Turner S.R.* The creative process: a computer model of storytelling and creativity. Taylor and Francis, 2014. 308 p.
- [9] *Wood M.D.* Exploiting semantics for personalized story creation // *2008 IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC'08)*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008. P. 402-409. DOI:10.1109/ICSC.2008.10.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Костюлин М.Э., Морозов Ю.В., Мурасев А.А., Спектор А.А.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Рассмотрены суммарно-разностный и нейросетевой методы измерения углового положения объекта с помощью многоканальной радиотехнической системы. Выполнена оценка углового разрешения рассматриваемой системы. Данная система имеет семь азимутальных каналов, в которых формируются напряжения, отражающие свойства наблюдаемого объекта. Приведено краткое описание каждого из методов и выполнен их сравнительный анализ. Показано, что ошибки измерения азимута упомянутыми методами близки друг к другу. Исследована зависимость ошибок от дальности и типа объекта.

Ключевые слова: радиотехническая система, азимут, дальность, суммарно-разностный метод, нейронная сеть.

MEASUREMENT OF ANGLE OF AN OBJECT BY A MULTICHANNEL RADIO SYSTEM

Kostyulin M.E., Morozov Yu. V., Murasev A.A., Spector A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The summary-differential and neural network-based methods for an object angle position measurement with help of a multichannel radio system are considered. The angle resolution of the analyzed system has been estimated. This system has seven azimuth channels that form voltages reflecting properties of an observed object. It has been shown that azimuth measurement errors of the mentioned above methods are almost similar. The azimuth measurement error dependence on range and an object type has been studied.

Keywords: radio system, azimuth, range, summary-differential method, neural network.

Введение. В настоящей работе рассматривается измерение азимута объекта и разрешение двух объектов по азимуту на основе выходных напряжений многоканальной радиотехнической системы. Такая система формирует напряжения на выходах входящих в ее состав каналов при наличии наблюдаемого объекта. Целью проведенных исследований является анализ вариантов извлечения информации из этих напряжений об азимуте и разрешении. Для решения этих задач применяется суммарно-разностный метод и нейросетевой метод. Исходными данными для этих методов являются зависимости напряжений в каналах радиотехнической системы от азимута объекта (рисунок 1). В каждом канале наблюдается ярко выраженный пик. Уровень этих пиков уменьшается при увеличении дальности. Наиболее ярко выраженные пики соответствуют дальности 70 км. Угловые положения этих пиков могут быть использованы для измерения азимута и разрешения по азимуту. Слева и справа от каждого из пиков наблюдаются спады, по которым можно оценить ширину зависимости напряжения от азимута в каждом канале.

Суммарно-разностный метод измерения азимута. На основе общих подходов к оценке угловых координат объектов в многоканальных радиотехнических системах предложен суммарно-разностный метод измерения азимута, основанный на цифровой обработке сигналов, которая не требует больших вычислительных ресурсов.

Основой является одновременное формирование R сигналов, которые, благодаря пространственной цифровой обработке, обеспечивают соответствие комбинации этих сигналов различным азимутальным направлениям. Ширина зависимости напряжения от азимута в каждом канале определяется, в основном, горизонтальным размером антенны в составе радиотехнической системы, а взаимное расположение этих зависимостей по азимутальной координате устанавливается таким образом, чтобы при наблюдении за объектом не было «мертвых» зон и, вместе с тем, обеспечивался максимальный размер сектора одновременного азимутального

анализа. Цифровой характер обработки сигналов способствует гибкости принятия структурных решений. В частности, относительно просто можно изменять число азимутальных каналов R .

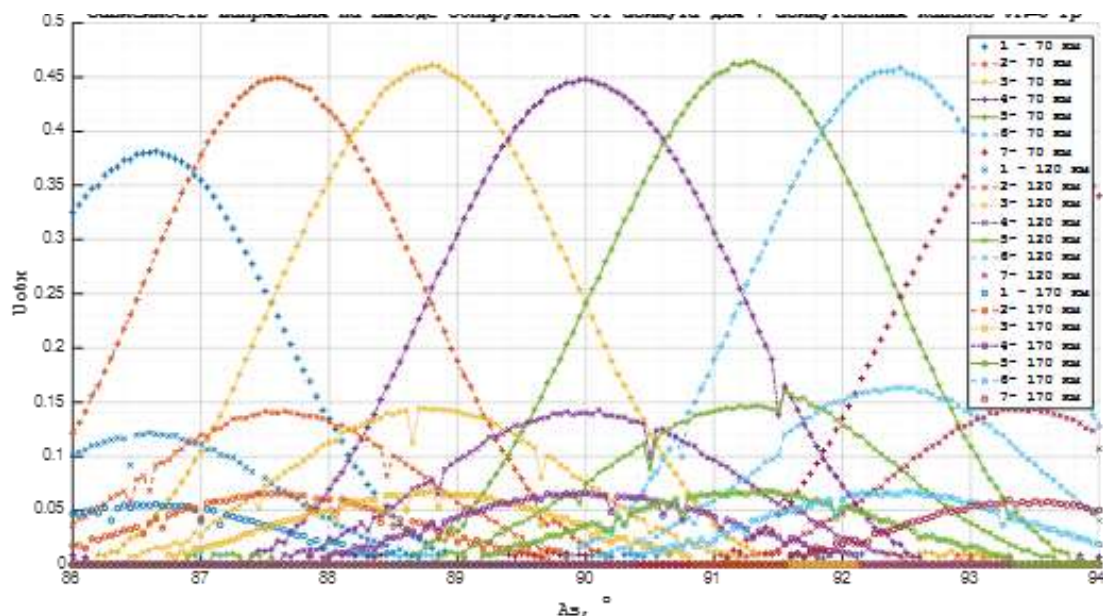


Рис. 1. Зависимости напряжений в каналах радиотехнической системы от азимута при угле места 0 градусов на дальностях 70, 120 и 170 км для точечного объекта.

Совокупность амплитуд на выходах R каналов содержит информацию об азимуте направления прихода сигнала. Известным методом измерения является суммарно-разностная обработка принятых сигналов [1].

Располагая всеми R значениями, а также номером r канала, в котором произошло обнаружение, алгоритм определяет, в каком из соседних каналов выходной эффект имеет большее значение, и дальнейшая обработка происходит с использованием эффектов двух определенных таким образом каналов.

Суммарно-разностный метод углового разрешения по азимуту. Под угловым разрешением следует понимать минимальное угловое расстояние, при котором появляется четкая граница (провал) между наблюдаемыми данными. Под данной границей обычно понимают различие между уровнями напряжений двух соседних сигналов в $\sqrt{2}$ раз по амплитуде. Чтобы определить минимальное угловое расстояние, предварительно было исследовано влияние объектов на азимутальные каналы рассматриваемой радиотехнической системы при разных уровнях шума.

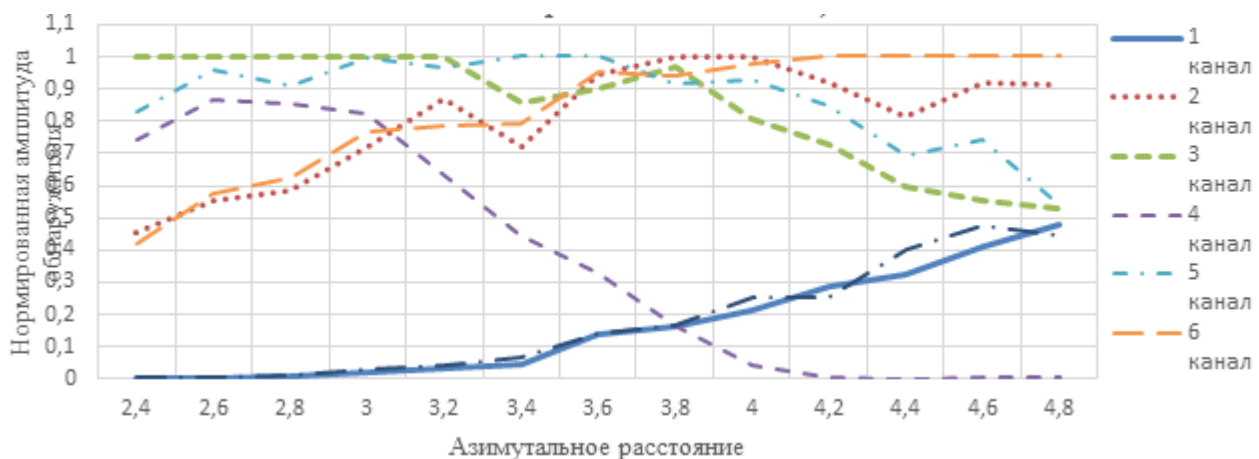


Рис. 2. Нормированная амплитуда обнаружителя в семи каналах в зависимости от азимутального расстояния между двумя объектами.

На разрешающую способность рассматриваемой системы влияет вероятность обнаружения объекта в отдельных азимутальных каналах. Разрешение двух объектов определяется зависимостью амплитуд напряжения в азимутальных каналах обнаружителя от азимутального расстояния между объектами, т.е. разности их азимутов (рисунок 2).

Первый объекта начинает свое движение из пика третьего канала, второй – из пика четвертого. У каждого объекта шаг 0.1 градус, следовательно, суммарный шаг составляет 0.2 градуса. Удовлетворительной можно считать зеленую кривую, так как спад не превышает $\sqrt{2}$ раз. Азимутальное расстояние составляет 3.4 градуса.

Нейросетевой метод измерения азимута. Одним из перспективных инструментов для обработки информации являются нейронные сети. Основными достоинствами нейронных сетей являются гибкость, способность адаптироваться к изменениям внешних условий с сохранением устойчивого качества работы. Архитектуры нейронных сетей позволяют использовать множество одинаковых простых элементов [2].

Целью настоящего исследования является разработка нейронной сети с простой архитектурой, на выходе которой будет формироваться измеренное значение азимута. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи: разработать архитектуру нейронной сети, а также провести ее обучение и тестирование с помощью разработанной ранее программы для моделирования.

Нейронная сеть для измерения азимута получает на вход 7 напряжений с выхода приемных каналов. Первый слой сети состоит из 3 нейронов и, соответственно, имеет 3 выхода. Каждый нейрон содержит по 7 коэффициентов и смещение, а также сумматор и сигмоидальную пороговую функцию. Таким образом, первый слой содержит $(7 + 1) * 3 = 24$ параметра. Второй слой состоит из всего лишь одного нейрона, который включает в себя 8 параметров и сумматор. На выходе он выдает значение азимута объекта.

Было произведено предварительное обучение нейронной сети, и затем – ее тестирование. Обучение нейронной сети проводилось исходя из критерия минимума среднеквадратической ошибки измерения азимута с использованием одной из разновидностей градиентных алгоритмов – метода квази Ньютона, который позволяет избавиться от обращения Якобиана, который используется в обычном методе Ньютона.

Обучение осуществлялось по результатам работы математической модели. Каждый набор напряжений, соответствующий некоторому заданному значению азимута, подвергается нормировке по максимуму. Это позволило снизить зависимость напряжений от дальности.

В качестве результата, показывающего качество работы нейронной сети, было принято СКО измерения азимута по заданному диапазону его изменения. Этот показатель определялся при тестировании нейронной сети. Пример результатов тестирования приведен на рисунке 3.

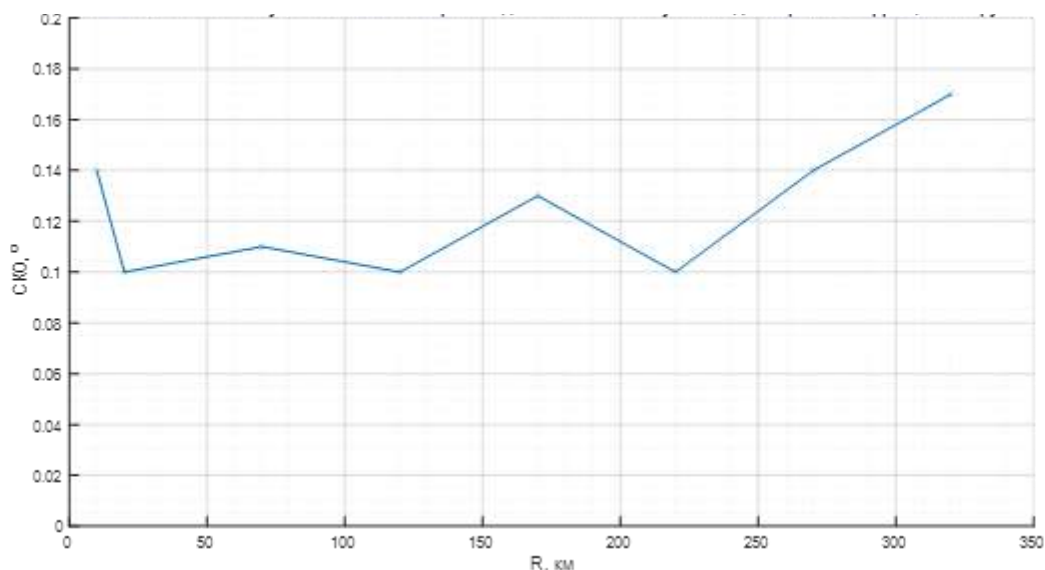


Рис. 3. СКО измерения азимута по диапазону от 86 до 94 градусов от дальности.

Тестирование нейронной сети показало, что на дальностях до объекта до 320 км СКО измерения азимута не превысило 0.18 градуса.

Нейросетевой метод измерения разрешения по азимуту. Далее рассмотрена возможность использования нейросетевого метода азимутального разрешения объектов. Была сформирована обучающая выборка для одиночного объекта и для двух объектов. Один из объектов фиксировался в центре одного из азимутальных каналов, а второй проходил по всей ширине канала. Для каждого взаимного расположения объектов фиксировались напряжения на выходах азимутальных каналов и соответствующее им количество разрешаемых объектов (один или два). Использовалась нейронная сеть, предназначенная для распознавания образов с 500 скрытыми слоями. В процессе тестирования определение количества объектов осуществлялось без ошибок.

Заключение. Рассмотренные в статье методы измерения углового положения и разрешения объектов дают сравнительно небольшие ошибки измерения, не превышающие десятых долей градуса. Преимуществом нейросетевого метода является то, что он обеспечивает высокие точность измерения азимута и разрешение при небольших вычислительных затратах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Леонов А.И., Фомичев К.И.* Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
- [2] *Татузов А.Л.* Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009. 432 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕСТАЦИОНАРНЫМ ФОНОМ

Косых В.П., Громилин Г.И., Потатуркин О.И., Яковенко Н.С.
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Исследуется эффективность применения нейросети для обнаружения в изображениях с пространственно-нестационарным фоном «точечных» объектов, форма которых определяется характеристиками оптико-электронного тракта регистрации. Обучающие наборы данных учитывают многообразие фоновых ситуаций и изменчивость формы сигнала от объектов, обусловленную их движением. Приведены результаты обнаружения объектов различной яркости на реальных фоновых изображениях, полученных при наблюдении поверхности Земли с геостационарной орбиты.

Ключевые слова: «точечный» объект, пространственно-нестационарный фон, нейросеть, обнаружение

APPLICATION OF NEURAL NETWORK FOR DETECTING SMALL-SIZED OBJECTS IN IMAGES WITH SPATIALLY NON-STATIONARY BACKGROUND

Kosykh V.P., Gromilin G.I., Potaturkin O.I., Yakovenko N.S.
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

The efficiency of using a neural network for detecting «point» objects, the shape of which is determined by the characteristics of the recording optical-electronic channel, in images with a spatially non-stationary background is studied. The training data sets take into account the diversity of background situations and the variability of the shape of the signal from objects due to their movement. The results of detecting objects of different brightness on real background images obtained during observation of the Earth's surface from a geostationary orbit are presented.

Keywords: «point» object, spatially non-stationary background, neural network, detection.

Введение. Одной из актуальных задач непрерывного мониторинга ближнего околоземного пространства является обнаружение потенциально опасных объектов посредством анализа изображений, получаемых в результате космической и аэросъемки. Частным вариантом этой задачи является обнаружение объектов с настолько малыми угловыми размерами, что их изображения, формируемые системой регистрации, определяются в основном характеристиками ее оптического и электронного каналов. При наблюдении на случайном пространственно-нестационарном фоне (облачный покров, земная поверхность) эти объекты проявляются как локальные аномалии фона. Повышению надежности обнаружения таких объектов способствует предварительное подавление фоновой компоненты, что достигается применением различных методов формирования ее текущей модели (по предшествующим кадрам [1], аппроксимацией фрагментов фона суперпозицией ортогональных функций [2], посредством оптимального линейного прогноза [3] и т.д.). Помимо этих, ставших уже классическими, методов все более широкое распространение в решении задач обнаружения и распознавания объектов находят методы, основанные на применении нейронных сетей, способных строить модели объектов и фона посредством предварительного обучения на представительном наборе их аналогов. Целью данной работы является исследование эффективности применения методов глубокого обучения для обнаружения локальных аномалий в изображениях с пространственно-нестационарным фоном.

Формирование обучающего набора данных. Подготовительный этап исследования состоял в формировании достаточно представительного множества изображений разнообразных фонов с аномалиями, обусловленными наличием в зоне наблюдения подлежащих обнаружению малоразмерных объектов. Поскольку при реальном космическом мониторинге околоземного пространства появление таких объектов является крайне редким событием, обучающий

набор был сформирован из синтезированных изображений. В них фоновой компонентой являлись фрагменты дневных RGB снимков Земли, полученных в разных погодных условиях с разных точек геостационарной орбиты спутниками Electro [4], а локальными аномалиями – изображения, удовлетворяющие параметрической модели, построенной по результатам стендовых испытаний системы регистрации с матричным фотоприемником [5]. Эта модель имеет вид

$$O(i, j) = A \int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_{i-1/2}^{i+1/2} \exp(-(((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2)/(2s^2))^a) dx dy,$$

где x_c, y_c – координаты смещения изображения объекта относительно центра некоторого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) фотоприемника, а s – характерный размер функции рассеяния точки оптического тракта, $a = 0.7$.

Синтезированное изображение, содержащее K локальных аномалий, строится в виде

$$D(i, j) = F(i, j) + \sum_k O_k(i - i_k, j - j_k), \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Здесь F – фоновое изображение размером $I \times J$ пикселей, K – количество аномалий, O_k – соответствующая модели дискретная функция, описывающая форму и яркость k -ой аномалии и определенная в малой окрестности W_k ФЧЭ с координатами (i_k, j_k) . Координаты i_k, j_k задаются случайным образом, но так, чтобы окрестности аномалий не перекрывались.

Для обучения и тестирования сети из 6 RGB снимков форматом 11136×11136 (рисунк 1), разбитых по 164 изображения форматом 640×640 пикселей, охватывающих всю видимую спутником поверхность Земли, синтезированы 3 серии фонов с аномалиями.



Рис. 1. Космические снимки Земли, служившие основой для формирования фоновых изображений.

В каждое изображение внесено по 49 модельных локальных аномалий (т.е. всего более 140 тыс. подлежащих обнаружению объектов). Средняя яркость объектов $\bar{B}_o$ в каждой серии синтезированных изображений пропорциональна среднему СКО фона $\bar{S}_b$ в серии: $\bar{B}_o = r_n \bar{S}_b$, $r_1 = 1, r_2 = 2, r_3 = 3$. Разброс яркости объектов в соответствии с приведенными в [5] оценками составляет $\pm 7.5\%$ от $\bar{B}_o$. На рисунке 2 приведены фрагменты синтезированных изображений из серии r_3 .

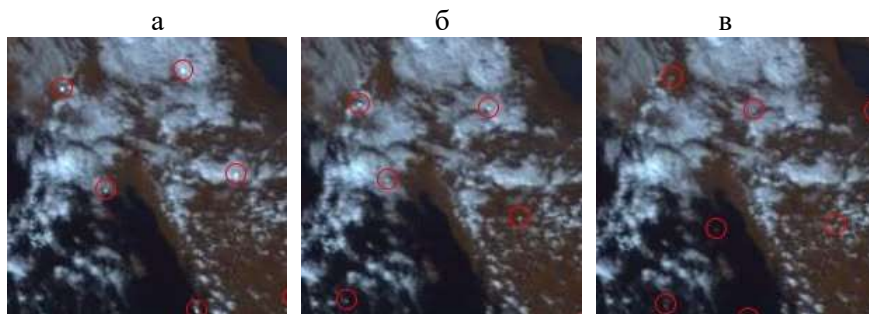


Рис. 2. Фрагменты синтезированных изображений, принадлежащих: а – серии r_3 , б – серии r_2 , в – серии r_1 . Кругами помечены окрестности внесенных аномалий.

Выбор модели нейросети. В качестве средства, реализующего технологию глубокого обучения, использовалась нейронная сеть YOLO, которая позиционировалась компанией разработчиком как одна из самых эффективных нейросетей для решения широкого спектра задач компьютерного зрения, обеспечивающая как надежное распознавание объектов интереса, так

и высокую точность определения их координат [6]. Выбор модели YOLO11n определялся компромиссом между производительностью, точностью, возможностью реализации (в т.ч. затратами времени на обучение) на доступном оборудовании и наличием достаточно полной эксплуатационной документации [7].

Результаты обнаружения малоразмерных объектов. Помимо трех серий с постоянными средними яркостями объектов была сформирована серия, объединившая изображения с объектами разных яркостей. Для обучения/тестирования модели YOLOv11n все изображения каждой серии, участвующие в эксперименте, случайным образом разбивались на три выборки: обучающую (~60%), валидационную (~20%) и тестовую (~20%). Обучение проводилось в течение 100 эпох. Проведено 4 варианта обучения/тестирования, когда обучение и тестирование выполнялись на данных, принадлежащих одной и той же серии, и 4 варианта, когда обучение выполнялось на одной серии, а тестирование – на другой. При этом тестирование выполнялось при двух значениях (0.25 и 0.5) порога достоверности (confidence threshold), характеризующего «уверенность» сети в правильности результата обнаружения. Результаты приведены в таблице.

Результаты обнаружения при разных режимах обучения.

	Обучение	Тестиров.	Всего	Conf Tresh	Пропущ.	Ложных
	1	2	3	4	5	6
1	r_1	r_1	9604	0.25	1162 (12.1)	1376 (14.3)
				0.5	1522 (15.8)	511 (5.3)
2	r_2	r_2	9604	0.25	118 (1.2)	599 (6.2)
				0.5	159 (1.6)	266 (2.8)
3	r_3	r_3	9604	0.25	27 (0.3)	121 (1.3)
				0.5	36 (0.4)	54 (0.6)
4	r_{123}	r_{123}	28812	0.25	1234 (4.3)	1428 (5.0)
				0.5	1659 (5.7)	508 (1.8)
5	r_1	r_3	9604	0.25	304 (3.2)	754 (7.8)
				0.5	541 (5.6)	284 (2.9)
6	r_3	r_1	9604	0.25	3394 (35.3)	1093 (11.4)
				0.5	3798 (39.5)	683 (7.1)
7	r_1	r_{123}	28812	0.25	1873 (6.5)	2953 (10.2)
				0.5	2707 (9.4)	1102 (3.8)
8	r_3	r_{123}	28812	0.25	3606 (12.5)	1464 (5.1)
				0.5	4075 (14.1)	853 (3.0)

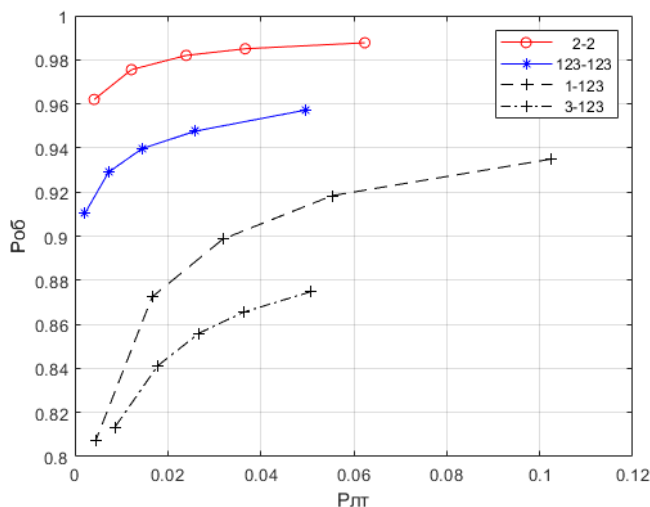


Рис. 3. Рабочие характеристики различных режимов обучения/обнаружения: 2-2 – обнаружение в серии r_2 сетью, обученной на r_2 , 123-123 – обнаружение в серии r_{123} сетью, обученной на r_{123} , 1-123 – обнаружение в серии r_{123} сетью, обученной на r_1 , 3-123 – обнаружение в серии r_{123} сетью, обученной на r_3 .

Здесь в колонке 1 указана серия, на которой сеть обучалась, в колонке 2 – серия на которой сеть тестировалась, в колонке 3 – истинное количество объектов в тестовой серии, в колонке 4 – порог достоверности при тестировании, в колонках 5 и 6 – количество пропущенных и ложно обнаруженных объектов, соответственно. В скобках в этих колонках указано процентное отношение к истинному количеству объектов.

Кроме этого, для части сформированных серий получена зависимость пропущенных и ложных объектов от порога достоверности, что позволяет построить для них рабочие характеристики, выражающие зависимость количества правильно обнаруженных объектов от ложных (рисунок 3). Здесь по вертикали отложена оценка вероятности обнаружения $P_{об}$, вычисленная как количество правильно обнаруженных объектов, нормированное на их истинное число в тестовой выборке, а по горизонтали – таким же образом нормированное число ложно обнаруженных объектов, обозначенное как $P_{лт}$.

Заключение. Из приведенных данных, в частности, следует, что для аномалий, яркость которых изменяется в пределах $\pm 7.5\%$ и в среднем двукратно превышает СКО фона (строка 2 таблицы), потери не превышают 4%, если сеть обучается на выборке с такими же аномалиями. Рабочая характеристика 2-2 на рис. 3 подтверждает это. Более яркие аномалии обнаруживаются еще надежнее, если сеть обучена на аналогичных данных (строка 3), и несколько хуже при обучении на более тусклых аномалиях (строка 5). Сравнивая строки 1, 5 и 7 таблицы можно заметить, что обученная на объектах малой яркости сеть дает лучшие результаты обнаружения на более ярких объектах как по числу пропущенных, так и по числу ложных. Для аномалий с большим разбросом яркостей предпочтительно обучение на аналогичных данных, что следует из сравнения строк 4, 7 и 8. Это подтверждается и сопоставлением рабочих характеристик 123-123, 1-123 и 3-123 на рисунке 3.

В целом представленные данные демонстрируют низкое число пропущенных объектов, яркость которых в 2 и более раз превышает среднее СКО фона, при сравнительно низком числе ложных тревог. При яркостях объектов, сопоставимых с СКО фона, количество пропусков, как и количество ложных тревог, значительно возрастают ($\sim 10\%$ от истинного числа объектов). Следует отметить, что последнее в значительной мере обусловлено присутствием в фоне объектоподобных образований, в частности, мелких облаков (например, в правой нижней четверти рисунка 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 124041700103–1)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tartakovsky A.G., Brown A.P., Brown J. Nonstationary EO/IR clutter suppression and dim object tracking // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference. Maui, Hawaii, 2010. P. 14-17.
- [2] Samson V., Champagnat F., Giovannelli J.F. Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery // Applied Optics. 2004. Vol. 43, No. 2. P. 257-263.
- [3] Kosykh V.P., Gromilin G.I., Yakovenko N.S. Joint processing of images in two spectral channels for small objects detecting // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 142-151.
- [4] Электро-Л. Архив снимков. URL: <ftp://electro@ntsomz.gptl.ru:2121> (дата обращения 10.09.2024).
- [5] Абилов В.В., Громиллин Г.И., Косых В.П., Стрельцов В.А., Яковенко Н.С. Аппроксимация изображения малоразмерного подвижного объекта, формируемого сканирующим многорядным приемником // Автометрия. 2024. Т. 60, № 5. С. 41-49.
- [6] Train computer vision models in seconds with Ultralytics YOLO. URL: <https://www.ultralytics.com/yolo> (дата обращения 15.08.2024).
- [7] Ultralytics YOLO11. URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolo11> (дата обращения 15.08.2024).

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Котлер В.Д., Платонова М.В., Климова Е.Г.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

В докладе представлена разработанная архитектура информационно-вычислительной системы, предназначенной для оценки потоков парниковых газов на основе спутниковых наблюдений. Приведена блок-схема системы и описание ключевых компонентов. Рассматриваются алгоритмы взаимодействия подсистем и особенности проектирования пользовательского интерфейса, ориентированного на удобство и интуитивную понятность.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, оценка эмиссии, спутниковые данные.

INFORMATION AND COMPUTING SYSTEM FOR ESTIMATION OF GREENHOUSE GAS FLOWS BASED ON SATELLITE DATA

Kotler V.D., Platonova M.V., Klimova E.G.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

The report presents the developed architecture of the information and computing system designed to assess greenhouse gas flows based on satellite observations. A block diagram of the system and a description of the key components are provided. The algorithms for interaction of subsystems and the design features of the user interface, focused on convenience and intuitiveness, are considered.

Keywords: information and computing system, emission assessment, satellite data.

Введение. Моделирование природных процессов и состояния окружающей среды требует комплексного подхода. Одной из ключевых задач является получение оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений, которая часто решается с помощью систем усвоения данных. Эти системы позволяют объединить данные измерений и численного моделирования для получения наилучшей пространственно-временной оценки исследуемых величин. Особенно актуальной задачей является анализ эмиссии парниковых газов, таких как метан и углекислый газ, с поверхности Земли.

Современные системы усвоения данных отличаются высокой вычислительной сложностью и требуют масштабируемой архитектуры [1-4]. Их реализация невозможна без создания специализированной информационно-вычислительной системы (ИВС), способной обеспечивать сбор, хранение, обработку, анализ и визуализацию больших массивов данных различной природы – от спутниковых наблюдений до результатов численного моделирования. Для эффективной реализации ИВС необходима разработка информационной модели, включающей функциональные и структурные компоненты. В данной работе представлено описание такой модели, построенной с использованием методов структурного анализа, включая декомпозицию процессов, диаграммы потоков данных и т.д.

Реализация информационно-вычислительной системы (ИВС) Разработанная информационно-вычислительная система (ИВС) представляет собой комплексный программный инструмент, предназначенный для оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли. Архитектура ИВС построена по модульному принципу и охватывает все этапы обработки данных – от их сбора и предобработки до моделирования, усвоения данных и визуализации результатов. В рамках системы реализованы вычислительные алгоритмы, поддерживающие ансамблевые методы усвоения данных, включая алгоритмы, основанные на ансамблевом фильтре Калмана. Использование микросервисной архитектуры, контейнеризации (Docker), а также параллельных вычислений и брокеров сообщений (RabbitMQ) позволяет обеспечить масштабируемость, отказоустойчивость и высокую гибкость в адаптации системы под различные задачи экологического мониторинга.

Реализован прототип ИВС, развернутый на вычислительном кластере с интеграцией химико-транспортной модели MOZART-4 и спутниковых данных AIRS [4-8]. Проведены тестовые расчёты, подтверждающие работоспособность системы и её способность эффективно обрабатывать большие объемы данных, обеспечивая получение оценок пространственно-временного распределения потоков метана. В дальнейшем планируется расширение функциональности системы, включая поддержку дополнительных источников данных (например, наземных станций мониторинга и реанализов), усовершенствование интерфейса и внедрение более совершенных алгоритмов машинного обучения для повышения точности расчётов и автоматизации анализа результатов

Заключение. Представлена концепция и архитектура информационно-вычислительной системы (ИВС) для оценки эмиссии парниковых газов с использованием спутниковых данных. Разработана структурная схема системы, описаны её ключевые модули и их функциональные назначения. Особое внимание уделено проектированию взаимодействия между подсистемами для обеспечения эффективной обработки и анализа данных, а также созданию пользовательского интерфейса, ориентированного на удобство и интуитивную понятность работы для специалистов различных уровней подготовки.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам профессору Лагутину Анатолию Алексеевичу и доценту 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] *Климова Е.Г.* Экономичный алгоритм стохастического ансамблевого сглаживания // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23, № 4. С. 381-394. DOI:10.15372/SJNM20200403.
- [2] *Klimova E.G.* Methods of estimation of greenhouse gases concentration in the atmosphere using observations and transport and diffusion model, based on the ensemble Kalman filter // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 2033. P. 191-195.
- [3] *Platonova M.V., Klimova E.G.* An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1715, No. 1. Art. No. 012021.
- [4] *Brasseur G.P., Jacob D.J.* Modeling of atmospheric chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [5] *Котлер В.Д., Платонова М.В., Климова Е.Г.* Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 21-30. DOI:10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30.
- [6] *Агошков В.И., Ботвиновский Е.А., Гусев А.В., Кочуров А.Г., Лебедев С.А., Пармузин Е.И., Шутяев В.П.* Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных измерений ИВС-T2. М.: Издательство сибирского отделения наук, 2008.
- [7] *Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70-78.
- [8] *Бычков И.В.* Инфраструктура информационных ресурсов и технологии создания информационно-аналитических систем территориального управления. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения наук, 2016.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ПЛОЩАДЕЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

Лапушинский А.С.^{1,2}, Рылов С.А.²

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск

В работе представлена геоинформационная система для автоматизированного мониторинга динамики площадей и границ водных объектов по данным со спутников Sentinel-2 и Landsat. Система обеспечивает автоматическую загрузку и обработку снимков для выбранных водоемов за заданный промежуток времени. С помощью веб-интерфейса пользователи могут посмотреть графики изменения площадей и непосредственные результаты выделения границ водоемов, полученные различными алгоритмами.

Ключевые слова: ГИС, спутниковые снимки, Sentinel-2, Landsat, мониторинг, водоемы, озеро, выделение воды, сегментация.

AUTOMATED MONITORING OF WATER BODIES' AREAS VIA SATELLITE IMAGES

Lapushinskii A.S.^{1,2}, Rylov S.A.²

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk

This paper presents a geographic information system for automated monitoring of water body area and boundary dynamics using Sentinel-2 and Landsat satellite data. The system automatically downloads and processes satellite images for selected water bodies over a specified time period. Using a web interface, users can view area change graphs and the direct results of water body boundary segmentation obtained by various algorithms.

Keywords: GIS, satellite imagery, Sentinel-2, Landsat, monitoring, lake, water extraction, segmentation.

Введение. Спутниковые снимки являются незаменимым источником информации для мониторинга изменения состояния водных объектов, особенно в труднодоступных местах. Так, с помощью спутниковых данных было установлено, что площадь акватории озера Убинское сократилась в два с половиной раза (с 425 до 165 км²) с 1989 по 2013 год [1]. Однако, получение информации об изменении площади водного объекта за продолжительный период времени является достаточно трудоемкой задачей, так как требует поиска и загрузки подходящих снимков, проведения сегментации водной поверхности на изображении, выделения интересующего объекта и анализа полученных результатов. Поэтому подобные исследования зачастую проводятся только для отдельных озер [1-3].

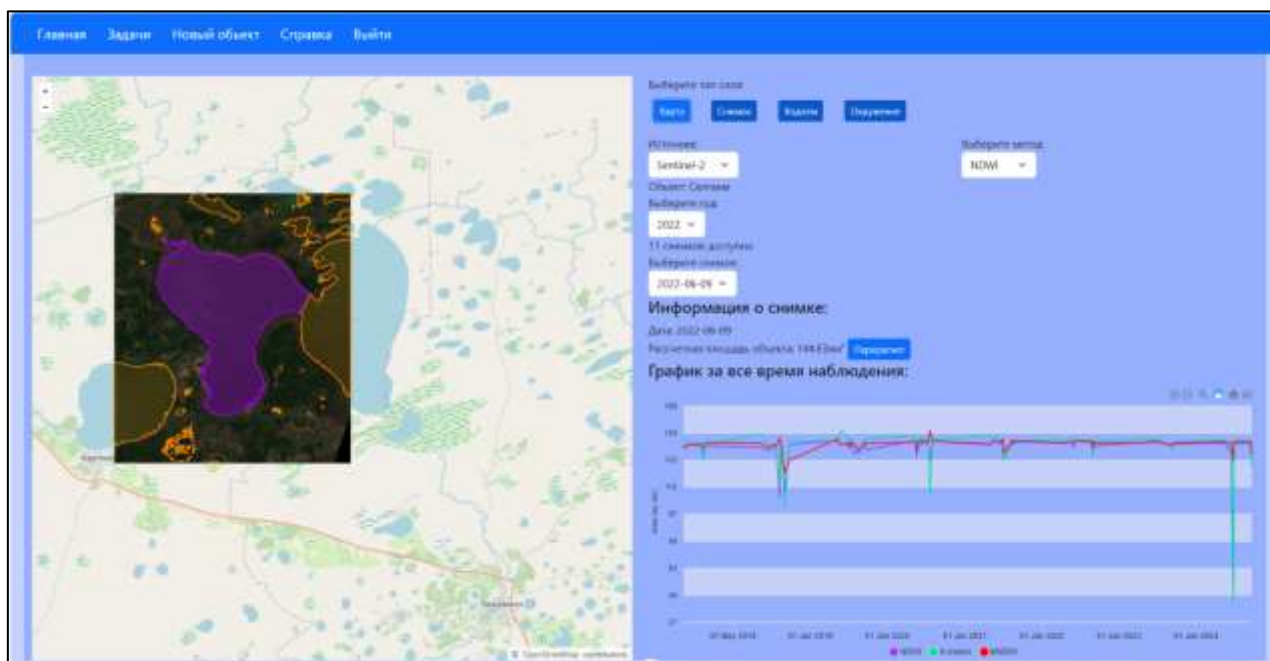
Целью данной работы является разработка геоинформационной системы для автоматизированного мониторинга площадей и границ озер по спутниковым снимкам.

Геоинформационная система автоматизированного мониторинга площадей и границ водных объектов. В разработанной системе [4-5] можно выделить три основные компоненты: серверная часть, база данных и веб-клиент. Сервер написан на языках Go, на котором реализовано взаимодействие компонент системы и запросов, и Python, на котором написаны методы обработки и загрузки данных. Для работы с растровыми и векторными данными используется библиотека GDAL. База данных развернута на основе PostgreSQL с расширением PostGIS. Также для непосредственного хранения файлов спутниковых снимков используется объектное хранилище MinIO. Веб-клиент (см. рисунок) был создан с помощью фреймворка Vue.js, а для отображения и навигации по карте была использована библиотека OpenLayers и сервис OpenStreetMap.

Авторизованные пользователи могут задавать задания на загрузку и обработку спутниковых снимков для выбранного озера на заданный период времени. На данный момент система позволяет автоматически находить подходящие снимки со спутников Sentinel-2 и Landsat. На

полученных изображениях водная поверхность выделяется с помощью методов на основе спектральных индексов NDWI и MNDWI [6], а также с помощью алгоритма кластеризации K-means. Затем выделяются лишь те водные пиксели, которые относятся к искомому водному объекту, и определяется его площадь.

Неавторизованные пользователи могут посмотреть информацию о тех водоемах, для которых уже производилась обработка. Для каждого такого водного объекта можно посмотреть имеющиеся спутниковые снимки, результаты выделения границ и график изменения площади водоема, полученный с помощью разных алгоритмов выделения воды. Также были разработаны алгоритмы для автоматического обнаружения ошибок, допущенных при выделении контуров водоемов, которые могут быть связаны с тенями, облачностью и т.д.



Веб-интерфейс геоинформационной системы с результатами мониторинга озера Салтаим.

Заключение. В работе представлена геоинформационная система для автоматизированного мониторинга площадей и границ водных объектов по спутниковым снимкам Sentinel-2 и Landsat. С помощью веб-интерфейса пользователь может посмотреть результаты выделения водного объекта для каждого снимка, полученные разными алгоритмами. Таким образом можно визуальнo проверить качество полученных результатов. Кроме того, разработанные алгоритмы выявления аномалий помогают автоматически находить возможные ошибки сегментации. Также возникает возможность для сравнения результатов работы различных алгоритмов выделения воды.

В дальнейшем планируется реализация большего числа методов выделения водной поверхности, разработка алгоритмов исправления ошибок сегментации и пропусков в данных, а также использование субпиксельного анализа для более точного определения площадей [7].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рылов С.А. Многолетний мониторинг усыхания озера Убинское по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8 с помощью специализированных алгоритмов сегментации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1, № 4. С. 102-108.
- [2] Лукерина Г.В., Лукерин А.Ю. Водный режим озера Кулундинское Алтайского края за последние 20 лет: гидрологические, гидрохимические и экологические аспекты // Рыбное хозяйство. 2025. № 3(3). С. 83-91.
- [3] Школьная Ю.Г., Ершов А.В. Мониторинг водных объектов с использованием ГИС-технологий на примере озера Камыстыбас // Регулирование земельно-имущественных отношений в России:

правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2022. № 3. С. 225-230.

- [4] Геоинформационная система мониторинга озер. URL: <https://lakes.ict.nsc.ru> (дата обращения: 09.09.2025).
- [5] Рылов С.А., Лапушинский А.С. Геоинформационная система для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2025. Т. 4. С. 46-50.
- [6] Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International journal of remote sensing. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025-3033.
- [7] Рылов С.А., Пестунов И.А. Определение площадей озер по данным со спутников серии Sentinel-2 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 5. С. 526-535.

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМОЙ УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Меденников В.И.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва

Рассматриваются в рамках работы научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего» возникшие онтологические проблемы интеграции данных дистанционного зондирования земли с цифровой платформой управления сельскохозяйственным производством, являющейся основой эффективного внедрения точного земледелия с единых позиций во всех хозяйствах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, цифровая платформа управления, сельское хозяйство, интеграция.

CHALLENGES OF INTEGRATION OF REMOTE SENSING DATA WITH A DIGITAL AGRICULTURAL PRODUCTION MANAGEMENT PLATFORM

Medennikov V.I.

Federal Research Center «Computer Science and Control» of the RAS, Moscow

The work of the world-class scientific center «Agrotechnologies of the Future» considers the emerging ontological problems of integrating remote sensing data with a digital platform for managing agricultural production, which is the basis for the effective implementation of precision farming from a unified position in all farms.

Keywords: remote sensing, digital management platform, agriculture, integration.

Введение. Вслед за развитыми странами и в России начался процесс внедрения в сельском хозяйстве технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и основанного на них точного земледелия (ТЗ), для которого необходимо организовать структуризацию и учет в оцифрованном виде значительного количества разнородных данных на полях с учетом антропогенной, природной, пространственной и сезонной неоднородности их. Однако отсутствие кропотливой, наукоемкой работы в этом направлении ведет к неэффективному внедрению этих технологий. Одним из существенных препятствий является также продолжающееся со времен информатизации каждым производственным и научным предприятием использование в работе своих онтологий, чему способствует и Минсельхоз. Отсутствие единых понятий мешает интеграции данных и функций управления как во внутреннем, так и в межотраслевом взаимодействии, а также разработке типовых решений в цифровизации экономики, что с неизбежностью ведет к цифровому феодализму.

Для устранения данных противоречий и перевода цифровой экономики с устаревших на современные технологии разработки, повышающие на порядок ее эффективность, предлагается единая цифровая платформа управления (ЦПУ) производством, полученная на основе математического и онтологического моделирования и представляющая единство цифровых подплатформ, отражающих необходимые цифровые стандарты, дополненные едиными для страны классификаторами [1,2]. В работе на основе исследований научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего» как раз показаны возникшие онтологические проблемы интеграции данных ДЗЗ с ЦПУ сельскохозяйственным производством на примере учета степени засоренности участка поля с посевами сельскохозяйственных культур и с подключением необходимых источников мульти- и гиперспектральных данных.

Единая информационная технологическая база данных растениеводства в рамках ЦПУ. В свое время еще на этапе выполнения подпрограммы «Электронизация сельского хозяйства» при внедрении ряда подсистем АСУ, а внедрением было охвачено свыше 1000 предприятий, столкнулись с потребностью кастомизации ПО почти на каждом из них, опять же в

силу онтологической и алгоритмической несовместимости данных и алгоритмов. Это касалось и агрономических задач, а как известно, сложность разработки информационных систем (ИС) пропорциональна количеству типов объектов в них [3]. Поэтому после мучений с кастомизацией было принято решение в части растениеводства разработать когнитивную карту (КК), единую для всех хозяйств страны, с выделением значимых факторов и построением структурной схемы причинно-следственных связей между ними. С этой целью была разработана экспертная система, в рамках которой силами ведущих экспертов в области почвоведения, удобрений, средств защиты растений, фитопатологии, агрономии, механизации, учета и планирования должны были быть определены наиболее значимые концепты, онтологически единые, описывающие все растениеводство и позволяющие наглядно представить рассматриваемую систему производства растениеводческой продукции. Совместная работа ведущих экспертов и специалистов по математической статистике привела в результате к выделению 946 значимых концептов в растениеводстве. В дальнейшем на основе формализованного математического моделирования меры подобия из данной КК была получена единая для всей страны информационная модель растениеводства, послужившая в эпоху ЦЭ одним из трех прообразов цифровых стандартов ЦПУ (рисунок 1).



Рис. 1. Единая для России информационная модель растениеводства.

Опыт интеграции данных ДЗЗ с ЦПУ сельскохозяйственным производством. Поскольку использование технологий ДЗЗ в сельском хозяйстве пока еще носит исследовательский характер, то эти данные пребывают в настоящее время в гетерогенном виде в разных организациях и хозяйствах, как, впрочем, и информация ДЗЗ других ведомств. Эффективным способом онтологического решения данной проблемы было бы создание единой ГИС ДЗЗ с единым центром дешифровки, откуда аграрии могли бы извлекать готовые оцифрованные снимки с размещением в БД ЦПУ, что предусмотрено в единой облачной базе данных технологического учета растениеводства. Свыше пяти лет назад была разработана концепция создания единой территориально-распределенной информационной системы ДЗЗ (ЕТРИС ДЗ) с интеграцией всех ИР ДЗЗ в некое единое геоинформационное пространство. Однако, судя по сведениям из интернета, ее реализация не приобрела значительного масштаба.

В целях же интеграции ЦПУ и данных ДЗЗ в части, например, борьбы с сорными растениями в информационной модели растениеводства предусмотрены соответствующие атрибуты. Например, в разделе «Культуры» в подразделе «Посевы» есть атрибуты: код культуры, код участка, а в «состояние растений» атрибуты: период обследования, фазы развития культуры, засоренность сорняками, степень засоренности, код сорняка, численность сорняков, экономический порог вредоносности (ЭПВ) сорняка.

При интеграции в ЦПУ результатов экспериментов, проведенных Самарским национальным исследовательским университетом имени академика С.П. Королева в рамках работы научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего» на опытных полях учета степени засоренности на основе ДЗЗ столкнулись онтологической несовместимостью понятий, используемых наукой и производством в этом вопросе.

Например, рассмотрим ситуацию с борьбой с сорняками химическими средствами. Всеми отмечается, что эффективность гербицидов зависит от множества факторов: погоды, структуры и влажности почвы, сорта и фазы развития растений и еще ряда других, что можно записать в общем виде

$$y_{ijk} = F_{ijk} (SO_{jm} z_{ijkmn}), \quad (1)$$

где y_{ijk} – порог вредоносности на i -ом поле, на котором выращивается j -я культура, находящаяся в k -ой фазе развития, SO_{jm} – j -я культура, выращиваемая в m -м севообороте, z_{ijkmn} – степень засорённости n -м сорняком i -ого поля, на котором выращивается j -я культура, находящаяся в k -й фазе развития m -го севооборота, $j \in J$, $i \in I$, $n \in N$, $k \in K$, $m \in M$. Заметим, что с развитием технологий ДЗЗ идет активный процесс поиска формализации закономерностей (1), например, в [4]. Тем не менее, в справочнике, выпущенном Минсельхозом [5] отражены сведения по ЭПВ лишь по наиболее важным сорнякам без указания общего ЭПВ для всех сорняков и без привязки к регионам, почвам, фазам развития и т.д. При этом засоренность разными исследователями измеряется в разных шкалах с несопоставимыми значениями.

Так, в работе [6] пишется «Согласно маршрутным обследованиям посадок в 2021-2022 г., сорная растительность в агроценозах картофеля представлена 24-29 видами из различных биологических групп: малолетние (81.4 %), многолетние (18.4 %). Численность сорняков варьирует от 29.5 до 38.1 шт/м², что превышает порог вредоносности (13.0-24.0 шт/м²) для однолетних двудольных и злаковых сорняков в 1.6-2.3 раза», что не совпадает с вышеприведенными данными из справочника. В работе же [7] утверждается, что «ЭПВ сорняков для картофеля — 5-12 малолетних и 2-4 экземпляра многолетних сорняков на 1 м²». Еще в одной работе [8] дается, условно говоря, оценка коэффициента перевода ЭПВ, рассчитанного на основе показателей проективного покрытия площади сорняками, равного 10-12% покрытия, в ЭПВ, рассчитанного на основе количественных показателей (15 экз/м²). Из этих работ видно, что нет единства в оценке как вредоносности сорняков, так и степени засоренности сорняками картофеля. Существуют методы оценки на основе общего количества [9], либо некоторого сочетания видового состава [10].

Заключение. Результаты экспериментов подтвердили предположения о том, что успешное внедрение ЦПУ с решением интеграционных проблем с данными ДЗЗ требует наличия структурированной и онтологически выверенной информации: о совершенных технологических операциях, например, из интернета вещей; результатов мониторингов; о состоянии культурных и вредных растений, почвы; о необходимом количестве применения техники и химических средств, а также другой, отраженной в БД ЦПУ, требуемой технологиями ТЗ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Меденников В.И. Математическая модель формирования цифровых платформ управления экономикой страны // Цифровая экономика. 2019. № 1(5). С. 25-35.
- [2] Будзко В.И., Меденников В.И. Математическая модель оптимизации структуры севооборотов на основе единой цифровой платформы управления сельскохозяйственным производством // Системы высокой доступности, М.: Радиотехника, 2022. Т. 18, № 4. С. 5-13.

- [3] *Брыль В.Н.* Информационно сложные задачи и пути их решения. URL: <https://sapr.ru/article/18728> (дата обращения 23.05.2025).
- [4] *Шпанев А.М.* Подходы к оценке вредоносности сорных растений в агроценозах // Вестник защиты растений. 2011. № 4. С. 57-70.
- [5] Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорняков сельскохозяйственных культур: справочник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016.
- [6] Защита картофеля от сорных растений. URL: https://izr.by/doc/rec18_23.pdf (дата обращения 23.05.2025).
- [7] *Собко О.А.* Флористический состав агроэкосистемы картофеля в Приморском крае // АгроЭко-Инфо: Электронный научно-производственный журнал. 2023. № 4. DOI:10.51419/202134418. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/4/st_418.pdf.
- [8] Агрохимическая вредоносность сорных растений в посевах зерновых культур. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agrohimicheskaya-vredonosnost-sornyh-rasteniy-v-posevah-zernovyh-kultur> (дата обращения 23.05.2025).
- [9] Оценка засоренности посевов. URL: https://studref.com/691924/agropromyshlennost/otsenka_zasorennosti_posevov (дата обращения 23.05.2025).
- [10] Засоренность посадок картофеля, размещенных по пласту многолетних трав в Ленинградской области. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zasorennost-posadok-kartofelya-razmeshchennyh-po-plastu-mnogoletnih-trav-v-leningradskoy-oblasti> (дата обращения 23.05.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АРТЕФАКТОВ ТУМАНА И ДЫМКИ

Наталенко Д.Н., Фаворская М.Н.

Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск

В работе исследуются вопросы применения глубоких нейронных сетей для устранения тумана и дымки на изображениях, что является важной задачей для последующей обработки изображений. Предложен метод, который сочетает применение глубоких нейронных сетей с физическими моделями и техниками коррекции цвета и контраста. Такой подход позволяет эффективно восстанавливать детали изображения, независимо от природы артефактов. Экспериментальные результаты демонстрируют значительное улучшение видимости и сохранение текстурной информации в сложных природных сценах.

Ключевые слова: Компенсация тумана, компенсация дымки, обработка изображений, нейронные сети, улучшение контраста, повышение резкости.

APPLICATION OF DEEP NEURAL NETWORKS TO COMPENSATE FOR FOG AND HAZE ARTIFACTS

Natalenko D.N., Favorovskaya M.N.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

The paper explores the application of deep neural networks for removing fog and haze from single images, which is an important task for subsequent image processing. A method is proposed that combines the use of deep neural networks with physical models and color and contrast correction techniques. This approach allows for effective restoration of image details, regardless of the nature of the artifacts. Experimental results demonstrate significant improvement in visibility and preservation of texture information in complex natural scenes.

Keywords: Fog compensation, haze compensation, image processing, neural networks, contrast enhancement, sharpness improvement.

Введение. В современных условиях обработки изображений одной из ключевых задач является устранение артефактов, вызванных неблагоприятными погодными условиями, в частности туманом и дымкой. Туман – это плотное атмосферное явление, связанное с конденсацией водяных паров, которое существенно снижает видимость и ухудшает качество изображений путем сильного ослабления света и снижения контраста. Дымка в свою очередь вызывает легкое размывание и уменьшение контраста, обусловленные присутствием частиц пыли, дыма или аэрозолей в воздухе. Все это требует разработки специализированных методов для восстановления четкости и детализации изображений.

Предложенный метод. Для устранения артефактов тумана и дымки используется глубокая сверточная нейронная сеть, которая реализует мультимасштабный алгоритм Retinex с адаптивным взвешиванием информации на разных масштабах. Входное изображение предварительно инвертируется, что позволяет лучше моделировать физические свойства рассеяния света в атмосфере и повышает качество последующей обработки. В основе архитектуры лежит использование обучаемых параметров гауссовых ядер, отвечающих за степень размытия на каждом масштабе. В отличие от классических подходов с фиксированными значениями, такие параметры позволяют сети адаптироваться к различным условиям съемки и плотности артефактов, обеспечивая более точное выделение структурных элементов изображения.

Для объединения информации на разных масштабах применяется механизм внимания, который генерирует пространственно-зависимые весовые карты. Эти карты формируются посредством сверточной подсети, состоящей из нескольких слоев с нелинейными активациями и нормализацией, после чего веса нормализуются с помощью функции Softmax. Такой подход позволяет модели динамически регулировать вклад каждого масштаба в итоговое восстановленное изображение в зависимости от локальных особенностей сцены, что значительно улучшает качество восстановления мелких деталей и текстур.

Восстановленное изображение получается суммированием мультимасштабных компонент, каждая из которых представляет собой разность логарифмов исходного изображения и размытых гауссовым ядром версий изображения, умноженную на соответствующее значение весового коэффициента. Далее применяется коррекция цвета и контраста с помощью метода простейшего цветового баланса, который устраняет цветовые искажения и повышает визуальную выразительность изображения, сохраняя при этом естественную цветовую гамму.

Процесс обучения модели осуществляется в режиме контролируемого обучения с использованием парных данных: задымленных изображений и соответствующих им эталонных чистых изображений без артефактов. Набор данных для обучения включает различные примеры парных изображений, частично собранных из наборов, найденных в сети Интернет, а также изображений, синтезированных вручную. Изображения предварительно нормализуются и масштабируются до фиксированного размера, что обеспечивает согласованность входных данных и стабильность процесса обучения. При необходимости используется аугментация данных, включающая случайные повороты, отражения и изменения яркости, что повышает устойчивость модели к разнообразию природных условий. Набор данных разделяется на обучающую и валидационную выборки для контроля качества обучения и предотвращения переобучения.

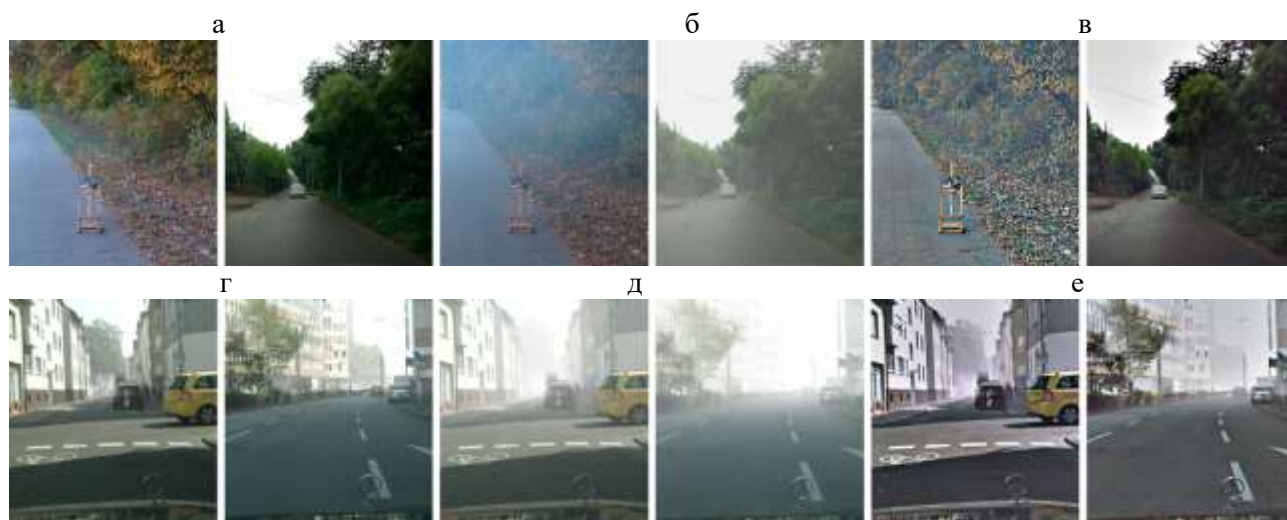
В качестве функции потерь используется среднеквадратичная ошибка между восстановленными и эталонными изображениями, что способствует точному восстановлению деталей и снижению артефактов. Оптимизация параметров сети проводится с помощью алгоритма Adam, обеспечивающего стабильную сходимость и эффективное обновление как сверточных весов, так и параметров гауссовых масштабов и механизма внимания.

Для тестирования использованы специально подготовленные наборы данных в открытом доступе, содержащие пары изображений с дымкой и без нее: O-Haze, I-Haze и SOTS-Outdoor. А также синтетический набор Foggy Cityscapes, содержащий изображения с туманом и без него. Изображения, помещенные в данные наборы, отражают разный подход к наложению тумана в разных местах, что позволит наиболее точно оценить работу предложенного метода. Для оценки качества модели использовались метрики: PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) и SSIM (Structural Similarity Index). Совместное использование этих метрик обеспечивает комплексную оценку эффективности алгоритма удаления тумана, учитывая, как точность восстановления деталей, так и визуальное качество результата.

Результаты тестирования метода на нескольких синтетических наборах с дымкой и туманом по метрикам PSNR и SSIM, а также сравнение его работы с другими методами, представлено в таблице.

Сравнение результатов работы методов на наборах данных с дымкой и туманом.

Метод компенсации	O-Haze		I-Haze		SOTS-Outdoor		Foggy Cityscapes	
	PSNR, дБ	SSIM	PSNR, дБ	SSIM	PSNR, дБ	SSIM	PSNR, дБ	SSIM
FSNet [1]	–	–	–	–	–	–	16.51	0.84
FS-MSF [2]	–	–	–	–	–	–	18.23	0.91
WFNet [3]	21.32	<u>0.72</u>	<u>18.64</u>	<u>0.82</u>	38.20	0.99	–	–
MSBDN [4]	16.69	0.60	15.68	0.71	33.67	<u>0.98</u>	–	–
FFANet [5]	17.52	0.61	15.52	0.74	36.39	0.99	–	–
AECRNet [6]	19.06	0.64	17.89	0.72	37.17	0.99	–	–
DeHamer [7]	19.47	0.70	18.13	0.73	36.63	0.99	–	–
C2PNet [8]	<u>20.83</u>	0.69	18.02	0.79	42.56	0.99	–	–
Предложенный	20.03	0.73	20.22	0.84	<u>39.68</u>	0.99	<u>17.38</u>	<u>0.89</u>



Примеры работы метода на синтетических изображениях: а – оригинальные изображения; б – изображения с дымкой; в – восстановленные изображения без дымки; г – оригинальные изображения; д – изображения с туманом; е – восстановленные изображения без тумана.

Предложенный метод превосходит многие из рассмотренных подходов в отношении качества восстановления изображений с туманом и дымкой. Высокие показатели PNSR и SSIM свидетельствуют о высоком качестве восстановленных изображений, при сохранении текстурной информации и визуальной целостности. Учитывая это, можно утверждать, что данный подход является эффективным инструментом для обработки сложных природных сцен, что подтверждается экспериментальными данными.

Визуальные примеры работы предложенного метода на синтетических изображениях представлены на рисунке.

Визуальное сравнение восстановленных изображений с оригинальными и затуманенными и задымленными версиями показывает высокие показатели качества, устраняя артефакты и сохраняя при этом высокое качество деталей. Из недостатков можно выделить повышенный уровень шума, который устраняется постобработкой.

Заключение. Таким образом, был реализован метод компенсации артефактов тумана и дымки на изображениях, основанный на глубоком обучении с использованием мультимасштабного алгоритма Retinex с обучаемыми параметрами гауссовых масштабов и механизмом внимания для адаптивного объединения информации с разных уровней. Экспериментальные результаты, полученные на нескольких общедоступных наборах данных, показали превосходство предложенного метода в сравнении с современными аналогами, что свидетельствует о его высокой эффективности в восстановлении деталей и текстур в сложных природных условиях. Разработанный подход представляет собой мощный инструмент для обработки изображений в неблагоприятных погодных условиях и может быть успешно применен в задачах экологического мониторинга и других областях, требующих повышения четкости и информативности визуальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cui Y., Ren W., Cao X., Knoll A. Image restoration via frequency selection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2024. Vol. 46, No. 2. P. 1093-108.
- [2] Tang C., Wang Y. FS-MSFormer: image dehazing based on frequency selection and multi-branch efficient transformer // Computers, Materials and Continua. 2025. Vol. 83, No. 3. P. 5115-5128.
- [3] Zhang S., Tao Z., Lin S. WaveletFormerNet: a transformer-based wavelet network for real-world non-homogeneous and dense fog removal // Image and Vision Computing. 2024. Vol. 146. Art. No. 105014.
- [4] Dong H., Pan J., Xiang L., Hu Z., Zhang X., Wang F., Yang M.-H. Multi-scale boosted dehazing network with dense feature fusion // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020. P. 2157-2167.

- [5] *Qin X., Wang Z., Bai Y., Xie X., Jia H.* Ffa-net: feature fusion attention network for single image dehazing // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34. P. 11908-11915.
- [6] *Wu H., Qu Y., Lin S., Zhou J., Qiao R., Zhang Z., Xie Y., Ma L.* Contrastive learning for compact single image dehazing // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. P. 10551-10560.
- [7] *Guo C.-L., Yan Q., Anwar S., Cong R., Ren W., Li C.* Image dehazing transformer with transmission-aware 3D position embedding // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. P. 5812-5820.
- [8] *Zheng Y., Zhan J., He S., Dong J., Du Y.* Curricular contrastive regularization for physics-aware single image dehazing // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023. P. 5785-5794.

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К РАНЖИРОВАНИЮ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ УЧАСТКОВ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ИХ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ОБОРОТ

Немова Н.А.^{1,2}, Колесников А.А.^{1,2}

¹ Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

Освоение месторождений полезных ископаемых неизменно связано с трансформацией территорий и образованием различных групп нарушенных земель. В основном территории безвозвратно уходят из хозяйственной деятельности или, с большими задержками и неполной рекультивацией, частично возвращаются для нового использования. Актуальность проблемы, заключается в оценке состояния техногенно нарушенных участков горными работами. Для этих целей необходимо разработать методический подход комплексной оценки, основанный на их ранжировании по уровню экологического воздействия на окружающую среду. Предлагается новый подход, основу которого будет составлять матрица, включающая параметры и показатели лабораторных и полевых исследований, оцениваемые состояние компонентов окружающей среды и перечень оцениваемых техногенных объектов, позволит всесторонне оценить качество нарушенных земель, для последующего выбора направления возврата их в пользование. Оценить качество нарушенных земель, с точки зрения последующего выбора направления возврата их в пользование.

Ключевые слова: подход к ранжированию, техногенно нарушенный участок, экологическая оценка, градостроительный оборот, ранжирование.

DEVELOPMENT OF AN APPROACH TO RANKING MAN-DAMAGED SITES AND ASSESSING THE POSSIBILITY OF INCLUDE THEM IN URBAN PLANNING

Nemova N.A.^{1,2}, Kolesnikov A.A.^{1,2}

¹ Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

The development of mineral deposits is invariably associated with the transformation of territories and the formation of various groups of disturbed lands. Basically, the territories are irrevocably removed from economic activity or, with significant delays and incomplete reclamation, are partially returned for new use. The relevance of the problem lies in the assessment of the state of technogenically disturbed areas by mining operations. For these purposes, it is necessary to develop a methodological approach to a comprehensive assessment based on their ranking by the level of environmental impact on the environment. A new approach is proposed, the basis of which will be a matrix including parameters and indicators of laboratory and field studies, the assessed state of environmental components and a list of assessed technogenic objects, will allow a comprehensive assessment of the quality of disturbed lands for the subsequent selection of the direction of their return to use. To assess the quality of disturbed lands, from the point of view of the subsequent selection of the direction of their return to use.

Keywords: ranking approach, man-made damaged area, assessment, urban development turnover, ranking.

Введение. Анализ открытых данных показал, что нет способа объективной оценки о систематизации объектов освоения месторождений по уровню экологической нагрузки на регион. С этой целью необходимо провести мониторинг состояния нарушенных земельных участков горными работами в районах с текущей и перспективной добычей и на этой основе предложить систему критериев оценивания. На сегодняшний момент существуют различные способы исследования территорий с использованием комплекса методов инструментальных, полевых, лабораторных и модельных цифровых измерений, позволяющих определить безопасные или допустимые уровни воздействия на окружающую среду (ОС) для отдельных этапов эксплуатации месторождений в разных районах для тех или иных видов полезных ископаемых.

Эксплуатация залежей полезных ископаемых всегда влечет за собой преобразование ландшафтов [1-3] и формирование разнообразных категорий земель, подвергшихся антропогенному воздействию. Эти земли могут быть ранжированы в зависимости от целей рекультивации. Зачастую такие территории исключаются из хозяйственного оборота навсегда, либо возвращаются к использованию лишь частично, с существенными задержками и неполным восстановлением. Данный факт подтверждается официальными источниками, включая статистические данные Росстата, сведения государственного баланса запасов, отчеты Росприроднадзора и другие документы.

В России каждый год около 60 тысяч гектаров сельскохозяйственных земель подвергаются нарушениям, а общий объем таких нарушений достигает 150 тысяч гектаров. Разработка месторождений открытым способом влечет за собой не только выемку горных пород, но и отчуждение значительных по площади земельных участков под их складирование, обладающих разной ценностью и относящихся к различным категориям. Более того, добыча полезных ископаемых зачастую вызывает заметную деформацию поверхности земли [1,4].

Таким образом, целью исследования является ранжирование нарушенных территорий горными работами и предложение метода оценки возможности включения их в градостроительный оборот, для последующего выбора направления их оптимального использования. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: провести анализ месторождений по добыче полезных ископаемых, ранжировать их по фактору допустимой или сверхдопустимой экологической нагрузки по критериям, выделить среди них техногенно нарушенные объекты, которые возможно включить в градостроительный оборот.

Разработка подхода к ранжированию техногенно нарушенных участков. Подходы к ранжированию нарушенных земельных участков горными работами по фактору допустимой или сверхдопустимой экологической нагрузки и уровню влияния могут отличаться в зависимости от заданного критерия и методов его расчета, а также поставленных задач. В нашем случае необходимо определить приоритетность таких земель с целью возможности включения их в градостроительный оборот на основе оценки состояния техногенных объектов по определенным критериям.

В более ранних работах [5] нами был проведен анализ подходов к оценке земель, подвергшихся техногенному воздействию в результате горной добычи [6,7]. Также, был предложен метод сбора и интерпретации геопространственной информации для оценки состояния территорий, занятых горнодобывающей промышленностью. Однако, для классификации таких земель требуется исчерпывающая, надежная и точная информация о техногенных объектах. Часто такая информация недоступна или ее получение затруднено по различным причинам. Кроме того, необходимы мониторинговые, лабораторные и полевые исследования, которые зачастую проводятся в недостаточном объеме или вовсе не проводятся. Особенно остро недостаток полных данных ощущается для территорий, которые считаются заброшенными или были выведены из использования до внедрения современных стандартов.

Основой подхода является База данных (БД) о нарушенных земельных участках горными работами и сформированная на первоначальном этапе из данных, полученных с открытых источников и данных дистанционного зондирования. Далее осуществляется аккумуляция информации, необходимой для анализа территорий, подвергшихся антропогенному воздействию. Затем производится их классификация, базирующаяся на критериях, относящихся к технологическим и экологическим аспектам.

В качестве оснований для разделения таких объектов были приняты признаки, позволяющие идентифицировать их по фактору допустимой или сверхдопустимой экологической нагрузки. К которым, в первую очередь, была отнесена постоянно увеличивающаяся площадь населения в горнодобывающих районах, за счет постоянного увеличения добычи полезных ископаемых, которые в свою очередь отчуждают большие территории земель, находящихся в различных категориях, и как следствие приводит к увеличению выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ, относящихся к опасным и особо опасным.

Предлагаемый подход включает следующие количественно-качественные критерии: вид антропогенного воздействия, приведшего к техногенной нарушенности земли; уровень техногенной нарушенности территории; содержание опасных и особо опасных элементов в окружающей среде (содержание загрязняющих веществ в воде, воздухе, почве); содержание радионуклидов в воде (Rn); радиоактивность горных пород (U, Ra, Th, K); комплексный показатель антропогенной нагрузки водоемов и водотоков, расположенных рядом с предприятиями; степень населённости; категории и угодья земельных ресурсов; наличие территорий с прошлым экологическим ущербом; наличие территорий с особым статусом: водозаборных сооружений, особо охраняемых природных территорий; особенности природно-климатических условий. Была сформирована матрица, включающая критерии оценивания и техногенные объекты.

Следующим этапом после формирования БД и матрицы производится ее заполнение данными, с последующей оценкой состояния нарушенных земельных участков горными работами и далее производится выбор направления рекультивации земель с возможностью функционального использования в системе рекреационных пространств. Территории, находящиеся в городской черте благодаря своему потенциалу, могут быть интегрированы в структуру города, преобразившись в ландшафтные зоны отдыха с разнообразными видами городской деятельности, т.е. выделить среди них техногенные объекты, которые возможно включить в градостроительный оборот.

Заключение. Необходимость использования данных лабораторных исследований компонентов природной среды даст возможность на высоком уровне провести оценку экологического ущерба от нарушения и загрязнения земель, конечной целью при определении которого является установление размера затрат, необходимых для предупреждения и устранения последствий негативных явлений, а также выбора направления последующего восстановления техногенно-нарушенных земель и возврата их в пользование. Ранжирование земель, пострадавших от деятельности человека, по степени влияния на окружающую среду даст возможность идентифицировать участки с превышением предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Это, в свою очередь, сократит вероятность применения этих территорий для организации зон отдыха. Предлагаемый метод оценки объектов освоения месторождений по уровню экологической нагрузки на регион позволит унифицировать и автоматизировать данный процесс для различных объектов.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы ЕГИСУ № 121051900145-1.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fang H.-Y., Chaney R.C. Introduction to environmental geotechnology // Taylor and Francis Group, 2016. P. 726. DOI:10.1201/9781315374734.
- [2] Prasad G., Ramesh M.V. Spatio-temporal analysis of land use/land cover changes in an ecologically fragile area Alappuzha District, Southern Kerala, India // Natural Resources Research. 2019. Vol. 28, No. S1. P. 31-42. DOI:10.1007/s11053-018-9419-y.
- [3] Moomen A.-W., Bertolotto M., Lacroix P., Jensen D. Inadequate adaptation of geospatial information for sustainable mining towards agenda 2030 sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2019. No. 238. Art. No. 117954.
- [4] Hao B.-Y., Kang L.-X. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi Province I: mine land reclamation model // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 1. P. 19. DOI:10.1155/2014/483862.
- [5] Kosarev N.S., Kolesnikov A.A., Reznik A.V., Nemova N.A., Ozhigin D.S. The use of geo-spatial data in the industrially disturbed land evaluation // Journal of Mining Science. 2023. Vol. 59, No 6. P. 1058-1065.
- [6] Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Экологические аспекты технологической парадигмы минерально-сырьевого комплекса при устойчивом развитии природы и общества // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2022. Вып. 1. С. 18-38.
- [7] Sun X., Shao H., Xiang X., Yuan L., Zhou Y., Xian W. A coupling method for eco-geological environmental safety assessment in mining areas using PCA and catastrophe theory // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29, No. 6. P. 4133-4148. DOI:10.1007/s11053-020-09682-8.

МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ

Ничепорчук В.В., Чернякова Н.А.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск

Представлен метод цифровой поддержки процесса обеспечения природно-техногенной безопасности территорий. Метод интегрирует описания иерархии задач разных уровней управления, машиночитаемого представления решений и компактной структуры данных. С использованием стандартов системной инженерии показаны направления повышения зрелости данных и трансформации бизнес-процессов оперативного реагирования и планирования превентивных мероприятий повышения безопасности населения, объектов и инфраструктуры.

Ключевые слова: организационное управление, интеллектуальная система, мониторинг принятых решений.

INFORMATION SUPPORT FOR SOLVING COMPLEX TASKS OF TERRITORIAL SAFETY MANAGEMENT

Nicheporchuk V.V., Chernyakova N.A.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk

The efficiency of ensuring natural and man-made safety of territories can be increased through digital support of management processes. The method integrates descriptions of the hierarchy of tasks for different levels of management, machine-readable representation of decisions and a compact data structure. The developed directions for increasing data maturity and transforming business processes of emergency response and planning of preventive measures to improve the safety of the population, facilities and infrastructure comply with the standards of systems engineering.

Keywords: organizational management, intelligent system, monitoring of decisions taken.

Введение. Среди факторов роста числа и масштабов чрезвычайных ситуаций (ЧС) одним из ключевых является принятие неэффективных, а порой неправильных решений в условиях неопределённости. Наблюдается противоречие между ростом объёма данных мониторинга, совершенствования процессов обработки и редкостью практического применения информационно-управляющих систем при решении сложных задач управления [1]. Сложными считаются задачи, требующие организации взаимодействия в ограниченное время и принятия решений при неполноте и нечёткости информации [2]. Результативность управления сложно оценить из-за низкого уровня зрелости данных [3]. Проблему пытаются решить за счёт роста количества информации, описывающей события, характеристики процессов и объектов. Это приводит к дополнительным затратам на фильтрацию, анализ информации, осмысление сложившейся ситуации и прогноза её динамики. Недостаточное внимание уделяется методам идентификации опасностей и угроз по слабым сигналам [4].

Повышение эффективности управления безопасностью территорий сдерживается фрагментарностью информационного пространства. Разработанная Министерством цифрового развития Система межведомственного информационного обмена не функционирует в РСЧС [5]. В следствии закрытости данных о безопасности территорий технологии управления на основе данных нечасто используются в органах власти. Наблюдается низкая заинтересованность специалистов и лиц, принимающих решения, в цифровизации управления, изменении существующих бизнес-процессов работы с информацией.

С целью решения перечисленных проблем разработан метод информационной поддержки решения сложных задач управления с применением интеллектуальных технологий. Формализация процессов обеспечения территориальной безопасности реализована с применением организационной модели управления [6], типовой структуры данных и знаний с исполь-

зованием методов системной инженерии [7,8]. Организационная модель систематизирует процессы обработки информации для принятия согласованных решений с учётом полномочий и ресурсной обеспеченности акторов. Конкретизация стратегий, целевых программ и других нормативных актов до уровня мероприятий и операций позволяет снизить неопределённости в принятии решений, определить степени свободы лиц, принимающих решения (ЛПР) и «узкие места» в управлении с повышенным риском принятия ошибочных решений.

Типизированное компактное представление данных требуется для обоснования решений при формировании планов реагирования на ЧС и инциденты, программ долгосрочных предупредительных мероприятий с применением совместного анализа характеристик объектов и процессов. С использованием международных стандартов формализованы процессы повышения зрелости данных. Правила связывания данных при формировании решений сформулированы с помощью онтологий. Реализация информационной поддержки решения сложных задач управления безопасностью территорий позволяет определить направления цифровизации органов местного самоуправления и государственного управления.

Формализация управления. На первом этапе моделирования процессов формирования решений выполнена декомпозиция задач, решаемых на разных уровнях управления. На федеральном уровне принимаются стратегии безопасности, регламенты и стандарты. На региональном и муниципальном уровнях управления формируются целевые программы и конкретные мероприятия, учитывающие специфику территорий. При этом уменьшается количество «степеней свободы» – выбор путей достижения целевых показателей и нормативов. При реализации решений исполнителями неопределённости минимизируются, а с помощью обратных связей выявляются слабые места планирования.

В качестве примера опишем решение задачи обеспечения пожарной безопасности. Согласно п. 2 ст. 19 ФЗ-69 [9] к полномочиям органов местного самоуправления относится создание в целях пожаротушения условий для забора в любое время года воды из источников наружного водоснабжения. В п. 6-15 ст. 5 постановления Правительства Красноярского края приведён перечень мероприятий по обустройству водоисточников, выполняемых за счёт субсидий [10]. В случае поддержки заявки на финансирование работ, администрация муниципалитета (сельсовета) издаёт постановление с указанием состава работ, сроков и способов контроля результатов.

Механизм формализации нормативно-правовых актов с целью автоматизации анализа качества управления пока отсутствует. Выборочный визуальный анализ решений на уровне сельсоветов показал несоответствие ресурсного обеспечения ожидаемым результатам. Информационная поддержка заключается в мониторинге пожарной обстановки, сборе данных о характеристиках территорий и ресурсном обеспечении. Внедрение сервисов оценки и картографирования рисков, уязвимости и защищённости территорий, других показателей позволит более качественно обосновывать масштаб и приоритетность выполнения мероприятий [11]. В сферу мониторинга должны также включаться задания исполнителям – последовательность работ, перечень техники, материалов и специалистов. При этом желательно, чтобы объём информации, используемый в принятии решений на каждом уровне управления, оставался постоянным, а агрегация данных не ухудшала понимание ситуации.

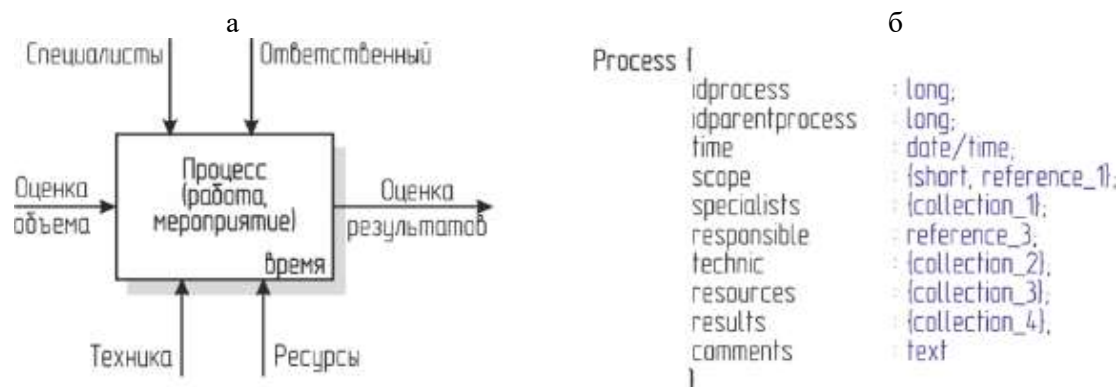
Информационная поддержка этапов решения задачи представлена в таблице.

Все этапы апробированы при решении ряда задач на региональном, местном и объектовом уровне [13]. К сожалению, эксплуатация информационных систем мониторинга и поддержки принятия решений не сопровождалась изменением бизнес-процессов функционирования операторов дежурных смен и экспертов-аналитиков. Можно предположить, что короткий жизненный цикл инновационного программного обеспечения связан не только с инерционностью государственного управления, но и с недостаточной формализацией и анализом принятых решений. Интеллектуальные сервисы (см. таблицу) в отличие от экспертных систем,

должны «замыкать» цикл управления [2,14]. Иными словами, сформированные машиной решения после корректировки ЛПР должны использоваться при синтезе последующих, итерационно формируя интеллектуальный капитал управления территориальной безопасностью.

Процессы решения задачи управления.

	Как есть	Предлагаемые технологии
Мониторинг водных источников	Ведение паспортов территорий. PowerPoint	Межсистемный информационный обмен, ETL
Анализ данных	Ручное формирование сводов. Excel	Связывание данных [12]. Распределённые BI системы.
Отображение результатов	Значки и надписи. Растровые изображения	Векторные и спутниковые топоосновы. Геопортал
Моделирование ситуации	Ранжирование территорий по одному показателю. Excel	Многопараметрический проблемно ориентированный анализ
Формирование решений	«Вручную». Word	База знаний и сценариев. Экспертные системы
Распространение решений	Отсутствует	База знаний и сценариев. Интеллектуальные сервисы



Представление элемента сценария ситуации в графическом виде (а) и его запись в виде объекта (б).

Мониторинг принятых решений. Запись принятых решений через декомпозицию задач до процессов и операций реализована с использованием методологии SADT [15]. Решения описываются как множества процессов (рисунок), выполняемых последовательно. Для распараллеливания процессов используются триггеры (логические операции) с переходом от IDEF0 к нотации IDEF3.

Такая форма является более гибкой по сравнению с продукционным представлением в виде правил «Если... То... Иначе...», поскольку легко преобразуется из графики в текст и машиночитаемый код формата xml или json. Преимуществом предлагаемой формы является единое описание решений, событий и сценариев ситуаций в планах действий.

Стрелки слева показывают состав информации, используемый при реализации процесса. Результат выполнения процесса задаёт требования к реализации последующих процессов. Верхние стрелки (управление) определяют потребность в специалистах, задействованных в проведении работ, и ответственного за мероприятие, в задачи которого входит контроль хода выполнения, корректировка подпроцессов и информационный обмен с вышестоящим уровнем управления о ходе выполнения работ и потребности в ресурсах. Нижние стрелки (ресурсы) определяют потребность в технике с детализацией, в случае необходимости, до каждой единицы, расходных материалах, восполнение которых также можно представить в виде отдельного процесса. Примерное время выполнения основного процесса позволяет планировать решения по ротации формирований, объём необходимых ресурсов, начало выполнения следующего процесса, порядок контроля и другие важные для управления характеристики.

Справа (рисунок б) показано представление в виде класса переменных. Переменные `idprocess`, `idparentprocess` определяют положение процесса в общей схеме управления, `comments` используется для хранения текстовых комментариев экспертов. Для означивания полей `scope` и `responsible` используются сущности модели данных [8]. Поля `specialists`, `technic`, `resouces`, `results` представляются массивами данных (коллекции пар справочник / числовое значение).

Графическое представление сценариев повышает наглядность восприятия управленческих решений в виде последовательности действий по ликвидации ситуации и проведению мероприятий защиты. Возможность декомпозиции процессов позволяет определить объём информации, необходимый и достаточный для каждого уровня управления. Такая запись ситуации позволяет сформировать несколько решений для одного сценария с учётом сферы ответственности конкретного лица, принимающего решения.

Заключение. Анализ функционирования системы обеспечения безопасности территорий показал потребности в высококачественных данных и расширения сферы мониторинга для успешного ведения как текущей деятельности, так и планирования на долгосрочную перспективу. В рамках представленного метода концептуально описаны процессы формализации решений. Включение положений нормативных документов в процессы обработки данных позволит реализовать цель цифровой трансформации управления: минимизировать количество специалистов, не принимающих решения. Сочетание распределённых информационных ресурсов с независимыми интеллектуальными сервисами для их обработки способствует исключению акторов с «разомкнутым циклом управления», использующих избыточное количество данных и не принимающих решения либо контролирующих обеспечение безопасности территорий при отсутствии критериев качества решений.

Описанный в работе метод апробируется в нескольких муниципалитетах Красноярского края. Результаты показали эффективность «управления на основе данных», многократного использования информации как стратегически значимого актива. Подготовлены предложения использованию результатов работы в Координационном центре управления регионом и Центре управления кризисными ситуациями Красноярского края.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тасейко О.В., Ничепорчук В.В., Постникова У.С. Мониторинг безопасности территорий. Красноярск: СибГУ им. Решетнёва, 2024. 186 с.
- [2] Колесников А.В., Кириков И.А. Методология и технология решений сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
- [3] DAMA-DMBOK: свод знаний по управлению данными. М.: Олимп-Бизнес, 2020. 828 с.
- [4] Nicheporchuk V.V. Method of using hazard criteria for identifying hazardous situations // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2534. P. 427-433.
- [5] Единая информационная платформа национальной системы управления данными. URL: <https://nsud.gosuslugi.ru> (дата обращения 03.06.2025).
- [6] Ничепорчук В.В. Исследование информационной обеспеченности взаимодействия в РСЧС // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21, № 4(82). С. 43-47.
- [7] Косяков А., Свит У. и др. Системная инженерия. Принципы и практика. М.: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
- [8] Ничепорчук В.В., Кобыжакова С.В. Технология цифровизации управления безопасностью территорий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 1(37). С. 104-113.
- [9] Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 19.10.2023) «О пожарной безопасности». URL: <https://base.garant.ru/10103955> (дата обращения 12.06.2025).

- [10] Постановление Правительства Красноярского края от 13.12.2019 № 703-п «Об утверждении Порядка предоставления и распределения субсидий бюджетам муниципальных образований Красноярского края на обеспечение первичных мер пожарной безопасности». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2400201912180006> (дата обращения 13.06.2025).
- [11] *Абасов Н.В., Акбулатов Э.Ш., Андрианова А.В. и др.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: тематический блок «Региональные проблемы безопасности». М.: МГОФ «Знание», 2024. 644 с.
- [12] *Гилёк С.А., Ничепорчук В.В.* Связывание наборов данных для решения задач информационной поддержки управления лесопожарными рисками // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19, № 5. С. 28-39. DOI:10.32686/1812-5220-2022-19-5-28-39.
- [13] *Ноженкова Л.Ф., Ничепорчук В.В.* Технологии комплексной поддержки управления природно-техногенной безопасностью // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 4. С. 109-121. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.009.
- [14] *Кобринский Б.А.* Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: реперные точки // Избранные научные труды XXIV Международной научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2021)». 2022. С. 38-45.
- [15] *Блюмин А.М., Калянов Г.Н.* Проектирование информационных систем. Учебное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2023. 312 с.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЁХЦВЕТНЫХ КОЛОРИМЕТРОВ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ МАЛЫХ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С.

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск

Эксперименты по определению цветовых различий между парами монохроматических стимулов обнаружили их спектральную нелинейную зависимость. Сравнение количественных характеристик цветового различия в цветовых пространствах CIE LAB x,y,z и CIE LUV выполнялось методом вычислительного эксперимента. Выявлено, что графики зависимостей цветового различия от доминирующей длины волны в этих пространствах подобны. Величины цветового различия отличаются на порядок, их минимальные и максимальные значения достигаются для одних и тех же доминирующих длин волн. Метод Оцу для установления порога бинаризации для полутонового изображения впервые применен к задаче сегментации изображения по насыщенности цвета.

Ключевые слова: цифровое изображение, доминирующая длина волны, насыщенность, RGB-пространство, колориметрия.

FEATURES OF USING THE THREE-COLOR COLORIMETERS FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SMALL COLOR DIFFERENCES

Palchikova I.G., Smirnov E.S.

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Novosibirsk

Experiments to determine color differences between pairs of monochromatic stimuli have revealed their spectral nonlinear dependence. The comparison of quantitative characteristics of the color difference in CIE LAB; x,y,z and CIE LUV color spaces was performed by the numerical experiment. It was revealed that the graphs of color difference dependencies on the dominant wavelength in these spaces are similar. The values of color difference differ by an order of magnitude, their minimum and maximum values are achieved for the same dominant wavelengths. The Otsu method for setting the binarization threshold for a halftone image was first applied to the problem of image segmentation with the color saturation.

Keywords: digital image, dominant wavelength, saturation, RGB space, colorimetry.

Введение. Экспертное криминалистическое описание документов содержит визуальную оценку цвета образца, которая основывается на применении специальных цветовых атласов [1] или ориентирована на спектральные цвета. Количественное описание цвета в решении задач технико-криминалистической экспертизы документов [2] осуществляется, например, с помощью программно-аппаратного комплекса «Docucenter Nirvis PROJECTINA». Современные методы количественной оценки цветового различия образцов регламентируются ГОС-Том [3] и основываются на вычислении цветового различия по координатам цвета образцов с применением формул CIELAB в универсальном цветовом пространстве. Однако, с качественными визуальными экспертными оценками хорошо коррелируют прежде всего такие интегральные характеристики как доминирующая длина волны (ДДВ) и насыщенность цвета (НЦ) [4], которые так же являются объективными количественными характеристиками.

В настоящей работе выполнено сравнение параметров цветности в различных цветовых моделях, и показана возможность разделения равнояркостных стимулов по насыщенности с помощью предложенного модифицированного нами метода Оцу [5].

Характеристики цветового тона. Колориметрическая система основана на принципах трихроматизма и законах Грассмана пропорциональности и аддитивного смешения цветовых стимулов. Любой цвет может быть визуально уравнен точными количествами трёх основных стимулов (RGB). Эта концепция позволила для количественного описания цвета создать различные цветовые модели с различающимися координатными пространствами [6]. Координаты цвета в любой выбранной модели рассчитываются исходя из значений RGB, которые задаются, например, выходными данными колориметра. Математические преобразования координат

нат из одной модели в другую в общем случае являются нелинейными. Поэтому и количественные оценки цветовых различий для одних и тех же пар цветовых стимулов зависят от выбранного пространства и могут различаться в них.

В работе методом математического моделирования выполнено изучение неоднородностей цветового пространства колориметров, в которых свет от стимула (или образца) разделяется на триплет яркостных сигналов RGB посредством фотоматрицы. Каждый из сигналов подвергается аналого-цифровому преобразованию с разрешением 8 бит на канал. В расчётах использовался спектральный локус₁₀ для колориметрического наблюдателя с углом зрения десять градусов. На рисунке 1 представлена иллюстрация геометрического способа определения ДДВ стимула на диаграмме цветностей.

Геометрическая форма локуса на диаграмме цветности xu определяется свойствами визуального восприятия и была построена [3,4] на основе экспериментов. При расчете ДДВ промежуточным результатом является цветовой угол α (см. рисунок 1), который позволяет включить в рассмотрение пурпурные цвета наравне с монохроматическими. Чтобы выявить влияние формы локуса на расчётные значения ДДВ мы рассчитали спектральное [7] приращение ДДВ (Δ ДДВ) при изменении цветового угла на 0.5° . На рисунке 2 приведены результаты расчёта.

На рисунке 2 имеются две области со значениями Δ ДДВ < 1 , в которых чувствительность метода определения малых цветовых различий с помощью ДДВ будет наибольшей. То есть в этих областях различие цветов пары стимулов менее чем на 1 нм приведёт к изменению цветового угла на 0.5° . В остальных областях для различения цветов этих стимулов необходимо уменьшить цветовой угол.

Координатное пространство RGB содержит только яркостные составляющие цвета, а собственно цветовой тон необходимо находить путём вычисления ДДВ. Известны цветовые пространства, в которых хорошо разделяются яркостная и цветовая составляющие. В пространстве HSV цвет описывается через координаты: оттенок (Hue), насыщенность (Saturation) и значение (Value, либо Brightness). Результаты численного эксперимента по сравнению характеристик цвета в пространстве RGB и HSV приведены на рисунке 3.

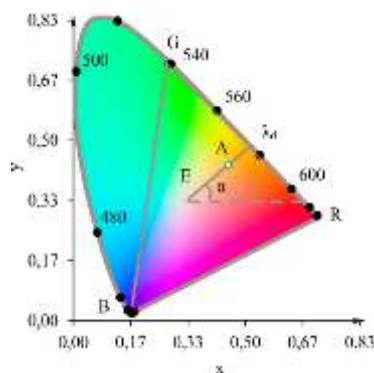


Рис. 1. Диаграмма цветности CIE 1931 с координатами (x,y) для локуса₁₀. Длины волн (в нм) спектральных цветов указаны на локусе. Цветовой угол α для точки цвета А отсчитывается против часовой стрелки от луча, выходящего из точки белого Е и параллельного оси x, Е – равноэнергетический источник излучения. Координата ДДВ на локусе обозначена как λ_d . Насыщенность цветов с λ_d возрастает вдоль прямой ЕА от 0 до 1, причем 1 – непосредственно на локусе.

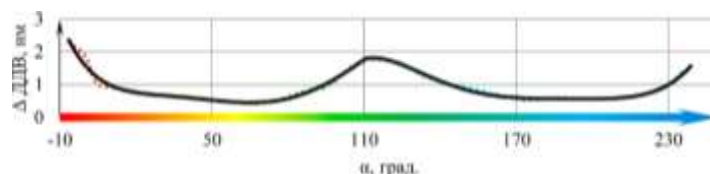


Рис. 2. Спектральная зависимость Δ ДДВ. Окраска оси абсцисс обозначает соответствие угла и спектрального цвета.

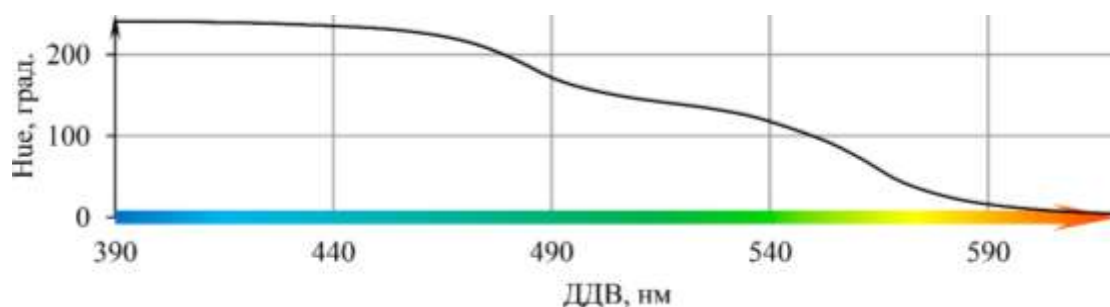


Рис. 3. Зависимость Hue от ДДВ.

График на рисунке 3 показывает нелинейную зависимость Hue от ДДВ: на графике присутствуют три области, в которых значительное изменение ДДВ слабо влияет на величину Hue. Именно в этих областях (а экспертов интересует главным образом область синих цветов, которая соответствует наиболее часто используемому цвету чернил) в наибольшей степени изменяются пересчетные коэффициенты от RGB к Hue. Учитывая, что ДДВ является проекцией точки цвета на локус, можно утверждать, что ДДВ – это более подходящий параметр для количественных оценок спектральных цветов в задачах экспертной оценки. Представленные данные и результаты численного эксперимента убедительно это показывают.

Количественная оценка цветового различия. Сравнение количественных характеристик цветового различия в нескольких цветовых пространствах выполнялось с помощью набора значений RGB, которые вычислялись для ДДВ в диапазоне от 400 нм до 640 нм с шагом 1 нм программой SPECTRA [7]. Цветовое различие рассчитывалось как евклидово расстояние между двумя соседними точками цвета из набора.

Набор данных R, G, B преобразуется в координатное пространство x, y, z согласно [8] по формулам:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,769 & 1,752 & 1,13 \\ 1,0 & 4,59 & 0,06 \\ 0 & 0,056 & 5,594 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \begin{cases} x = X/(X+Y+Z), \\ y = Y/(X+Y+Z), \\ z = Z/(X+Y+Z), \end{cases}$$

Цветовое различие между соседними точками цвета из набора данных в координатном пространстве x,y,z определяется по формуле:

$$\Delta_{xyz} = \sqrt{\frac{1}{3}[(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2 + (z_{n+1} - z_n)^2]}, \quad n = 1, 2, 3 \dots 303,$$

где n – номер цветовой точки в наборе.

Согласно ГОСТ [9] количественные характеристики цветового различия определяются в цветовом пространстве CIE 1976 $L^*a^*b^*$, где цвет определяется через координаты (L^* , a^* , b^*), которые получают преобразованием [9] координат цвета (X , Y , Z). Координата L^* определяет светлоту стимула, координата a^* – положение цвета в диапазоне от зеленого до красного, b^* – от синего до желтого. Полное цветовое различие ΔE_{ab}^* рассчитывается как евклидово расстояние между двумя соседними точками цвета:

$$(\Delta E_{ab}^*(n))^2 = (L_{n+1}^* - L_n^*)^2 + (a_{n+1}^* - a_n^*)^2 + (b_{n+1}^* - b_n^*)^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots 303,$$

где n – номер цветовой точки в наборе.

Во многих приложениях [10] величина $\Delta E_{ab}^* = 3$ принимается за порог визуального цветоторазличения, т.е. цвета, для которых полное цветовое различие меньше трех, при визуальной оценке наблюдателем будут достоверно неразличимы.

Для решения экспертных задач представляют интерес цветовые пространства, которые приближены к перцептивно равномерному. Например, цветовое пространство CIE LUV, которое позволяет определить различие цветов для человека с «усреднённым» зрением. Параметр L описывает яркость цвета, значения u определяют положение точки цвета в диапазоне от зеленого до красного, а значения v – от синего до фиолетового. Когда u и v равны 0, то величина

L определит градацию серого в монохромном изображении. Координаты (L , u , v) получают соответствующим преобразованием координат цвета (X , Y , Z) [8, 11].

Цветовое различие ΔE_{uv}^* в пространстве CIE LUV рассчитывается по формуле:

$$(\Delta E_{uv}^*(n))^2 = 10^4 \left[(u_{n+1}^* - u_n^*)^2 + (v_{n+1}^* - v_n^*)^2 \right], \quad n = 1, 2, 3 \dots 303.$$

На рисунке 4 приведены результаты вычислительного эксперимента. Величины цветового различия отличаются на порядок, их минимальные и максимальные значения достигаются для одних и тех же ДДВ, а графики зависимостей цветового различия от ДДВ в пространствах CIE LAB (рисунок 4, а), x,y,z (рисунок 4, б) и CIE LUV (рисунок 4, в) подобны. Коэффициент подобия этих графиков показан на рисунке 4, г и д. В области от синих (460 нм) до зелёных (540 нм) цветов коэффициент подобия k_{xyz} имеет нисходящую гиперболическую зависимость от ДДВ, ступень, и линейную зависимость – в остальной части спектра. На границе этих спектральных участков наблюдается ступенчатое увеличение коэффициента. Коэффициент k_{uv} демонстрирует близкую к линейной зависимости на каждом из упомянутых участков спектра со ступенью между ними.

Результаты численного эксперимента выявили, что для определения количественных характеристик цветового различия между стимулами могут быть использованы любые из рассмотренных цветовых пространств.

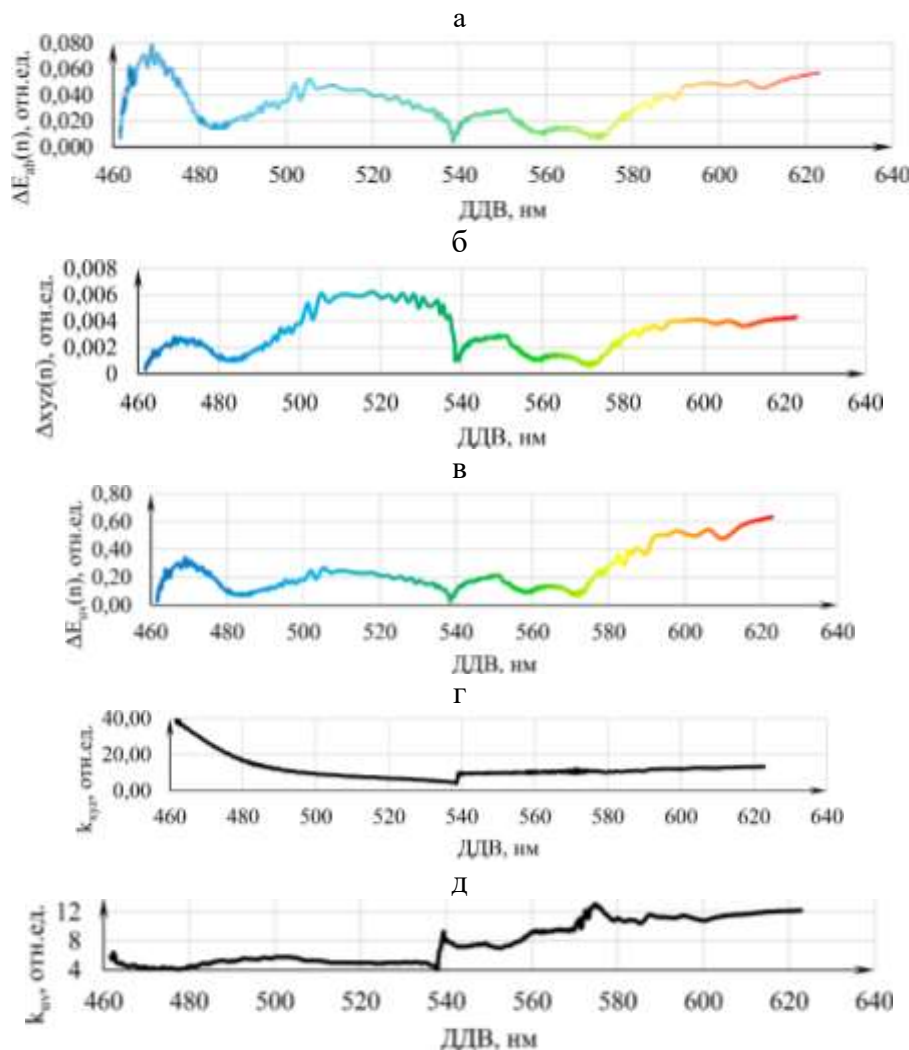


Рис. 4. Спектральные зависимости цветовых различий: а – ΔE_{ab}^* ; б – Δ_{xyz} ; в – ΔE_{uv}^* . Коэффициенты подобия графиков: г – ΔE_{ab}^* (ДДВ) и Δ_{xyz} (ДДВ); д – ΔE_{ab}^* (ДДВ) и ΔE_{uv}^* (ДДВ). Графики на рисунках а-в окрашены псевдоспектрально для наглядности.

Модификация метода выбора порога. Мы разработали и апробировали принципиально новый алгоритм для обнаружения и количественной характеристики дописок (выявлению цветовых различий) по фотоизображению сделанной записи. Сложность такого подхода заключается в необходимости выделения именно окрашенных областей на фотоизображении. Как правило, чернила ложатся на поверхность бумаги неравномерно, и на изображении штриха всегда есть не прокрашенные пятна. Кроме того, не всегда удается выделить область интереса именно в пределах штриха, захватывается и изображение бумаги. Все это вносит шум, искажает оценку разницы ДДВ НЦ и в пограничных случаях не позволяет выделить дописку.

Мы предложили объективный анализ изображения разделить на этапы цветовой сегментации и оценки окраски. В такой постановке блок цветовой сегментации выполняет функции предобработки, задавая карту границ разноокрашенных объектов для последующих более сложных вычислений. В начале обработки изображения из трехканальной матрицы цветного изображения рассчитывается матрица насыщенностей цвета. Гистограмма насыщенности в общем случае состоит из столбиков единичной высоты, что вносит ошибку в результаты работы алгоритма Оцу [5]. Для гарантированного срабатывания алгоритма Оцу гистограмма НЦ модифицируется путем масштабирования её шкалы, укрупняются диапазоны значений. Алгоритм Оцу применяется к полученной гистограмме НЦ. В результате модифицированный метод Оцу безошибочно разделит на кластеры требуемое изображение.

Основные этапы цветовой сегментации иллюстрирует рисунок 5 на примере разделения цветов на элементе атласа Macbeth ColorChecker [12]. Максимум межклассовой дисперсии приходится на значение НЦ, равное 14%.

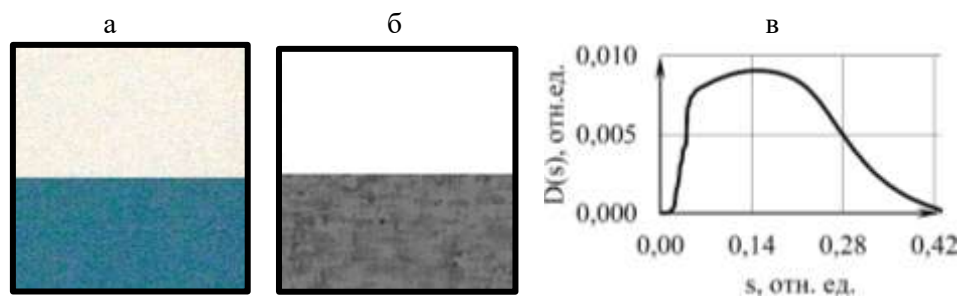


Рис. 5. а – изображение элемента атласа Macbeth ColorChecker; б – фрагмент атласа, разделённый на кластеры по НЦ; в – график межклассовой дисперсии $D(s)$ для двухсот сгруппированных значений насыщенности s .

Заключение. Если для визуальной перцепции метод количественной колориметрической оценки малых цветовых различий стимулов устанавливается национальным стандартом РФ [9], то для компьютерного зрения подобных стандартов не существует. Однако, по-видимому, с помощью компьютерного зрения возможно выявить и оценить цветовую разницу стимулов даже в том случае, когда визуально она не проявляется [13]. В задачах экспертной количественной оценки цвета и выявления малых цветовых различий между стимулами наиболее подходящим параметром является значение доминирующей длины волны. Цветовое различие между двумя стимулами может быть количественно определено в цветовых пространствах x_{yz} , CIE $L^*a^*b^*$, CIE Luv.

В задаче разделения изображения на кластеры традиционный метод выбора порога Оцу [5] базируется на гистограмме уровней серого в изображении. Предложена модификация алгоритма Оцу, в которой используется гистограмма насыщенности цвета. Модифицированный алгоритм позволяет разделить равнояркие, но разноокрашенные области изображения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Селиванов Н.А. Криминалистический определитель цвета. М., 1977. 29 с.

- [2] *Барина О.А.* Криминалистические исследования реквизитов документов, нанесенных современными материалами письма: теоретические и прикладные аспекты: Дис. ... канд. юрид. наук. Волгоград: Волгогр. акад. МВД России, 2016. 290 с.
- [3] CIE. Improvement to industrial colour-difference evaluation. Vienna: CIE Publication No. 142-2001, Central Bureau of the CIE; 2001.
- [4] *MacAdam D.L.* Color measurement: theme and variations. Springer Series in Optical Sciences. N.Y.: Springer-Verlag, 1981. 228 p.
- [5] *Otsu N.A.* A Threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62-66. DOI:10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [6] *Fairchild M.D.* Color appearance models. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 450 p. DOI:10.1002/9781118653128.
- [7] Efg's Computer Lab.: overland park. URL. <https://jupiter.chem.uoa.gr/pchem/courses/molspec/efg.htm> (дата обращения 11.07.2025).
- [8] *Луизов А.В.* Цвет и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [9] ГОСТ Р 52490-2005 (ИСО 7724-3: 1984). Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Ч. 3. М.: Стандартинформ, 2006. 6 с.
- [10] *Джадд Д., Вышецки Г.* Цвет в науке и технике. М.: «Мир», 1978. 592 с.
- [11] StudFile.net. <https://studfile.net/preview/4604156/page:3> (дата обращения: 11.07.2025).
- [12] *Mc Camy C.S., Marcus H., Davidson J.G.* A color rendition chart // Journal of Applied Photographic Engineering. 1976. Vol. 11. P. 95-99.
- [13] *Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С.* Интервальная оценка параметров цвета из цифровых изображений // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 1. С. 95-102. DOI:10.18287/2412-6179-2017-41-1-95-102.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю., Чурсин В.В.

СЦ ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
Новосибирск

В статье представлена методика оценки состояния посевов яровой пшеницы по данным прибора КМСС КА серии «Метеор-М». С использованием методов машинного обучения разработана и экспериментально проверена математическая модель, результатом работы которой является классификация состояния посевов по трем градациям: плохое, удовлетворительное, хорошее. Предложенная методика продемонстрировала точность 93% на тестовой выборке.

Ключевые слова: оценка состояния посевов, КА «Метеор-М», машинное обучение.

SPACE-BASED CROP CONDITION MONITORING IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

Panov D.Yu., Sakharova E.Yu., Chursin V.V.

Siberian Center of State Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», Novosibirsk

The article presents a methodology for assessing the spring wheat crops condition using data from the KMSS of the Meteor-M series spacecraft. Using machine learning methods a mathematical model has been developed and experimentally verified, the result of which is the classification of crops condition into three gradations: bad, satisfactory, and good. The proposed method demonstrated an accuracy of 93% on the test sample.

Keywords: assessment of the condition of crops, Meteor-M, machine learning.

Введение. В современном мире космические технологии прочно зарекомендовали себя как надежный инструмент для решения широкого спектра задач агропромышленного комплекса. Оперативный мониторинг значительных территорий позволяет своевременно принимать меры для снижения производственных потерь вследствие воздействия неблагоприятных факторов. Технические возможности российских КА серии «Метеор-М» создают необходимые условия для осуществления объективного контроля сельскохозяйственных угодий [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает создание качественных программных решений для обработки и представления данных. Целью настоящей работы является разработка методики оценки состояния посевов яровой пшеницы по данным прибора КМСС КА серии «Метеор-М».

Материалы и методы. Для проведения работы использовалась информация по полевым наблюдательным участкам сети Росгидромета в Новосибирской области, где в вегетационные сезоны агрометеорологами выполнялся мониторинг ряда характеристик растительного покрова. С периодичностью один раз в два дня специалистами присваивались оценки состояния посевов с учетом особенностей развития культур: изреженность, высота, засоренность, повреждения, относительная продуктивность посевов [2]. При выполнении работы данные оценки были приняты за эталон.

В качестве космических измерений использовались атмосферно-скорректированные изображения комплекса многозональной спутниковой съёмки КА серии «Метеор-М», полученные посредством системы ВЕГА-Science (Институт космических исследований РАН) [3]. В пределах границ наблюдательных участков рассчитывались средние значения вегетационных индексов NDVI, которые вместе с результатами агрометеорологических обследований (КСХ-1м) послужили основой для создания уникальной базы данных космических и наземных измерений за период наблюдений с 2021 по 2023 г. (рисунок 1).

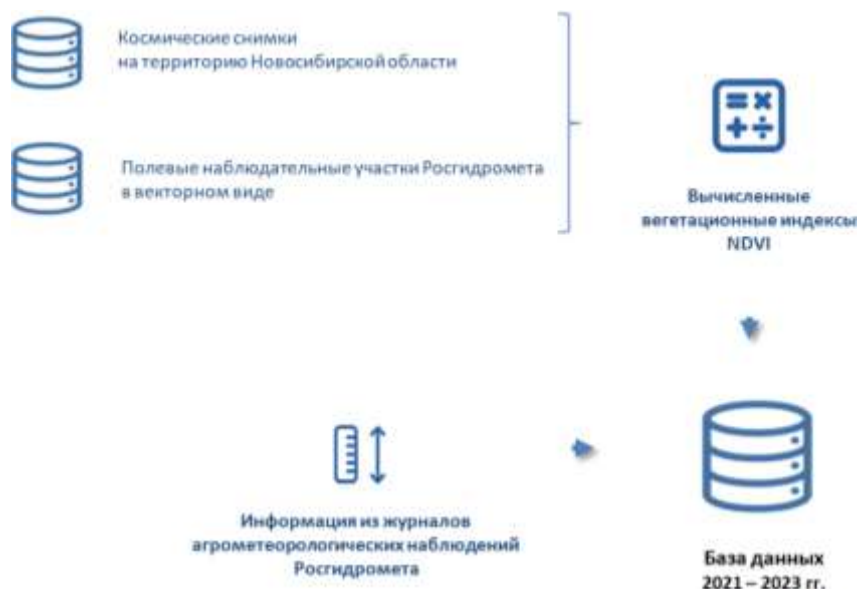


Рис. 1. Схема формирования базы данных космических и наземных наблюдений.

Разработка математической модели оценки состояния посевов осуществлялась с помощью алгоритма машинного обучения XGBoost, который широко применяется в задачах регрессии и классификации [4]. Среди главных преимуществ XGBoost выделяется высокая производительность и возможность оптимизации системы. Данный алгоритм является ансамблевым и минимизирует функцию потерь за счет итеративного добавления новых моделей, которые учитывают ошибки предыдущих [5]. При обучении входными данными являлись вегетационные индексы NDVI, рассчитанные в период с июня по август. В качестве целевых – эталонные оценки состояния посевов яровой пшеницы. За совпадающие даты космических и наземных наблюдений сформировано 629 наборов данных, которые были разделены на обучающую и валидационную выборки с соотношением 70% на 30% соответственно. С целью обеспечения оптимальной производительности модели выполнена настройка скорости обучения, глубины и количества деревьев решений. Отдельное внимание уделено предотвращению излишнего обучения, при отсутствии улучшений качественных показателей процесс завершался. Реализованная математическая модель производит расчеты по оперативным спутниковым данным. В процессе работы учитывается порядковый номер дня в году и географическое положение рассчитанных величин NDVI. Результат представляется в виде трех градаций состояния посевов: плохое, удовлетворительное, хорошее.

Оценка точности. Модель обучалась с 5-кратной стратифицированной кросс-валидацией (k-Fold), балансировкой классов и стандартизацией данных. Датасет разбивался на одинаковые части, где одна относилась к тестовому множеству, а остальные к обучающим. Итоговая точность определялась по усредненным показателям всех итераций (рисунок 2).

Полученные величины метрик качества подтвердили высокую стабильность работы построенной модели (рисунок 3).



Рис. 2. Схема тестирования разработанной модели.

	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
Fold-1	0.91	0.90	0.90	0.90
Fold-2	0.92	0.92	0.92	0.92
Fold-3	0.96	0.95	0.95	0.95
Fold-4	0.91	0.90	0.90	0.90
Fold-5	0.93	0.93	0.93	0.93
	0.93	0.92	0.92	0.92

Рис. 3. Результаты кросс-валидации.

Оценка точности классификации состояния посевов проводилась на валидационной выборке со строгим соблюдением корректной балансировки весов классов. Выборка включала 189 оценок, 175 из которых достоверно определились моделью, что составило 93% точности. Для отдельных градаций: плохое – 95 %, удовлетворительное – 85 %, хорошее – 95 %.

Заключение. Результаты проведенной научно-исследовательской работы свидетельствуют о применимости разработанной методики для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения на юге Западной Сибири. Дальнейшая работа направлена на проведение тестовых испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю., Ромасько В.Ю., Рублев И.В. Прогнозирование ожидаемой урожайности зерновых культур по данным КА «Метеор-М» №2-2 // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 393.
- [2] РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. Книга 1. М.: Гидрометиздат, 2000. 360 с.
- [3] ВЕГА-Science. <http://sci-vega.ru> (дата обращения 13.05.2025).
- [4] Чурсин В.В., Косторная А.А. Применение глубинных нейронных сетей для обнаружения вероятных зон атмосферных осадков и гроз // Метеорология и гидрология. 2024. № 4. С. 55-66.
- [5] Chen T., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco, California, 2016. P. 785-794.

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДСЧЕТА РАСТЕНИЙ КУКУРУЗЫ ПО RGB-ИЗОБРАЖЕНИЯМ С БПЛА НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Пестунов И.А.^{1,2}, Калашников Р.А.¹, Овчарова Н.В.³

¹ Федеральный исследовательский центр информационных технологий, Новосибирск

² Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Ялта

³ Алтайский государственный университет, Барнаул

Предложен и исследован гибридный алгоритм автоматического подсчета растений кукурузы по RGB-изображениям, полученным с беспилотного летательного аппарата. Метод интегрирует сверточные нейронные сети для семантической сегментации изображений, алгоритмы скелетизации и выделения графовых признаков, а также классические модели машинного обучения для классификации. Эксперименты на опытных полях Алтайского края показали высокую точность подсчета (порядка 97%), что подтверждает применимость разработанного метода для задач точного земледелия.

Ключевые слова: RGB-изображения, БПЛА, растения кукурузы, методы компьютерного зрения, сверточная нейронная сеть, методы машинного обучения, семантическая сегментация.

A HYBRID ALGORITHM FOR AUTOMATIC MAIZE PLANT COUNTING IN UAV RGB IMAGERY USING COMPUTER VISION AND MACHINE LEARNING

Pestunov I.A.^{1,2}, Kalashnikov R.A.¹, Ovcharova N.V.³

¹ Federal Research Center for Information Technologies, Novosibirsk

² Nikita Botanical Garden – National Scientific Center RAS, Yalta

³ Altai State University, Barnaul

A hybrid algorithm for automatic maize plant counting in RGB images captured by an unmanned aerial vehicle is proposed and studied. The method combines convolutional neural networks for semantic image segmentation, skeletonization and graph feature extraction algorithms, as well as classical machine learning models for classification. Experiments conducted on test fields in the Altai Krai demonstrated high counting accuracy (about 97%), confirming the applicability of the developed method for precision agriculture tasks.

Keywords: RGB images, UAV, maize plants, computer vision methods, convolutional neural network, machine learning methods, semantic segmentation.

Введение. Оценка густоты стояния растений является важным элементом мониторинга состояния посевов и основой для принятия управленческих решений в агропроизводстве [1-3]. Для кукурузы – одной из ведущих зерновых и кормовых культур в Российской Федерации – данный параметр напрямую связан с урожайностью. Однако традиционный ручной подсчет растений на пробных площадках требует значительных временных и трудовых затрат, а также не обеспечивает высокой точности при масштабировании на большие площади [4].

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных RGB-камерами, открывает новые возможности для автоматизации оценки густоты посевов [5-8]. Современные методы компьютерного зрения позволяют извлекать из изображений признаки объектов, а алгоритмы машинного обучения – классифицировать их с высокой точностью. Однако использование только нейросетевых моделей или исключительно классических методов обработки изображений имеет ограничения: в первом случае – необходимость больших обучающих выборок, во втором – низкая устойчивость к шумам и сложным фонам.

В связи с этим актуальной задачей является разработка гибридных методов, которые бы сочетали преимущества обоих подходов. Предлагаемый метод, в отличие от существующих аналогов, обеспечивает высокую точность даже в условиях сильной засоренности полей, неоднородного освещения вследствие облачности или затенения и частичной окклюзии, когда контура растений перекрывают друг друга.

Объекты исследований и исходные данные. Исследования проводились в 2022-2025 гг. на двух опытных полях площадью 100 га каждое в Алейском и Пospелихинском районах Алтайского края. На полях использовалась разная технология возделывания кукурузы: классическая плоскорезная обработка (ООО «Золотая осень») и система «No-Till» (СПК «Знамя Родины»). С помощью изображений, полученных с БПЛА, проводилась оценка многофакторного опыта посевов кукурузы с разными нормами высева и дозами удобрений. Аэрофотосъемка выполнялась с помощью цифровой фотокамеры 20 Мп, установленной на квадрокоптере DJI Phantom 4 Pro, с разрешением 5472×3648 пикселей с высоты 10 м, что обеспечило пространственное разрешение изображений 0,3 см/пиксель. В общей сложности собрано 1454 RGB-изображения, которые были размечены в полуавтоматическом режиме и нарезаны на 3754 фрагмента размерами 512×512 пикселей для обучения и тестирования моделей.

Краткое описание гибридного метода. Предлагаемый метод подразумевает выполнение следующих основных этапов обработки:

1. Семантическая сегментация RGB-изображений для выделения масок всходов кукурузы с применением сверточных нейронных сетей.
2. Постобработка результатов сегментации.
3. Скелетизация сегментированных объектов и построение графовых представлений, где каждому скелету соответствует индивидуальный или сгруппированный всход.
4. Формирование признакового описания: вычисление геометрических и топологических характеристик объектов на основе масок и их скелетных графов.
5. Классификация объектов по количеству растений с использованием методов машинного обучения на основе сформированных признаков.

Семантическая сегментация RGB-изображений производилась на два класса: «кукуруза» и «фон» с помощью сверточных нейронных сетей DeepLabV3, DeepLabV3+ и модификации U-Net с целью выделения точных границ всходов кукурузы на фоне почвы. В данной работе в качестве энкодера для нейросетей использовалась модель ResNet-101, предобученная на датасете ImageNet.

Увеличение объема обучающей выборки производилось с помощью аугментации данных, которая заключалась в выполнении следующих операций: поворот изображений на углы $\alpha \in \{90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$; перемасштабирование и случайные отображения изображений относительно горизонтальной и вертикальной осей; изменение яркости и контрастности изображений для имитации погодных условий; размытие изображений и добавление гауссовского шума.

Для оценки качества сегментации моделей сверточных нейронных сетей использовались следующие метрики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$F1-score = \frac{2 * (Precision * Recall)}{Precision + Recall}, \quad mIoU = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \frac{TP_j}{TP_j + FP_j + FN_j}.$$

В качестве функции потерь взята сумма функций потерь Дайса и взвешенной бинарной кросс-энтропии:

$$Loss = BCEWL + (1 - Dice), \quad Dice = \frac{2 * \sum_i y_i x_i}{\sum_i y_i + \sum_i x_i},$$

$$BCEWL = -w_i \left[y_i * \log \left(\frac{1}{(1 + e^{-x_i})} \right) - (1 - y_i) * \log \left(1 - \frac{1}{(1 + e^{-x_i})} \right) \right],$$

где w_i – весовой коэффициент; y_i – вектор истинных значений номеров класса для i -го пикселя; x_i – вероятность принадлежности i -го пикселя к определенному классу, полученная моделью.

В качестве оптимизатора использовался Adam с адаптивной скоростью обучения от 10^{-3} до 10^{-5} . Размер мини-пакетов составлял 8 фрагментов изображений, число эпох – 100.

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.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты, полученные на валидационной и тестовой выборке соответственно.

Табл. 1. Значения метрик моделей на валидационной выборке.

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	mIoU
U-Net	0.9888	0.7999	0.9367	0.8629	0.7589
DeepLabV3	0.9856	0.7692	0.8803	0.8210	0.6964
DeepLabV3+	0.9902	0.8337	0.9228	0.8760	0.7794

Табл. 2. Значения метрик моделей на тестовой выборке.

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	mIoU
U-Net	0.9903	0.7356	0.9001	0.8096	0.6801
DeepLabV3	0.9871	0.6846	0.8110	0.7425	0.5904
DeepLabV3+	0.9911	0.7658	0.8828	0.8201	0.6951

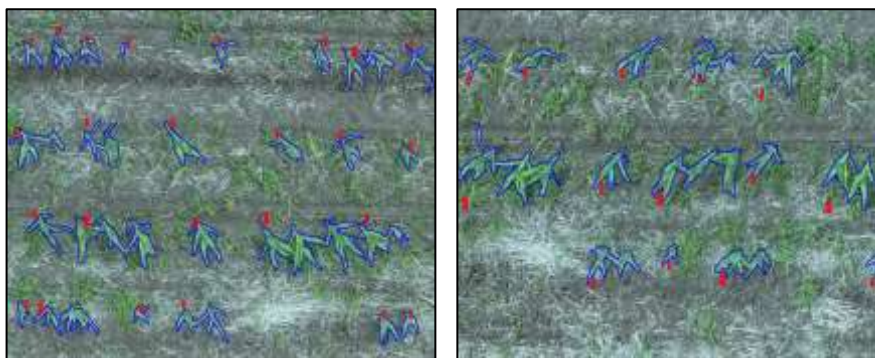
На тестовой выборке U-Net хорошо находит объекты, но часто выделяет лишние сегменты. DeepLabV3 работает сбалансированно, но хуже по ключевым метрикам. DeepLabV3+ показывает наилучшие значения Precision, F1-score и IoU, сохраняя максимальную Accuracy, – и на обучении, и на тестировании. Это делает ее предпочтительным вариантом для дальнейшего исследования.

В качестве постобработки выполнялось удаление шумовых объектов и фильтрация по длине контура растений. Для этого была собрана статистика о длине контуров кукурузы и эмпирически подобран порог длины контура, ниже которого объекты исключались с сегментационной карты.

Для получения информативных топологических признаков после этапа семантической сегментации применяется алгоритм скелетизации Ли, формирующий тонкие линии (скелеты), топологически эквивалентные исходным объектам. Каждый скелет растения кукурузы можно представить в виде графа. Для дальнейшего анализа мы используем только множество концевых ребер и ребер-перекрестков.

На следующем этапе для классификации объектов по количеству растений выполнялось формирование признакового описания: вычисление геометрических и топологических характеристик объектов на основе масок и их скелетных графов. На этом этапе нами были сформированы следующие геометрические признаки на основе результатов сегментации: ширина, высота, площадь объекта, периметр контура, отношение длины скелета к длине контура, отношение площади объекта к площади сегмента, соотношение сторон сегмента; и топологические признаки на основе графовых представлений: длины различных типов ребер, количества различных типов ребер, суммы длин различных типов ребер и различные статистики от этих признаков. Всего в общей сложности было сформировано 44 признака для каждого скелета.

Далее нами проводился отбор наиболее информативных признаков с целью сокращения размерности признакового пространства, удаления шума и выделения признаков, реально влияющих на предсказания моделей. Мы использовали метод прямого и обратного отбора признаков и опыт, который мы получили в наших предыдущих исследованиях [9]. Для построения моделей машинного обучения были использованы следующие десять наиболее информативных признаков (в порядке уменьшения значимости): длина контура сегмента, максимальная длина ребер основного ствола кукурузы, длина пути от точки ветвления до ближайшей конечной точки, сумма длин всех ребер, сумма длин всех ребер-перекрестков, сумма длин ребер основного ствола кукурузы, максимальное евклидово расстояние от концов ребра скелета, сумма длин всех концевых ребер, максимальная длина концевых ребер, максимальное евклидово расстояние от концов ребра скелета.



Примеры подсчета количества экземпляров растений кукурузы.

Для классификации объектов по количеству растений были выбраны три модели машинного обучения (SVM, случайный лес и AdaBoost). Они показали практически идентичные результаты при оценке точности подсчета количества всходов: 97.14, 97.13 и 95.67% для SVM, случайного леса и AdaBoost соответственно. Примеры подсчета количества экземпляров растений кукурузы представлены на рисунке.

Результаты демонстрируют, что сочетание глубоких нейронных сетей для сегментации и классических методов анализа изображений для выделения признаков обеспечивает более высокую точность и устойчивость метода к сложным условиям.

Заключение. Предложен гибридный метод автоматического подсчета растений кукурузы на основе RGB-изображений с БПЛА. Алгоритм сочетает сегментацию с помощью сверточных нейросетей и классификацию объектов на основе геометрических и топологических признаков. Предложенный метод сохраняет высокую устойчивость к засоренности и частичному перекрытию контуров растений, обеспечивая точность порядка 97%, что подтверждает его практическую применимость в задачах точного земледелия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gao M., Yang F., Wei H., Liu X. Automatic monitoring of maize seedling growth using unmanned aerial vehicle-based RGB imagery // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(14). P. 3671. DOI:10.3390/rs15143671.
- [2] Gnadinger F., Schmidhalter U. Digital counts of maize plants by unmanned aerial vehicles (UAVs) // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9(6). DOI:10.3390/rs9060544.
- [3] Yang T., Zhu S., Zhang W. et al. Unmanned aerial vehicle-scale weed segmentation method based on image analysis technology for enhanced accuracy of maize seedling counting // *Agriculture*. 2024. Vol. 14(2). P. 175. DOI:10.3390/agriculture14020175.
- [4] Kurchenko N. The method of remote determination of the density of standing sunflower from aerial imageries obtained from an unmanned aerial vehicle // *British Journal of Innovation in Science and Technology*. 2018. Vol. 3(5). P. 33-40.
- [5] Huang Y., Qian Y., Wei H. et al. A survey of deep learning-based object detection methods in crop counting // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 215(11). DOI:10.1016/j.compag.2023.108425.
- [6] Pathak H., Igathinathane C., Zhang Z. et al. A review of unmanned aerial vehicle-based methods for plant stand count evaluation in row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198. DOI:10.1016/j.compag.2022.107064
- [7] Zhang J., Yu F., Zhang Q. et al. Advancements of UAV and deep learning technologies for weed management in farmland // *Agronomy*. 2024. Vol. 14(3). P. 494. DOI:10.3390/agronomy14030494.
- [8] Пестунов И.А., Калашиников Р.А., Овчарова Н.В. и др. Оценка количества всходов подсолнечника и обнаружение сорняков по RGB-изображениям с БПЛА с помощью глубокого обучения // *Автометрия*. 2025. Т. 61, №4. С. 28-40. DOI:10.15372/AUT20250403.
- [9] Пестунов И.А., Овчарова Н.В., Калашиников Р.А. и др. 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») // *Сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2023)*. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 327-335. DOI:10.25743/sdm.2023.68.44.055.

СИСТЕМА УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ГЛОБАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск

В докладе приводится методика оценки изменения потоков метана в пространстве и времени по спутниковым данным и прогнозам по модели переноса и диффузии. Алгоритм основан на вычислении оптимальной оценки параметра по данным наблюдений и прогнозу в заданном временном интервале. При этом применяется оценка наименьших квадратов, алгоритм является частным случаем детерминированного варианта ансамблевого фильтра Калмана. Вычисляются средние значения в заданных подобластях для временного периода 7 дней. Предлагается методика оценки зон с максимальной эмиссией, проводится изучение поведения этих оценок по времени для различных сезонов. Предложенная методика позволяет эффективно оценить наиболее вероятные области для детального изучения возможных источников метана.

Ключевые слова: усвоение данных, оценка эмиссии, спутниковые данные.

DATA ASSIMILATION SYSTEM FOR ESTIMATION OF GREENHOUSE GASES EMISSIONS BASED ON SATELLITE DATA AND GLOBAL TRANSPORT MODEL

Platonova M.V., Kotler V.D., Klimova E.G.

Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk

The report presents a methodology for assessing changes in methane fluxes in space and time using satellite data and forecasts based on the transport and diffusion model. The algorithm is based on calculating the optimal parameter estimate based on observations and forecasts in a given time interval. In this case, the least squares estimate is used, the algorithm is a special case of the deterministic version of the ensemble Kalman filter. Average values are calculated in specified subregions for a time period of 7 days. A methodology for assessing zones with maximum emissions is proposed, and the behavior of these estimates over time for different seasons is studied. The proposed methodology allows one to effectively assess the most probable areas for a detailed study of possible methane sources.

Keywords: data assimilation, emission assessment, satellite data.

Введение. В условиях глобального изменения климата вопросы оценки эмиссии парниковых газов с поверхности Земли приобретают особую значимость [1,2]. Изменение климата не только влияет на устойчивость экосистем и биогеохимические циклы, но и оказывает сильное воздействие на социально-экономические аспекты жизни общества. Парниковые газы, включая углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4), играют ключевую роль в формировании парникового эффекта, который является одной из причин глобального потепления. В последние годы наблюдается активное развитие подходов к оценке эмиссии парниковых газов, основанных на комплексном использовании данных наблюдений и результатов численного моделирования. Однако высокая пространственная и временная вариабельность источников выбросов, а также сложность атмосферных процессов затрудняют получение точных оценок. В связи с этим особое значение приобретает использование методов обратного моделирования, позволяющих по наблюдаемым концентрациям реконструировать пространственно-временное распределение источников эмиссии. Существенное улучшение качества таких оценок достигается за счёт усвоения данных – процедуры использования наблюдений в комбинации с модельными расчетами.

Методы и цели исследования. Данное исследование основано на применении современных методов усвоения данных, включая ансамблевый фильтр Калмана, к задаче оценки эмиссии парниковых газов [3,4]. Основной фокус исследования направлен на оценку призем-

ной концентрации метана с использованием спутниковых данных и численного моделирования. На основе полученных концентраций производится расчет пространственно-временного распределения эмиссии метана с последующим сравнением результатов с данными реанализа CAMS. Основной целью данного исследования является разработка алгоритмов и методов оценки эмиссии парниковых газов на основе анализа данных из различных источников, включая спутниковые наблюдения, результаты моделирования. Предлагаемые алгоритмы ориентированы на определение объема эмиссий, отслеживание их пространственно-временной динамики и прогнозирование изменений.

Авторы выражают глубокую благодарность коллегам профессору Лагутину Анатолию Алексеевичу и доценту 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] *Климова Е.Г.* Применение алгоритма ансамблевого сглаживания Калмана в задаче обратного моделирования для моделей переноса и диффузии // Сибирский журнал вычислительной математики. 2024. Т. 27, № 3. С. 287-302. DOI:10.15372/SJNM20240303.
- [2] *Котлер В.Д., Платонова М.В., Климова Е.Г.* Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 21-30. DOI:10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30.
- [3] *Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.* Оценка приземной концентрации метана на основе алгоритма ансамблевого фильтра Калмана с привлечением транспортной химической модели // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 62-72. DOI:10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72.
- [4] *Платонова М.В., Котлер В.Д., Климова Е.Г.* Сравнительный анализ распределения эмиссии метана в заданных регионах по спутниковым наблюдениям и расчетам по модели переноса и диффузии // Вычислительные технологии. 2024. Т. 29, № 4. С. 41-54. DOI:10.25743/ICT.2024.29.4.004.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ПОСЛЕПОЖАРНЫХ ЭФФЕКТОВ В СИБИРИ

Пономарёв Е.И.

ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

Представлены результаты многолетнего дистанционного мониторинга и анализа прямых инструментальных измерений энергетических характеристик пожаров Сибири с привязкой к доминирующим вариантам растительных покровов лесной и лесотундровой зон. Пространственная вариативность мощности теплоизлучения активных зон горения (Fire Radiative Power, FRP) исследована как характеристика динамики интенсивности пожаров и пожарного воздействия, применимая в целях мониторинга послепожарных эффектов.

Ключевые слова: природные пожары, данные дистанционного мониторинга, мощность теплоизлучения, энергетические характеристики, геопространственный анализ, Сибирь.

THE REMOTE MONITORING OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF WILDFIRES AND THE POST-FIRE EFFECTS IN SIBERIA

Ponomarev E.I.

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

The results of long-term remote monitoring and analysis of direct instrumental measurements of the energy characteristics of fires in Siberia are presented in relation to the dominant variants of vegetation cover in the forest and forest-tundra zones. The spatial variability of the fire radiative power in active combustion zones (Fire Radiative Power, FRP) is investigated as a defining characteristic of the dynamics of fire intensity and fire impact. This information is relevant for the purpose of monitoring post-fire effects.

Keywords: wildfires, remote monitoring data, fire radiative power, energy characteristics, geo-spatial analysis, Siberia.

В результате климатических изменений современного периода в Сибири фиксируется повышение уровня пожарного воздействия на растительные покровы [1]. Динамика интенсивности горения является одним из важнейших параметров, определяющих масштабы пожарных нарушений и послепожарные эффекты в лесных и лесотундровых ландшафтах региона [2]. Изучение межсезонной и пространственной вариативности энергетических характеристик пожаров требует развития соответствующего направления дистанционного мониторинга, в то время как натурные эксперименты ограничены и представлены в единичных обследованиях природных пожаров.

Пространственная вариативность интенсивности горения эффективно оценивается из материалов спутникового детектирования мощности теплоизлучения (Fire Radiative Power, FRP), доступных в стандартных продуктах MOD14/MYD14. Многообразие лесорастительных условий Сибири, определяющих энергетику пожаров, учитывается на основе сведений о классах растительности в регионе из открытого каталога векторных данных «Vegetation-Pro» (ИКИ РАН) [3]. В анализе использована репрезентативная выборка пожаров в различных древостоях Сибири, для которых обобщены сведения о средних и интегральных значениях FRP и послепожарном состоянии растительности по диапазонам индекса NBR/dNBR (The differenced of Normalized Burn Ratio) [4]. Сведения о потерях лесного покрова в районе исследований верифицируются по данным открытого сервиса Global Forest Change (GFC) [5].

Диапазоны dNBR и вариативность FRP показали прямую корреляцию для репрезентативной выборки пожаров в пяти вариантах древостоев, доминирующих на территории Сибири, включая тундру и редколесья приарктических ландшафтов. Между исследуемыми спектральными показателями линейная зависимость характеризовалась достоверностью аппроксимации (R^2) на уровне 0.77-0.94 при $p < 0.05$.

Средствами геоинформационного анализа в регулярной сети размером кластера 20×30' оценена пространственная вариативность FRP на территории Сибири на интервале

2001-2024 гг. На смежных временных интервалах 2001-2010 гг. и 2011-2024 гг. оценены тренды изменения мощности теплоизлучения от пожаров в различных древостоях региона. Зафиксирована тенденции увеличения доли высокоинтенсивного горения на территории Сибири, которая характерна не менее чем для ~30% кластеров (рисунок 1).

Геоинформационный анализ позволяет констатировать рост интенсивности горения, в большей степени характерный для пожаров в условиях преобладания лиственничных (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) лесов и редколесий (на широте 57-65° с.ш.). При этом в лесотундровых и тундровых ландшафтах (севернее 65° с.ш.) арктической зоны Сибири доля кластеров сети с положительной динамикой FRP варьирует от 21% на западе до >56% в восточной части региона [6]. Выявлена значимая обратная связь ($r = -0.5$, $p < 0.05$) между FRP и уровнем тепло-влажнообеспеченности летнего периода (гидротермический коэффициент, ГТК), а также высокая корреляция с сезонной динамикой показателя влагосодержания (ПВ-1) лесных горючих материалов ($r = 0.7$, $p < 0.05$). Таким образом, прогнозируемые климатические изменения в регионе закономерно будут определять дальнейший рост интенсивности горения и объёмов сгорающей растительной биомассы. Следует ожидать увеличение доли породосменных пожаров в регионе (рисунок 2), что подтверждается анализом статистики сервиса Global Forest Change, где фатальные изменения растительных покровов Сибири, вызванные воздействием пожаров, составляли в различные годы от 20 до 90 % суммарных потерь древостоев [7].

Повышение доли высокоинтенсивных пожаров определяет также двукратное увеличение удельных эмиссий углеродосодержащих соединений, так что прогнозируемые на период до 2027 гг. объёмы выбросов от пожаров Сибири могут достигать 300 Тг С/год, что в разные сезоны составляет 5-20% нетто эмиссий парниковых газов России [8].

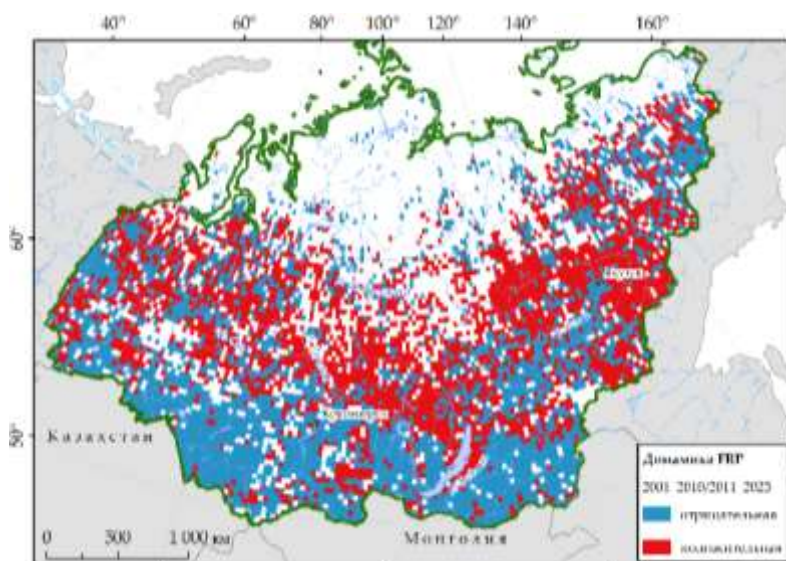


Рис. 1. Пространственная вариативность интегрального FRP от пожаров Сибири на смежных интервалах 2001-2010 гг. и 2011-2024 гг.

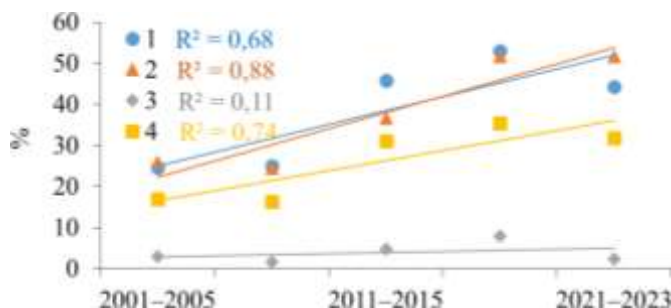


Рис. 2. Доля породосменных пожаров (%) в общей статистике нарушенности древостоев Сибири на интервале 2001-2023 гг. в темнохвойных (1), лиственничных (2), лиственных (3) и сосновых (4) насаждениях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-14-20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007/>) и Красноярского краевого фонда науки. Спутниковые данные обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН, проект госзадания № FWES-2024-0027.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пономарёв Е.И. Пространственно-временное распределение показателей горимости растительности Сибири за период спутниковых наблюдений 1996-2023 гг. в формате векторного полигонального слоя // Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2024622955 от 05.07.2024.
- [2] Лупян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталёв С.А., Стыценок Ф.В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 217-232.
- [3] Барталёв 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.
- [4] Zabrodin A.N., Ponomarev E.I. Assessment of Dependence between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power // Cosmic Research. 2024. Vol. 62, Suppl. 1. P. S165-S171.
- [5] Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.-P., Baggett A., Kommareddy I. and Kommareddy A. The global 2000-2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // Frontiers in Remote Sensing. 2022. Vol. 3, Art. 856903. DOI:10.3389/frsen.2022.856903.
- [6] Мальканова А.В., Третьяков П.Д., Пономарев Е.И. Мощность теплоизлучения от пожаров арктической зоны Сибири в зависимости от метеоусловий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 2. С. 202-213.
- [7] Пономарёв Е.И., Швецов Е.Г. Сопоставление оценок отпада древостоев Сибири после воздействия пожаров по дистанционным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 6. С. 213-223.
- [8] Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. Vol. 6(7), Art. 246. DOI:10.3390/fire6070246.

МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА В ИССЛЕДОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ КРИОЛИТОЗОНЫ

Пономарёва Т. В., Пономарёв Е.И., Сыроежко М.Ю.
Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

В пределах Норильского промрайона проводится оценка состояния ландшафтов криолитозоны, мониторинг тепловых режимов почв. Исследования показывают, что эффективной может быть оценка при сопряженном использовании спутниковых и наземных данных.

Ключевые слова: почвенный покров, мерзлота, техногенный фактор.

SATELLITE MONITORING METHODS IN STUDYING THE STATE OF CRYOLITHOZONE ECOSYSTEMS

Tatiana V. Ponomareva, Evgenii I. Ponomarev, Michail Y. Syroegko
V.N. Sukachev Institute of Forest, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS»,
Krasnoyarsk

Within the Norilsk industrial district, the state of the cryolithozone landscapes and the monitoring of soil thermal regimes are being assessed. Research shows that assessment can be effective when using satellite and ground-based data in combination.

Keywords: soil cover, permafrost, technogenic factor.

В план развития Арктической зоны России в качестве одного из приоритетных направлений развития включен вопрос о решении экологических проблем. Для моделирования и прогнозирования состояния экосистем криолитозоны и мерзлоты, как ключевого компонента этих экосистем, требуется создание системы мониторинга территорий, особенно подверженных антропогенному и техногенному воздействию, при этом для точных прогнозов необходим большой набор информации [1].

При организации мониторинга в арктической зоне следует учитывать, что на территории Сибири в настоящее время наблюдаются аномалии спектральных характеристик поверхности [2,3]. Прогноз долговременной динамики аномалий поверхности нарушенных территорий выполняется по материалам спутниковой съемки (Terra/MODIS, Landsat, Sentinel-2, Suomi NPP) [4].

Для территории Средней Сибири Норильский промышленный район представляет объект повышенного интереса, поскольку там сосредоточено несколько крупных предприятий по добыче полезных ископаемых, работающих уже несколько десятилетий. Соответственно, на данной территории экосистемы находятся под сильным воздействием техногенного фактора [5]. По физико-географическому районированию рассматриваемая территория включает тундровую, лесотундровую зону, а также редколесья. Почвенный покров преимущественно представлен криоземами, в том числе криоземами грубогумусовыми, глеевыми, торфяно-криоземами, подбурами и глееземами.

Сделана обзорная классификация ландшафтов криолитозоны для Норильского промышленного района Красноярского края по материалам банка данных Landsat-8 и -9 за вегетационный период с 2016 по 2023 гг. Для оценки состояния экосистем были выбраны участки с разными ландшафтами и степенью нарушения. Обработка материалов спутниковой съемки, тематическая классификация, расчет геостатистики и анализа данных Land Surface Temperature (LST) выполнялся с использованием стандартных процедур программы с открытым кодом Quantum GIS (<https://qgis.org/ru/site>). В результате обработки материалов Landsat-8 на территории исследования выделены 19 классов. Степень трансформации составила от 2.5 до 53% от общей территории исследуемых участков. Общая площадь фрагментов 1314 км². Результат классификации позволяет констатировать, что точность варьируется в пределах 80-90% в зависимости от детализации классов. Точность проверялась методом реперных точек и матрицы ошибок.

Результирующие классы могут быть отнесены к следующим двум категориям: естественные ландшафты криолитозоны и техногенно-преобразованные ландшафты криолитозоны. К естественным классам следует отнести: реки и озёра, мелкотравянистую тундру, пойменные лишённые растительности участки, долинные комплексы лиственничников и ельников, кустарничковую тундру, умеренно изменённые лесотундровые участки, гольцы и открытые участки. В вариантах трансформированного состояния растительности доминируют классы: инфраструктура, трансформированные участки заболоченной тундры, техногенные территории, сильно нарушенные лесотундровые ландшафты.

Выделенные классы согласуются с данными о наличии инфраструктурных объектов, состоянии растительности, почв и уровня деградации мерзлоты в профиле почв, полученные в ходе наземных исследований ландшафтов.

Воздействие техногенного фактора (кислотных осадков, механического нарушение растительности и почв при размещении инфраструктурных объектов и др.), приводит к структурным перестройкам в почвенном профиле, от сокращения мощности органогенных горизонтов, до полного разрушения верхней части профиля. Уровень трансформации ландшафтов обуславливает функционирование экосистем и изменение тепловых режимов почвы вследствие изменения теплофизических свойств верхних органогенных горизонтов [4]. По измерениям уровня залегания мерзлоты и теплового потока в профиле почв, выполненным в 2023-2024 гг., выявлено, что на нарушенных участках при мощности органогенного горизонта 5 см в течение летнего периода глубина протаивания почвы примерно в 1.5-2.0 раза выше относительно фоновых, где мощность органогенного горизонта составляет 20 см.

Глубина сезонно талого слоя почв криолитозоны качественно согласуется с выявленными классами по степени трансформации. Очевидно, классификация материалов съёмки может быть использована для характеристики тепловых режимов почв криолитозоны Сибири, что является актуальным направлением в применении дистанционного мониторинга.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-14-20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007/>), Красноярского краевого фонда науки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пономарёва Т.В., Пономарёв Е.И., Литвинцев К.Ю. и др. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 3. С. 16-35. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.003.
- [2] Карсаков А.А., Пономарев Е.И. Дистанционный мониторинг теплового состояния подстилающей поверхности в контексте техногенных трансформаций // Биосфера. 2024. Т. 16, № 1. С. 20-29.
- [3] Якимов Н.Д., Пономарёв Е.И., Пономарёва Т.В. Изменение спектральных индексов в контексте природных и техногенных трансформаций ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 4. С. 131-140. DOI:10.21046/2070-7401-2024-21-4-131-140.
- [4] Пономарев Е.И., Пономарева Т.В., Якимов Н.Д. Мониторинг техногенно-нарушенных земель на основе анализа динамики тепловых аномалий поверхности // Наука и технологии Сибири. 2024. № 2(13). С. 102-105.
- [5] Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н. и др. Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 12. С. 230-249. DOI:10.18799/24131830/2021/12/3207.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ РИСКОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Постникова У.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

В статье рассматривается методология анализа социально-природно-техногенных рисков, характерных для северных и арктических территорий Красноярского края. Актуальность работы обусловлена высокой концентрацией промышленной инфраструктуры и реализацией масштабных инвестиционных проектов в условиях экстремального климата и сложной инженерно-геологической обстановки. Описан интегрированный подход к построению модели оценки территориальных рисков, основанный на использовании статистического анализа, методов геоинформационного картографирования и байесовских сетей доверия, обеспечивающих выявление и количественную интерпретацию причинно-следственных связей между источниками угроз и возможными последствиями. Особое внимание уделено анализу реализованных и потенциальных рисков. Предложенный подход позволяет повысить уровень обоснованности управленческих решений при территориальном планировании, разработке программ устойчивого развития и формировании комплексных мер обеспечения природно-техногенной безопасности в Арктике.

Ключевые слова: безопасность, территориальные риски, вероятностно-графические модели, социально-природно-техногенная система.

AN INTEGRATED APPROACH TO FORECASTING THE TERRITORIAL RISKS FOR THE ARCTIC ZONE OF THE KRASNOYARSK TERRITORY

Postnikova U.S.

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow

The article considers the methodology for analyzing socio-natural and man-made risks typical of the northern and Arctic territories of the Krasnoyarsk Territory. The urgency of the work is due to the high concentration of industrial infrastructure and the implementation of large-scale investment projects in an extreme climate and a complex engineering and geological environment. An integrated approach to building a model for assessing territorial risks is described, based on the use of statistical analysis, geoinformation mapping methods, and Bayesian trust networks that identify and quantify cause-and-effect relationships between threat sources and possible consequences. Special attention is paid to the analysis of realized and potential risks. The proposed approach makes it possible to increase the level of reasonableness of management decisions in territorial planning, the development of sustainable development programs and the formation of comprehensive measures to ensure natural and man-made safety in the Arctic.

Keywords: safety, territorial risks, probabilistic and graphical models, socio-natural-technogenic system.

Введение. Пренебрежение принципами устойчивого развития и нарушение требований безопасной эксплуатации объектов ведут к росту числа природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. Особо остро проблема проявляется в северных и арктических регионах России, что связано с высокой уязвимостью к различным антропогенным воздействиям уникальных природных комплексов [1].

Актуальность работы обусловлена становлением Арктической зоны стратегическим направлением экономического роста страны. Поэтому вопросы безопасного освоения и устойчивого развития приобретают приоритетное значение. Согласно указам Президента РФ № 400 (2021 г.) и № 208 (2017 г.), защита арктических территорий должна включать мониторинг угроз, прогнозирование рисков и меры по снижению вероятности катастроф. Однако на сегодняшний день отсутствуют эффективные инструменты для обработки большого объема разнородных данных, необходимых для принятия научно-обоснованных управленческих решений. В этих условиях необходимо внедрение количественных методов анализа риска, что поз-

волит не только выявлять потенциальные угрозы, но и строить обоснованные сценарии реагирования. Анализ рисков становится ключевым элементом устойчивого управления арктическими территориями.

Целью работы является развитие эффективных методов и моделей для решения фундаментальных и прикладных задач в области анализа риска северных и арктических территорий в условиях многофакторных воздействий (усиленное освоение, реализация инвестиционных проектов, климатические изменения и пр.).

Работа выполнена на примере северных и арктических территорий Красноярского края. Арктическая зона Красноярского края и местности, приравненные к районам Крайнего Севера, включают 11 муниципальных образований: города Норильск, Енисейск и Лесосибирск и муниципальные районы: Таймырский Долгано-Ненецкий, Туруханский, Эвенкийский, Богучанский, Енисейский, Кежемский, Мотыгинский и Северо-Енисейский [2]. Общая площадь АЗ с учетом территорий Крайнего Севера и приравненных к нему 2065,7 тыс. км², на которой проживает около 400 тыс. человек.

Разработка комплексного подхода прогнозирования рисков социально-природно-техногенных систем арктических территорий. На рисунке представлена поэтапная схема анализа территориальной безопасности на основе риск-ориентированного подхода.



Поэтапная схема анализа территориальной безопасности.

На первом этапе определяются факторы, влияющие на уязвимость социо-эко-техносферы рассматриваемой территории, на основе статистических данных [3] и анализа нормативных документов, устанавливающих основные приоритеты развития. Второй этап связан с оценкой рисков, включая реализованные риски (те, что уже произошли и привели к материальному ущербу и/или человеческим жертвам, такие как крупные транспортные аварии, промышленные аварии, лесные пожары и пр.) и потенциальные риски (те, что могут произойти из-за наличия и функционирования потенциально опасных объектов).

Для определения причинно-следственных связей как для текущих рисков, так и для будущих (2 и 3 этап, см. рисунок) предлагается использовать Байесовский подход. Байесовские сети представляют собой графические модели событий и процессов на основе объединения математического аппарата теории вероятностей и теории графов [4].

Заключение. Развитие северных и арктических регионов требует переосмысления традиционных управленческих подходов. Устойчивость таких территорий напрямую зависит от способности противостоять множеству внешних и внутренних угроз, включая техногенные, природные и социальные факторы. Переход к устойчивому развитию должен обеспечивать не

только рост экономики и улучшение качества жизни, но и сохранение природной среды и ресурсного потенциала. Эффективное управление территориальным развитием невозможно без системного анализа рисков. Приоритет должен отдаваться выявлению наиболее опасных факторов, способных вызвать негативные последствия, а также выработке механизмов их контроля и нейтрализации. Оценка рисков становится важнейшим инструментом при формировании стратегии устойчивого и безопасного развития северных и арктических регионов.

В работе предложена математическая модель оценки рисков социально-природно-техногенных систем арктических территорий на основе Байесовского подхода, который позволяет учитывать в моделях несколько переменных одновременно, что обеспечивает им преимущества по сравнению с традиционными стратегиями построения моделей оценки рисков. Построение графических структур распространения событий позволило выявить причинно-следственные связи между событиями разных групп.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-79-00015, <https://rscf.ru/project/24-79-00015/>).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бычков И.В., Тасейко О.В., Постникова У.С., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Управление территориальными рисками развития и защищённость социально-природно-техногенных систем // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94, № 11. С. 989-1002.
- [2] Стратегия социально-экономического развития северных и арктических территорий и поддержки коренных малочисленных народов Красноярского края до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Красноярского края от 03.02.2023 № 81-р.
- [3] Федеральная служба государственной статистики URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/10705> (дата обращения 02.06.2025).
- [4] Pan L., Zheng Y., Zheng J., Xu B., Liu G., Wang M., Yang D. Characteristics of chemical accidents and risk assessment method for petrochemical enterprises based on improved FBN // Sustainability. 2022. Vol. 14, Is. 19. DOI:10.3390/su141912072.

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МИГРАНТОВ В РЕГИОН СЕВЕРА МЕТОДАМИ МОТОРНОГО КОНТРОЛЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Потапова А.С.¹, Будников К.И.¹, Савостьянов А.Н.², Карпова А.Г.³

¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

² Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины, Новосибирск

³ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

Рассматривается проблема адаптации мигрантов из регионов с умеренным или теплым климатом в условия Севера. Поскольку переезд сопровождается стрессовой реакцией, обусловленной негативным восприятием новой обстановки, необходим мониторинг изменений психофизиологического состояния мигрантов. В настоящем исследовании для этого используется оценка способности испытуемых к контролю моторных функций, осуществляемая с помощью парадигмы стоп-сигнал, ЭЭГ и методов машинного обучения. Предложен комбинированный метод анализа собранных данных.

Ключевые слова: Миграция с юга на север, контроль моторных функций, парадигма стоп-сигнал, машинное обучение.

MONITORING OF CHANGES IN THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF MIGRANTS TO THE REGION OF THE NORTH BY METHODS OF MOTOR CONTROL AND MACHINE LEARNING

Potapova A.S.¹, Budnikov K.I.¹, Savostyanov A.N.², Karpova A.G.³

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

² Scientific and Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk

³ North-Eastern Federal University, Yakutsk

The problem of adaptation of migrants from regions with moderate or warm climate to the conditions of the North is considered. Since the relocation is accompanied by the stress reaction caused by a negative perception of the new environment, it is necessary to monitor changes in the psychophysiological state of migrants. In this study, an assessment of the subjects' ability to control motor functions is used for this purpose. It is obtained using the stop-signal paradigm, EEG and machine learning methods. A combined method for analyzing the collected data is proposed.

Keywords: South-to-North migration, motor functions control, stop-signal paradigm, machine learning.

Введение. Северные территории многих стран менее населены, чем южные, но содержат значительные запасы полезных ископаемых. В связи с этим возникает необходимость в привлечении трудовых ресурсов из южных территорий на север. Переезд на новое место часто вызывает у людей стресс. Поэтому отслеживание психологического состояния мигрантов имеет критически важное значение. Психологическое благополучие напрямую связано с качеством жизни. Психические расстройства, особенно депрессия, могут приводить к суицидальным мыслям и их последствиям. Отслеживание психологического состояния позволяет выявлять людей, находящихся в группе риска, и оказывать им необходимую помощь. Исследования психологического состояния мигрантов – это обширная область, охватывающая изучение психического здоровья и адаптации людей к изменениям внешних условий [1]. Это важно для понимания потребностей мигрантов в сфере психического здоровья, а также для разработки эффективных и своевременных способов их поддержки.

Целью данного исследования является выявление закономерностей адаптации системы моторного контроля у мигрантов в северном регионе с использованием данных электроэнцефалограмм для дальнейшего применения в задаче мониторинга изменений их психофизиологического состояния. Для этого используется оценка способности испытуемых к контролю моторных функций с помощью парадигмы стоп-сигнал, ЭЭГ и методов машинного обучения. Проведено психологическое и нейрофизиологическое тестирование на группе мигрантов, пе-

реехавших на постоянное место жительства в город Якутск, Республика Саха (Якутия). Обследование каждого участника проводилось дважды – непосредственно после переезда и через шесть-восемь месяцев после переезда. В качестве метода экспериментального обследования применялась парадигма стоп-сигнал, при помощи которой тестируется способность человека активировать, либо подавлять двигательные ответы в условиях дефицита времени на принятие решения.

Для обработки полученной информации предложен комбинированный метод анализа собранных данных на основе методов машинного обучения. Первоначально произведена предварительная обработка данных, выделены электроды указывающие на места возникновения отличительной электрической активности.

На следующем этапе сделано определение отдельных кластеров испытуемых, характеризующихся различной успешностью при выполнении заданий. С этой целью применен комплекс методов кластерного анализа, включающий алгоритм k -средних, а также методы определения оптимального числа кластеров «локтя» и силуэтного анализа (оба основаны на алгоритме k -средних), алгоритм DBSCAN и MeanShift.

На третьем этапе проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Парадигма стоп-сигнал. Стоп-сигнал парадигма (ССП) – это экспериментальный метод, позволяющий оценить способности человека к контролю своего поведения в условиях изменяющейся внешней среды. В ССП-эксперименте испытуемый должен либо быстро нажать на одну из нескольких кнопок после появления целевых стимулов, либо подавлять уже начатое движение, если после целевого стимула следует запрещающий сигнал [2]. Этот нейропсихологический тест используется для оценки способности человека подавлять или отменять уже запланированное действие.

Участникам эксперимента предлагается выполнить простую и быструю двигательную реакцию (например, нажать кнопку) в ответ на определенный стимул (так называемый «go» сигнал). В случайные моменты времени, после появления «go» сигнала, появляется другой стимул – «stop» – стоп-сигнал (например, появление звукового сигнала). Задача участника – как можно быстрее подавить запланированную двигательную реакцию (то есть, не нажимать кнопку). Важным параметром эксперимента является задержка между появлением сигнала «go» и сигнала «stop». Эта задержка варьируется в зависимости от успеха участников. Если участник успешно подавляет реакцию, задержка между сигналами увеличивается, что усложняет задачу. Если участник не успевает подавить реакцию, задержка уменьшается, делая задачу проще. ССП используется в сочетании с методами нейроимиджинга (МРТ, ЭЭГ) для выявления областей мозга, участвующих в процессах подавления реакции.

В настоящем исследовании принимали участие испытуемые из различных стран глобального Юга и местные жители Якутии в возрасте от 18 до 41. Для проведения исследования была собрана выборка обезличенных фрагментов записей ЭЭГ. Данные представлены в двух временных промежутках – за 2018 и 2019 годы. В качестве контрольной группы были собраны аналогичные данные местных жителей за 2019 год. Предполагается, что местные жители - это эталон адаптированности. Со временем мигранты должны ассимилироваться и быть неотличимы от местных жителей. В качестве эксперимента участники данного исследования проходили тесты с картинками в соответствии со стоп-сигнал парадигмой.

Обработка и анализ собранных данных. Данные представляют собой снятые показатели со 128 электродов для каждого из обезличенных испытуемых (частота дискретизации – 1000 Гц), а также информацию о последовательности наименований электродов. Количество испытуемых составило: 50 мигрантов в 2018 году, 49 мигрантов в 2019 году (из числа тех, кто проходил испытание в 2018 году), 50 местных жителей. В среднем для каждого испытуемого было сделано около 80 испытаний. Таким образом, на 1 испытуемого приходится около 80 записей, каждая из которых состоит из временного ряда показателей со 128 электродов в течение 5000 мс, т.е. 51200000 показателей.

На первом этапе происходит сокращение размерности данных. На основании априорной информации о характере данных (ЭЭГ), были отобраны электроды, которые оказались наиболее активными в процессе испытаний, т.е. те, амплитуды которых изменяются больше остальных. На основании построенной гипотезы они должны вносить больший вклад в разделение данных. Всего было отобрано 22 электрода, наиболее активные из которых по данному показателю – Fpz, T7, Fp2, OI2h, AF8, I2. В качестве показаний взяты значения максимальных амплитуд при снятии ЭЭГ.

Для сокращенной базы данных, в которую входили измерения с 22 электродов, была проведена нормализация и построена попарная диаграмма рассеяния для всех признаков. Она показала наличие 2 ярко выраженных кластеров – большого и малого (рисунок 1). Это подтвердилось другими численными методами. Для этого была проведена кластеризация в 4 вариантах: методами локтя и силуэта на основе алгоритма k-средних, DBSCAN, Mean Shift. Кластеры получили обозначения B18 и M18 для измерений 2018г. и B19 и M19 для измерений 2019г. Для того, чтобы определить, какие электроды вносят наибольший вклад в разделение данных на кластеры по данным диаграммы рассеяния, была создана таблица, показывающая рейтинг (степень влияния) конкретного электрода на процесс разделения данных для кластеризации. Для каждой пары из 22 электродов была визуализирована диаграмма рассеяния. И для каждой такой парной диаграммы визуально определен коэффициент разбиения в диапазоне от 0 до 1.

Если данные разбиты хорошо, как, например, на рисунке 1, то коэффициент устанавливается ближе к 1. Если данные разбиты плохо и визуально нельзя определить наличие кластеров, то коэффициент будет ближе к 0. В итоге коэффициенты по каждому электроду суммируются и на этом основании определяется их рейтинг. Исследование диаграммы рассеяния показало, что наибольший вклад в разделение данных на кластеры по данному методу вносят следующие электроды: POO2, O2, POO9h, FTT7h, Fpz. Таким образом, наиболее важные электроды как по методу «рейтинга амплитуд», так и по методу «рейтинга диаграммы рассеяния» указывают на совпадение для электрода Fpz и близкие области в остальных случаях, что свидетельствует об объективности выбора. Дальнейший анализ проведен по электродам рейтинга диаграммы рассеяния.

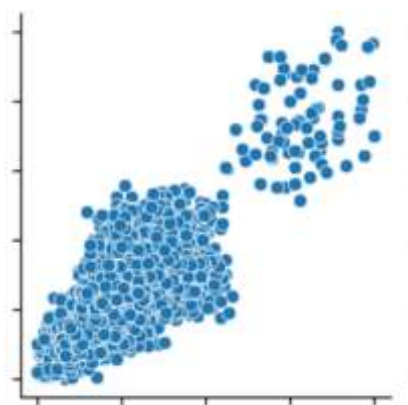


Рис. 1. Фрагмент диаграммы рассеяния

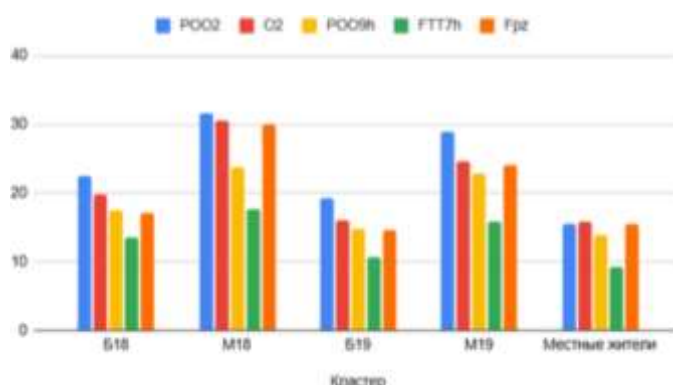


Рис. 2. Диаграмма средних значений амплитуд электродов мигрантов и местных жителей.

По результатам кластеризации построена сравнительная диаграмма средних значений амплитуд электродов, сгруппированная по кластерам. В качестве контрольной группы участвовали местные жители деревни Хандыга. Сравнение показателей мигрантов и местных жителей представлено на рисунке 2. По диаграмме можно сделать вывод, о том, что максимум регистрируемого электрического сигнала со временем снижается. Это в свою очередь свидетельствует о постепенной адаптации испытуемых ко внешним условиям. Так же представители малых кластеров находятся в более тревожном состоянии, чем больших.

Заключение. В итоге проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Определены показательные электроды, указывающих на место возникновения отличительной электрической активности.
2. Установлены 2 хорошо разделяемых кластера испытуемых с различными уровнями максимального электрического сигнала.
3. Отмечено общее снижение максимума регистрируемого электрического сигнала, свидетельствующее о постепенной адаптации испытуемых ко внешним условиям.
4. Предложенная методика может быть использована для мониторинга психофизиологического состояния мигрантов в регион.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Яскевич Р.А. и др. Влияние тревожно-депрессивных расстройств на качество жизни слабослышащих мигрантов Крайнего Севера в период реадaptации к новым климатическим условиям //Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 4. С. 279-279.
- [2] Савостьянов А.Н. и др. Комплексный анализ влияния аллельного полиморфизма 5-HTTLPR на поведенческие и нейрофизиологические показатели исполнительного контроля у людей из разных этнических групп в Сибири // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25, № 5. С. 593-602.

ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЧЕТА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БПЛА

Пушкарев А.А., Якубайлик О.Э.

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск

Разработана веб-система учета и представления данных аэрофотосъемки с БПЛА. Обеспечивающая хранение, визуализацию треков, ортофотопланов и телеметрии, а также учет полетных миссий, аккумуляторов и пользовательских комментариев.

Ключевые слова: БПЛА, аэрофотосъемка, веб-приложение, JavaScript, TypeScript.

WEB-BASED SYSTEM FOR UAV AERIAL SURVEY DATA MANAGEMENT AND VISUALIZATION

Pushkarev A.A., Yakubailik O.E.

Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk

A web system for recording and presenting UAV aerial photography data has been developed. It provides storage, visualization of tracks, orthophoto plans and telemetry, as well as recording of flight missions, batteries and user comments.

Keywords: UAV, aerial photography, web-application, JavaScript, TypeScript.

Введение. Аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) получила широкое распространение в сельском хозяйстве, экологическом мониторинге, строительстве и других прикладных областях. Применение БПЛА позволяет оперативно получать пространственно привязанные изображения высокого разрешения, а также сопутствующие данные о параметрах полёта [1-4].

С ростом объёмов съёмки и расширением состава полевой информации возникает потребность в системах, обеспечивающих централизованное хранение, управление и визуализацию данных, включающих геопривязанные аэрофотоснимки, цифровые модели местности, индексы растительности, а также навигационно-телеметрическую информацию, отражающую траекторию движения аппарата, высотные и энергетические параметры миссии. Использование разрозненных файловых хранилищ и ручных методов учёта часто приводит к фрагментации данных, снижает прозрачность процессов и затрудняет совместную работу специалистов.

Таким образом, актуальной является задача разработки специализированного веб-приложения, ориентированного на комплексную обработку и анализ результатов аэрофотосъёмки с БПЛА, с возможностью интеграции съёмочных, навигационных и эксплуатационных данных в едином интерфейсе.

Архитектура и технологии системы. Система построена по клиент-серверной архитектуре с использованием монорепоzitория (Turborepo). Компоненты взаимодействуют по REST API с общей схемой, определённой через Zod-контракты, что обеспечивает строгую типизацию и снижает вероятность ошибок интеграции.

Серверная часть реализована на TypeScript (NestJS + Prisma ORM), используется база данных PostgreSQL. Аутентификация построена на JWT-токенах. Система модульная: пользователи, проекты, полёты, камеры, аккумуляторы и др. Специализированная логика реализована в модулях полётов, файлов и продуктов съёмки: парсинг логов, извлечение телеметрии, расчёты.

Продукты съёмки (ортофотопланы, цифровые модели рельефа, вегетационные индексы и др.) хранятся в формате Cloud Optimized GeoTIFF (COG) [5], что позволяет быстро загружать нужные части изображения без скачивания всего файла. Такое решение, обеспечивает высокую производительность при низких затратах.

Клиентская часть – на TypeScript с использованием React. Для отображения карт и растров используется OpenLayers. Состояние управляется через Zustand, маршрутизация – на базе @tanstack/react-router. Компоненты интерфейса оформлены с использованием shadcn/ui.

Функциональные возможности. Каждый полёт сопровождается лог-файлом с телеметрией. При загрузке файл автоматически обрабатывается: извлекаются длительность полёта, пройденное расстояние, высота, скорость, расход аккумулятора и площадь охвата. Высота над землёй рассчитывается по цифровой модели рельефа SRTM [6]. Все параметры сохраняются в базе данных и визуализируются на карте и в виде графиков, что позволяет проводить первичный анализ миссии без дополнительной обработки.

Пользователи могут просматривать ортофотопланы, цифровые модели рельефа (ЦМР) и вегетационные индексы [7], такие как NDVI, прямо на карте. Формат COG обеспечивает интерактивное масштабирование и панорамирование даже при объёмах файлов более 100 ГБ. Отображаемые продукты съёмки можно включать и отключать по слоям, что облегчает пространственный анализ и сопоставление данных.

Отдельный модуль отвечает за учёт аккумуляторов. Система автоматически извлекает из логов данные о времени работы, уровне заряда до и после полёта, а также энергопотреблении. Информация представлена в виде таблицы: количество полётов, общее время, нагрузка, статус. Данные обновляются при каждой новой загрузке, снижая вероятность ошибок и исключая ручной ввод.

Административный интерфейс позволяет управлять БПЛА, аккумуляторами, камерами, проектами и пользователями. Все действия выполняются через защищённое API с использованием JWT-аутентификации и разграничением прав доступа.

Пользовательский интерфейс построен вокруг списка проектов. В каждом проекте доступен набор полётов с треками маршрутов, точками съёмки, графиками телеметрии и параметрами миссий. Поддерживаются фильтрация, поиск и выбор нужных полётов для анализа (см. рисунок).

Практическое применение. Система используется для обработки и анализа результатов аэрофотосъёмки с БПЛА. Операторы загружают лог-файлы и результаты съёмки, получают количественные оценки охваченной территории, параметров миссии и качества данных.

Централизация телеметрии, продуктов съёмки и учёта оборудования повысила прозрачность полевых операций и исключила ошибки, характерные для ручного учёта. Руководители и операторы получают объективные данные по каждому этапу работы, что способствует принятию обоснованных решений и оптимизации процессов.



Интерфейс приложения.

Заключение. Разработанная веб-система решает задачи хранения, визуализации и анализа данных аэрофотосъёмки с БПЛА. Она автоматизирует обработку логов, предоставляет доступ к телеметрии и продуктам съёмки, поддерживает COG-формат для работы с большими геоданными прямо в браузере.

Система расширяема и может быть адаптирована под другие области: мониторинг инфраструктуры, экология и др. Архитектура монорепоzitория и Zod-контракты позволяют быстро подключать новые модули и клиентов. Возможны интеграции с облачными хранилищами, аналитикой и внешними ГИС-платформами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Shahbazi M., Théau J., Ménard P.* Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, No. 3. P. 3291-3310.
- [2] *Nex F., Remondino F.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79-97.
- [3] *Subeesh A., Kumar S.P., Chakraborty S.K., Upendar K., Chandel N.S., Jat D., Dubey K., Modi R.U., Khan M.M.* UAV imagery coupled deep learning approach for the development of an adaptive in-house web-based application for yield estimation in citrus orchard // *Measurement*. 2024. Vol. 234. Art. No. 114786. DOI:10.1016/j.measurement.2024.114786.
- [4] *Caldas M., Sanches I., Gonçalves J.A.* VisWebDrone: a web application for UAV photogrammetry based on open-source technologies // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(11). Art. 2243.
- [5] Cloud Optimized GeoTIFF (COG) published as official OGC Standard. URL: <https://www.ogc.org/announcement/cloud-optimized-geotiff-cog-published-as-official-ogc-standard> (дата обращения 20.06.2025).
- [6] *Дубинин М.* Описание и получение данных SRTM. <http://gis-lab.info/qa/srtm.html> (дата обращения 20.06.2025).
- [7] *Qin Y., Huang D., Wang Y., Wang L.* A study of the method for retrieving the vegetation index from FY-3D MERSI-II data // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 491.

ТЕХНОЛОГИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA

Ревякин А.И., Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А.
Алтайский государственный университет, Барнаул

В работе обсуждается система мониторинга параметров атмосферы, реализованная для сопровождения наблюдений и обработки результатов астрофизической обсерватории TAIGA (Тункинская долина, Республика Бурятия). Ключевыми элементами системы являются оригинальный вычислительный комплекс для восстановления нижней границы облачных слоев и их толщины по данным гиперспектральных ИК-сенсоров AIRS, CrIS и IASI в ночное время и технология их краткосрочного прогнозирования (модели GFS, WRF), а также технология моделирования аэрозольной оптической толщи атмосферы в ночное время с использованием модели GEOS-CHEM.

Ключевые слова: облачный покров, AOT, гиперспектрометр AIRS, моделирование, GEOS-CHEM, гамма-обсерватория TAIGA.

TECHNOLOGIES OF METEOROLOGICAL SUPPORT FOR CONDUCTING EXPERIMENTS AND PROCESSING RESULTS OF THE TAIGA ASTROPHYSICAL OBSERVATORY

Revyakin A.I., Mordvin E.Yu., Lagutin A.A.
Altai State University, Barnaul

The paper discusses the system for monitoring of atmospheric parameters realized to support observations and processing results of the TAIGA astrophysical observatory (Tunka Valley, Republic of Buryatia). The key elements of the system are the original computing complex for reconstructing the base height of cloud layers and their thickness based on the data of AIRS, CrIS and IASI hyperspectral IR sensors at night and the technology of their short-term forecasting (GFS, WRF model), as well as the technology of simulation the aerosol optical depth of the atmosphere at night using the GEOS-CHEM model.

Keywords: cloud cover, AOD, AIRS hyperspectrometer, simulation, GEOS-CHEM, TAIGA gamma-ray observatory.

Введение. Разработка и внедрение технологий оперативного мониторинга и прогнозирования параметров атмосферы, которые оказывают влияние на астрономические наблюдения, относятся к актуальным задачам в условиях современных экспериментальных установок. Одним из таких экспериментов, реализуемых на территории Российской Федерации, является гамма-обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy), которая расположена в ~50 км к западу от оз. Байкала в Тункинской долине, Республика Бурятия (51°48'35" с.ш., 103°04'02" в.д.) [1,2]. Сегодня астрофизический комплекс занимает площадь ~1 км². В обсерватории проводится исследование первичного космического излучения высоких энергий, которое порождает в атмосфере Земли каскады вторичных частиц, называемых широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). Регистрация ШАЛ выполняется в синхронном режиме детекторами различного типа. Группа детекторов обсерватории нацелена на измерение черенковского излучения, которое испускается релятивистскими частицами ШАЛ. Такие сеансы наблюдений выполняются в безлунные ночи в период с сентября по апрель.

В настоящий момент в инфраструктуре комплекса отсутствуют инструменты для оперативного мониторинга характеристик атмосферы. Однако данная информация необходима как в реальном времени при планировании сеансов наблюдений, так и в виде баз данных на этапе обработки и интерпретации результатов измерений. Для черенковских наблюдений наибольший интерес представляют данные о характеристиках облачности, к которым в первую очередь относятся высота нижней (ВНГО) и верхней (ВВГО) границ, ее толщина, а также информация о концентрации аэрозолей.

Цель работы состоит в создании системы мониторинга атмосферных параметров в районе расположения гамма-обсерватории TAIGA, включающей вычислительный комплекс для восстановления геометрических характеристик облачных слоев в ночное время по данным гиперспектральных ИК-сенсоров AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) [3], CrIS (Cross-Track Infrared Sounder) [4] и IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [5], технологию их краткосрочного прогнозирования по результатам моделей GFS (Global Forecast System) [6] и WRF (Weather Research and Forecasting) [7], а также блок моделирования аэрозольной оптической толщи (AOT) в ночное время с применением GEOS-CHEM (Goddard Earth Observing System Chemistry Model) [8].

Восстановление характеристик облачного покрова. Информационной основой вычислительного комплекса для восстановления геометрических характеристик облачного покрова стали данные ИК-зондировщика AIRS, базирующегося на спутниковой платформе Aqua. Спутник Aqua выведен на околоземную солнечно-синхронную орбиту в мае 2002 г. [9]. AIRS является гиперспектральным прибором с 2738 каналами, регистрирующими уходящие из атмосферы Земли тепловое излучение в трех диапазонах: 3.74-4.61; 6.20-8.22; 8.8-15.4 мкм.

Данные спутника Aqua для зоны расположения обсерватории TAIGA ежедневно принимаются в режиме прямого вещания станциями «ЕОСкан» и «УниСкан-24» Центра космического мониторинга Алтайского государственного университета (ЦКМ АлтГУ) [10-12]. Реализованный в ЦКМ подход к обработке спутниковых данных позволяет восстанавливать основные параметры атмосферы в оперативном режиме через ~20 мин после пролета спутника над зоной обсерватории. Информация о профилях атмосферы содержится в исследовательском продукте уровня обработки L2 (AIRS Level 2 Support Retrieval) [13] зондировщика AIRS с разрешением ~40 км в надире.

Технология базируется на анализе градиентов вертикальных профилей относительной влажности $RH(z)$ и температуры воздуха $T(z)$, а также на фильтрации $RH(z)$ на высоте z согласно эмпирически найденным пороговым значениям. Метод является развитием и адаптацией к результатам обработки уровня L2 AIRS алгоритма, предложенного для наземной радиометрической съемки [14].

Инструментальные наблюдения показывают, что $RH(z)$ возрастает при пересечении нижней границы облачного слоя. Тогда первая производная $RH(z)$ больше нуля ($RH'(z) > 0$) [15]. Также известно, что основанию облака соответствует локальный максимум $RH'(z) > 0$, переход через который выражается условием $RH''(z) < 0$ [15].

С другой стороны, в тропосфере с ростом высоты слоя температура воздуха $T(z)$, как правило, убывает, за исключением случаев инверсии в пограничном слое. Однако вблизи основания облачного слоя происходит конденсация водяного пара и сопутствующее ей выделение тепла, что должно приводить к увеличению $T(z)$ (т. е. $T'(z) > 0$). В то же время более значимым эффектом является снижение скорости убывания $T(z)$, которое можно выразить как $T''(z) > 0$. Таким образом, условия для определения нижней границы облачного слоя выражаются как:

$$\begin{cases} RH'(z) > 0 \wedge RH''(z) < 0, \\ T'(z) > 0 \wedge T''(z) > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Аналогично верхняя граница облачного слоя определяется следующим образом:

$$\begin{cases} RH'(z) < 0 \wedge RH''(z) < 0, \\ T'(z) < 0 \wedge T''(z) > 0. \end{cases} \quad (2)$$

На этапе нахождения производных в (1) и (2) оригинальные профили AIRS интерполировались до слоев толщиной ~30–40 м с использованием натурального сглаживающего сплайна, что позволило улучшить точность расчетов.

На рисунке показаны результаты вычислительного комплекса AIRS/Aqua с восстановленными границами облачных слоев.

С использованием вычислительного комплекса были найдены границы и толщины облачных слоев в ночное время в районе обсерватории TAIGA для сезонов наблюдений

2002-2024 гг. Верификация предложенного метода выполнялась с использованием совместных измерений радара CPR (Cloud Profiling Radar)/CloudSat и лидара CALIOP/CALIPSO (Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) [16] за период 2006-2011 гг. Сопоставление ВВГО и ВНГО проводилось для ближайшего к уровню поверхности слоя облачности. Установлено, что ВНГО и ВВГО по данным AIRS и комплекса CPR/CALIOP соотносятся с коэффициентом корреляции $R = 0.75$ и $R = 0.67$ соответственно. Стандартное отклонение для ВНГО $\sigma = 1.7$ км, для ВВГО $\sigma = 2.0$ км. Среднее отклонение равно 0.7 км для ВНГО и 1.1 км для ВВГО.

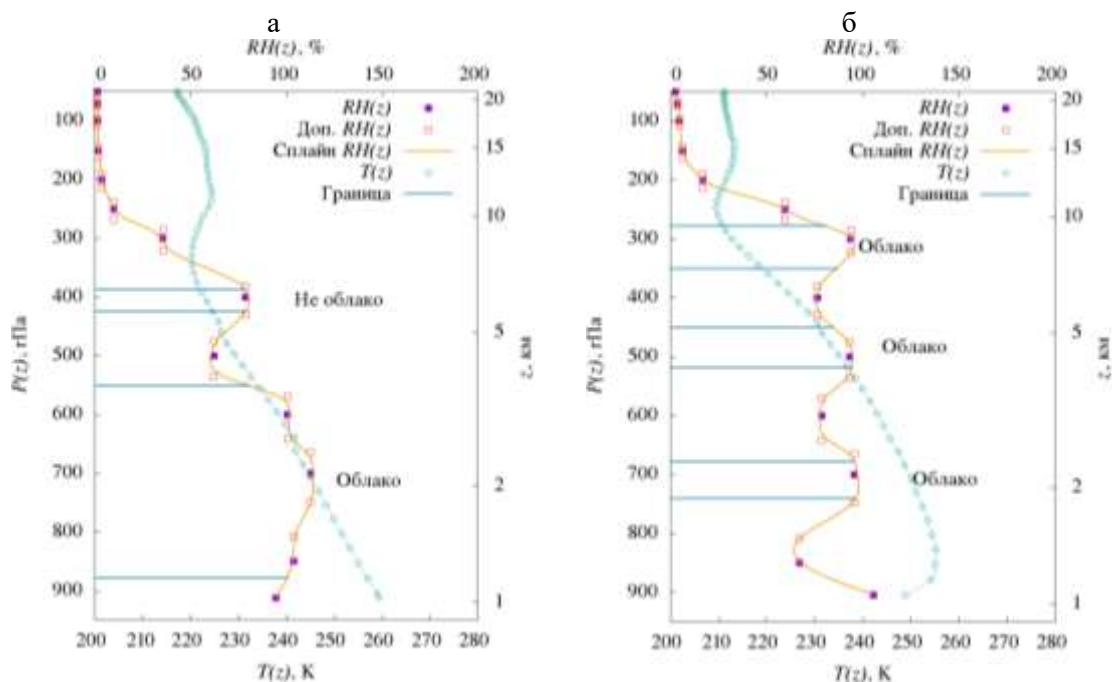


Рис. 1. Профили температуры и влажности, а также границы облачных слоев по данным гиперспектрометра AIRS/Aqua в районе расположения обсерватории TAIGA: а – 22 января 2011 г.; б – 7 ноября 2023 г.

Полученные результаты указывают на возможность использования данных AIRS/Aqua, а также аналогичных ему по характеристикам гиперспектрометров CrIS/JPSS и IASI/MetOp для получения в оперативном режиме информации о характеристиках облачности. Важно отметить, что указанная спутниковая группировка выполняет съемку зоны расположения обсерватории TAIGA на протяжении большей части ночных наблюдений.

Краткосрочное прогнозирование характеристик облачного покрова. Система оперативного спутникового мониторинга дополняется результатами краткосрочного прогнозирования характеристик облачности по данным общедоступной глобальной прогностической модели GFS и региональной версии WRF. Модели предоставляют информацию о наличии облачного покрова, а также его геометрических параметрах (ВНГО, ВВГО, толщина) над зоной обсерватории TAIGA. Прогнозы облачных условий составляются с заблаговременностью 3-4 часов до запуска черенковских наблюдений, которые начинаются не ранее 19 часов местного времени. На основе полученных прогностических данных об облачном покрове, дежурный, управляющий установками, принимает решение о целесообразности старта или о продолжении текущего сеанса наблюдений.

Используется модель GFS в версии T1534 с разрешением ~ 12.5 км (на экваторе) и шагом по времени равным 1 часу. Согласно принятому времени начала наблюдений из доступных стартов прогнозирования выбран тот, что соответствует 00:00 часам UTC (08:00 часам местного времени).

Уточненное прогнозирование параметров облачности с учетом региональной микрофизики и лучшим пространственным разрешением выполняется с использованием модели WRF.

Прогноз рассчитывается в двух вариантах домена – предварительный на сетке 27×27 км и итоговый с разрешением 9×9 км. Граничные условия моделирования задаются общедоступными данными IFS (Integrated Forecast System), предоставляемыми Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMFW). Вывод параметров выполняется с шагом 1 час.

Технология моделирования аэрозольной оптической толщи атмосферы. Технология расчета АОТ в ночное время в районе расположения обсерватории TAIGA базируется на результатах глобальной химической транспортной модели GEOS-CHEM версии 14.4.3. Моделирование поведения атмосферного аэрозоля проводилось в два этапа. На первом этапе вычисления выполнены для всего земного шара на сетке $4 \times 5^\circ$ с 47-ю атмосферными слоями. Второй шаг заключался в работе во вложенном регионе с разрешением $0.5 \times 0.625^\circ$ для 47 атмосферных слоев. При этом результаты первого эксперимента послужили граничными условиями для области – $40\text{--}65^\circ$ с.ш., $75\text{--}120^\circ$ в.д. с буферной зоной, равной 3 пикселям.

Эксперимент был проведен для периода 2018–2022 гг. Первый год моделирования считался шагом прогрева модели, вследствие чего исключался из статистической обработки. Набор химических взаимодействий задавался схемой GEOS-CHEM full-chemistry. Для описания поведения аэрозоля использовался подход complex SOA (Secondary Organic Aerosol). В качестве выходного параметра рассматривалась аэрозольная толщина на длине волны 550 нм, соответствующая диапазону регистрируемого черенковского излучения.

В таблице представлены статистические метрики, найденные по результатам ежедневных расчетов АОТ (550 нм) с использованием модели GEOS-CHEM для ночного времени в период сентябрь–апрель 2019–2022 гг.

Статистические метрики АОТ (550 нм) для ночного времени в период сентябрь–апрель 2019–2022 гг. в районе обсерватории TAIGA по данным модели GEOS-CHEM.

Период	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее
Январь–декабрь	0.012	3.474	0.069	0.114
Сентябрь–апрель	0.012	0.582	0.058	0.078

Данные GEOS-CHEM для дневного периода верифицировались с измерениями солнечного фотометра станции AERONET (Aerosol Robotic Network) [17], расположенной на одной площадке с обсерваторией TAIGA. Для оценки качества моделирования найден коэффициент корреляции R для значений АОТ (550 нм) по результатам моделирования и наблюдениям AERONET, который составил 0.92.

Заключение. Представлены этапы создания системы мониторинга и прогнозирования параметров атмосферы в ночное время для сопровождения наблюдений и обработки результатов астрофизической обсерватории TAIGA.

Получены следующие результаты:

1. Разработан вычислительный комплекс для восстановления в оперативном режиме геометрических характеристик облачного покрова по данным гиперспектрометров спутникового базирования AIRS/Aqua, CrIS/JPSS и IASI/MetOp в ночное время в районе расположения астрофизического комплекса TAIGA. Полученные по данным AIRS оценки для ближайшего к поверхности облачного слоя согласуются с результатами спутниковой системы CPR/CALIPSO с коэффициентом корреляции $R = 0.75$ для ВНГО и $R = 0.67$ для ВВГО.
2. Предложена система краткосрочного прогнозирования характеристик облачного покрова для периодов сеансов наблюдения в обсерватории TAIGA. Система объединяет результаты глобальной модели GFS и данные регионального блока WRF.
3. Создана технология для расчета в оперативном режиме АОТ в ночное время в районе расположения обсерватории TAIGA, базирующаяся на численном моделировании с использованием кода GEOS-CHEM. Сопоставление результатов GEOS-CHEM для дневного времени с данными ближайшей к району обсерватории станции AERONET показало согласие с коэффициентом корреляции $R = 0.92$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-00057, <https://rscf.ru/project/23-72-00057/>).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Астанов И.И., Безъязыков П.А., Бланк М. и др. Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы // ЖЭТФ. 2022. Т. 161, № 4. С. 548-559. DOI:10.31857/S0044451022040095.
- [2] Буднев Н.М., Кузьмичев Л.А., Астанов И.И. и др. TAIGA – гибридный комплекс для многоканальной астрономии высоких энергий // Журнал технической физики. 2023. Т. 93, № 12. С. 1794-1798. DOI:10.61011/JTF.2023.12.56824.f234-23.
- [3] Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41, No. 2. P. 253-264. DOI:10.1109/TGRS.2002.808356.
- [4] Han Y., Revercomb H., Cromp M. et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118, No. 22. P. 12734-12748. DOI:10.1002/2013JD020344.
- [5] Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L. et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. Vol. 9, No. 16. P. 6041-6054. DOI:10.5194/acp-9-6041-2009.
- [6] Global Forecast System (GFS). URL: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php (дата обращения 15.06.2025).
- [7] Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A description of the advanced research WRF version 4.3 NCAR technical notes. Boulder, Colorado: NCAR, 2021. 165 p.
- [8] Bey I., Jacob D.J., Yantosca R.M. et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: model description and evaluation // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106, No. D19. P. 23073-23095. DOI:10.1029/2001JD000807.
- [9] Parkinson C.L. Aqua: an Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41, No. 2. P. 173-183. DOI:10.1109/TGRS.2002.808319.
- [10] Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 2. С. 67-89.
- [11] Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Лагутин Ал.А. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 2. AIRS // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 5. С. 78-102.
- [12] Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Волков Н.В. и др. Восстановление всепогодного режима работы гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU спутника Aqua с использованием данных СВЧ-радиометра ATMS спутников Suomi-NPP и NOAA-20 // Автометрия. 2022. Т. 58, № 2. С. 85-92. DOI:10.15372/AUT20220210.
- [13] Susskind J., Blaisdell J., Iredell L. et al. Algorithm theoretical basis document. AIRS-team retrieval for core products and geophysical parameters: versions 6 and 7 level 2. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2020. 77 p.
- [14] Xu H., Guo J., Tong B. et al. Characterizing the near-global cloud vertical structures over land using high-resolution radiosonde measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23, No. 23. P. 15011-15038. DOI:10.5194/acp-23-15011-2023.
- [15] Wang J., Rossow W.B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1995. Vol. 34, No. 10. P. 2243-2258. DOI:10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2.
- [16] Sassen K., Wang Z., Liu D. global distribution of cirrus clouds from cloudsat/cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // Joournal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. Art. No. D00A12. DOI:10.1029/2008JD009972.
- [17] Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I. et al. AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 66, No 1. P. 1-16. DOI:10.1016/S0034-4257(98)00031-5.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Резник А.В.¹, Колесников А.А.^{1,2}, Белослудцева А.А.^{3,4}

¹ Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

³ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

⁴ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

В рамках исследования предлагается техническое решение в виде геоинформационного сервиса, позволяющего интегрировать пространственные данные из открытых источников и обрабатывать их с использованием специализированных моделей машинного обучения. Разработанное программное решение позволит в автоматизированном режиме осуществлять мониторинг контуров территорий, техногенно изменённых массивов, нарушенных работами различного назначения, охранных и санитарно-защитных зон, с последующей оценкой природно-экологических рисков и контролем в части исполнения обязательств недропользователя.

Ключевые слова: техногенно нарушенные территории, мониторинг, автоматизация, машинное обучение, дистанционное зондирование.

TECHNICAL SOLUTIONS FOR AUTOMATION OF MONITORING OF TECHNOGENICALLY DISTURBED LANDS

Reznik A.V.¹, Kolesnikov A.A.^{1,2}, Belosludtseva A.A.^{3,4}

¹ Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

³ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk

⁴ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk

The study proposes a technical solution in the form of a geoinformation service that allows integrating spatial data from open sources and processing them using specialized machine learning models. The developed software solution will allow automated monitoring of territorial contours, man-made massifs disturbed by various types of work, security and sanitary protection zones, with subsequent assessment of natural and environmental risks.

Keywords: man-made disturbed territories, monitoring, automation, machine learning, remote sensing.

Введение. Одним из основных этапов контроля состояния окружающей среды является мониторинг изменения техногенно нарушенных земель, который в настоящий момент осуществляется с помощью сочетания методов дистанционного мониторинга и наземных наблюдений. Ключевыми источниками информации при этом выступают спутниковые снимки, цифровые модели рельефа и данные атмосферных датчиков, доступные для всей территории Российской Федерации. Благодаря регулярному обновлению данной информации возникает возможность проведения комплексных исследований с последующим переходом к анализу изменений и построению прогнозных моделей. В рамках данного исследования авторами предложена программная система, которая позволит автоматизировать процессы поиска техногенно нарушенных земель и выполнять мониторинг их состояния, а также осуществлять автоматическое измерение поверхностных площадей карьеров и отвалов.

Структура программной системы. Исходными данными являются следующие данные из открытых источников: Sentinel-2 (ESA), Landsat 8/9 (NASA/USGS), MODIS и VIIRS в качестве наборов климатических и экологических показателей в виде непрерывных покрытий. Также в качестве вспомогательных данных для автоматизации разметки обучающего набора были использованы данные OpenStreetMap, Global Surface Water (JRC) и др. Для перечисленных данных типовыми форматами получения и дальнейшего использования в системе будут: GeoTIFF, COG (Cloud Optimized GeoTIFF) – для хранения растровых данных, GeoJSON, GeoPackage – векторные маски объектов добычи.

Для регулярного получения новых данных, обновлении параметров объектов, дообучения моделей и оркестрации (в данном исследовании под этим термином понимается процесс автоматизации объединения элементов системы и управления ими, позволяя использовать необходимые компоненты в зависимости от имеющихся ресурсов) формируемых для этого конвейеров обработки используется менеджер управления процессами Prefect.

Данные в исходном виде и их предобработанные варианты хранятся в объектном хранилище S3. Предобработка заключается в формировании тайлов, анализе облачности (с использованием FMask или Sen2Cor), цветовой коррекции каналов, сохранении пространственной привязки. Последний пункт особенно важен поскольку распространенные системы разметки растровых данных (например, Roboflow, CVAT) не учитывают пространственные метаданные загружаемых изображений. Тем самым, на этапе загрузки результатов сегментации требуется их соотнесение с исходным тайлом и присвоение значений координат, что выполняется через GDAL/OGR. Структуризация исходных данных осуществляется посредством стандартизированного каталога метаданных STAC позволяя упростить взаимодействие с геоинформационными системами.

Для автоматического поиска участков местности, относящихся к техногенно измененным территориям и их оконтуривания по результатам сегментации используются методы компьютерного зрения на основе нейронных сетей. Эта часть системы базируется на модулях PyTorch для сегментации изображений (применяются предобученные модели на основе архитектуры YOLO), OpenCV, Rasterio и Scikit-image для их предобработки в виде операций аугментации (нормализация, случайное масштабирование, повороты, цветовые искажения). Автоматизация обучения модели базируется на совмещении подходов Self-Supervised Pretraining и Supervised Fine-tuning. Первый подход использует Masked Autoencoders в качестве базовой архитектуры, позволяя осуществлять предобучение на неразмеченных снимках путем маскирования части изображений с их последующим восстановлением. В данном варианте используются функции потерь reconstruction loss, contrastive loss. Второй подход базируется на алгоритме Tree-Structured Parzen Estimator, позволяя оптимизировать настройку гиперпараметров модели на размеченных данных. Метриками оценки являются IoU, Precision/Recall для сегментации и RMSE для оценки площади.

Результатами работы системы является набор параметров по каждому объекту мониторинга: контур объекта в виде полигона, индекс площади листы (LAI), нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI). Конкретные значения могут быть как визуализированы в ГИС, через подключение к STAC, либо напрямую к СУБД PostgreSQL, либо через API по указанию координат или идентификатора объекта. Также через API (в реализации FastAPI), кроме самих результатов обработки данных дистанционного зондирования доступен вызов самой модели сегментации техногенно нарушенных территорий (в формате ONNX) для обработки произвольного изображения.

Заключение. Разработанная система мониторинга позволяет автоматизировать сбор данных из открытых источников, их анализ с точки зрения корректности получаемых значений и акцентирования на критических изменениях, дообучение моделей сегментации объектов определенных классов на перечисленных источниках спутниковых снимков, построение прогнозов для временных рядов экологических показателей, основываясь на ретроспективных значениях.

Реализация системы в виде модуля для QGIS и API на базе FastAPI делает её удобной для практического применения, позволяя пользователям получать актуальные данные о состоянии техногенно нарушенных территорий в режиме реального времени. Важным аспектом работы является возможность дообучения модели на новых данных, что обеспечивает её адаптивность и долгосрочную эффективность. Результаты мониторинга, включая контуры объектов и количественные параметры элементов окружающей среды, могут быть использованы для принятия экологически обоснованных решений в горнодобывающей отрасли, а также осуществлять контроль в части исполнения обязательств недропользователя.

Проект реализован в соответствии с договором на предоставление из областного бюджета Новосибирской области гранта Правительства Новосибирской области молодым ученым № 10-2025-035482 от 09.06.2025.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Акинина Н.В., Никифоров М.Б.* Алгоритм детектирования несанкционированных свалок мусора на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 321-329.
- [2] *Padró J.C., Carabassa V., Balagué J., Brotons L., Alcañiz J.M., Pons X.* Monitoring opencast mine restorations using unmanned aerial system (UAS) imagery // Science of The Total Environment. 2019 Vol. 657. P. 1602-1614. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.12.156.
- [3] *Meng X., Zhang D., Dong S., Yao C.* Open-pit granite mining area extraction using uav aerial images and the novel GIPNet // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 789-797.
- [4] *Fajar Y., Parwati S., Gatot N., Suwarsono S.* Artificial intelligence remote sensing for open-pit mining detection in the tropical environment of Indonesia // Journal of Positive School Psychology. 2022. Vol. 6. P. 8922-8929.
- [5] *Хаванская Н.М., Новочадова А.В.* Анализ восстановления растительного покрова в пределах Шуруповских карьеров на основе данных дистанционного зондирования // Природные системы и ресурсы. 2023. Т. 13, № 2. С. 58-66. DOI:10.15688/nsr.jvolsu.2023.2.6.
- [6] *Murdaca G., Ricciuti F., Rucci A., Le Saux B., Fumagalli A., Prati C.* A semi-supervised deep learning framework for change detection in open-pit mines using SAR imagery // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. P. 5664-5672. DOI:10.3390/rs15245664.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРОГРАММНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ В НАБЛЮДАЕМЫХ ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Резник А.Л., Потатуркин О.И., Соловьев А.А.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Основная цель представленных в докладе исследований заключается в разработке классификационных признаков (инвариантных характеристик), необходимых для выявления в анализируемых потоках цифровых изображений аномальных сгущений или, наоборот, фрагментов с аномально большим разбросом элементов. Особенностью проведенных теоретических расчетов является то, что часть из них выполнена с применением специально разработанных программ компьютерной алгебры.

Ключевые слова: случайные точечные изображения, выявление аномалий.

DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED SOFTWARE ALGORITHMS FOR DETECTING LOCAL ANOMALIES IN OBSERVED POINT IMAGES

Reznik A.L., Potaturkin O.I., Soloviev A.A.

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk

The main purpose of the research presented in the report is to develop classification features (invariant characteristics) necessary to identify in the analyzed streams of digital images anomalous thickenings or, on the contrary, fragments with anomalously large spread of elements. The feature of the theoretical calculations is that some of them were performed using specially developed computer algebra programs.

Keywords: random point images, anomaly detection.

Введение. В аэрокосмических задачах обнаружения и отслеживания траекторий мало-размерных и слабоконтрастных объектов на поверхности Земли [1], при диагностической обработке биомедицинских и томографических изображений [2,3], в задачах астрофизики [4] (например, при изучении барстеров – вспыхивающих галактических рентгеновских источников) и во многих других научно-технических приложениях часто требуется оценить динамику регистрируемых видеопоследовательностей, пренебрегая величиной наблюдаемых малогабаритных объектов, формирующих каждое отдельное изображение. В нашем рассмотрении, как и во всех перечисленных выше задачах, все элементы на изображении будут считаться точечными, и будет учитываться лишь их взаимное расположение. Представленные ниже расчеты относятся к задачам, в которых цель исследователя заключается в выявлении на анализируемых изображениях аномалий в виде локальных сгущений либо, наоборот, областей с резким увеличением расстояний между ближайшими элементами. Для того, чтобы корректно оценить степень случайности наблюдаемых сгущений либо взаимных разбросов элементов, необходимо сравнить характеристики обрабатываемого потока с заранее рассчитанными теоретическими стандартами, соответствующими ансамблю случайных точечных изображений. Чрезмерное отличие характеристик наблюдаемых изображений от заранее рассчитанных стандартов, соответствующих случайным точечным изображениям, может говорить о наличии в наблюдаемом потоке аномалий, требующих дополнительного изучения. В настоящем докладе в качестве таких стандартных характеристик (инвариантов) будут представлены зависимости, описывающие вероятность наличия на случайном точечном изображении сгущений либо межэлементных дистанций заданного диапазона. Полученные формулы рассчитаны с использованием специализированных программ компьютерной алгебры. Вычисление представленных инвариантов велось применительно к одномерному случаю, а методику их применения в двумерном случае можно найти, например, в [5].

Применение программ компьютерной алгебры и средств параллельного программирования для нахождения частных решений задачи. В [5] представлен общий вид интегрального выражения, описывающего вероятность $P_{n,k}(\varepsilon)$ того, что при случайном бросании

n точек на интервал $(0,1)$ внутри него не будет существовать ни одного подынтервала длиной ε , содержащего более k точек:

$$P_{n,k}(\varepsilon) = n! \int \dots \int 1[x_1]1[x_2] \dots 1[x_n - x_{n-1}]1[1 - x_n]1[x_{k+1} - x_1 - \varepsilon] \times \\ \times 1[x_{k+2} - x_2 - \varepsilon] \times \dots \times 1[x_n - x_{n-k} - \varepsilon] dx_1 \dots dx_n, \quad (1)$$

где $1[z] = \begin{cases} 0, & z \leq 0, \\ 1, & z > 0. \end{cases}$ – функция Хевисайда.

Нами предлагается в качестве инвариантных характеристик случайного точечного изображения использовать вероятностные формулы $P_{n,k}(\varepsilon)$. К сожалению, для случая $k > 1$ получить общий вид аналитической зависимости $P_{n,k}(\varepsilon)$ не удастся. Поэтому ниже приводятся результаты, полученные нами с помощью специально разработанного пакета программ компьютерной алгебры, который применялся для нахождения точных аналитических формул $P_{n,k}(\varepsilon)$ для произвольных, но фиксированных значений n при $k > 1$. Программная реализация вычислительного процесса была выбрана потому, что осуществить вручную все необходимые преобразования, связанные с расстановкой пределов интегрирования, проверкой всех промежуточных систем неравенств на совместность и проведением многомерного интегрирования в n -мерном пространстве, невозможно уже при $n = 4$. Эффективное распараллеливание вычислительного процесса и его проведение на высокоскоростном вычислительном кластере Новосибирского государственного университета позволило проводить расчет формул $P_{n,k}(\varepsilon)$ для любых значений $k, n \leq 15$. В таблице в качестве примера приведены результаты программного расчета формулы $P_{n,k}(\varepsilon)$ на одном из диапазонов изменения параметра ε для $n = 9$ и $k = 5$.

Пример программного расчета вероятности $P_{n,k}(\varepsilon)$ при $n = 9$ и $k = 5$.

N	k	Диапазон изменения ε	$P_{n,k}(\varepsilon)$
9	5	$1 < \varepsilon < 0.5$	$-42 + 504\varepsilon - 2520\varepsilon^2 + 7056\varepsilon^3 - 12348\varepsilon^4 + 14112\varepsilon^5 - 10584\varepsilon^6 + 5040\varepsilon^7 - 1386\varepsilon^8 + 168\varepsilon^9$

Использование компьютерных расчетов для нахождения замкнутых аналитических формул. Частные формулы $P_{n,k}(\varepsilon)$, рассчитанные в соответствии алгоритмами из предыдущего раздела, в дальнейшем использовались для отыскания общих ранее неизвестных аналитических зависимостей. В частности, для диапазона $\frac{1}{m+1} < \varepsilon < \frac{1}{m}$ нами получена и доказана общая для всех значений n формула

$$P_{n,2}(\varepsilon) = \begin{cases} (C_{2m}^m - C_{2m}^{m-1})(1 - (m-1)\varepsilon)^{2m} - \{(1 - m\varepsilon)^{m+2}(1 - (m-2)\varepsilon)^{m-4} \times \\ \times [C_{2m}^{m-2}(1 - (m-2)\varepsilon)^2 - 2C_{2m}^{m-3}(1 - m\varepsilon)(1 - (m-2)\varepsilon) + \\ + C_{2m}^{m-4}(1 - m\varepsilon)^2]\}, & n = 2m; \\ (1 - m\varepsilon)^{m+1}(1 - (m-1)\varepsilon)^{m-2} \times [C_{2m+1}^{m+1}(1 - (m-1)\varepsilon)^2 - \\ - 2C_{2m+1}^{m+2}(1 - m\varepsilon)(1 - (m-1)\varepsilon) + C_{2m+1}^{m+3}(1 - m\varepsilon)^2], & n = 2m + 1, \end{cases} \quad (2)$$

соответствующая вероятности того, что при бросании n случайных точек на интервал $(0,1)$ сумма никаких двух смежных интервалов между соседними отсчетами не будет превышать ε . Найденная формула (2) для вероятности $P_{n,k}(\varepsilon)$ может быть использована в качестве одной из инвариантных характеристик случайного точечного изображения.

Для оценивания анализируемых изображений на наличие в них аномальных сгущений могут использоваться программно рассчитанные формулы $P_{n,n-1}(\varepsilon)$, $P_{n,n-2}(\varepsilon)$, $P_{n,n-3}(\varepsilon)$. Первая из них описывает вероятность того, что весь набор из n случайно выброшенных на интервал $(0,1)$ точек не соберется в одну компактную ε -группу:

$$P_{n,n-1}(\varepsilon) = 1 - \varepsilon^n - n\varepsilon^{n-1}(1 - \varepsilon), \quad (3)$$

а формулы

$$P_{n,n-2}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 - C_n^2 \varepsilon^{n-2} (1 - \varepsilon)^2 - 2\varepsilon^n, & 0 \leq \varepsilon \leq 1/2; \\ 1 - C_n^2 \varepsilon^{n-2} (1 - \varepsilon)^2 - 2\varepsilon^n + (2\varepsilon - 1)^n, & (1/2) \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

и

$$P_{n,n-3}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 - 2\varepsilon^n + C_n^1(6\varepsilon^n - 4\varepsilon^{n-1}) + C_n^2(-3\varepsilon^n + \varepsilon^{n-2}) + \\ + C_n^3(9\varepsilon^n - 18\varepsilon^{n-1} + 12\varepsilon^{n-2} - 3\varepsilon^{n-3}), & 0 \leq \varepsilon \leq 1/2; \\ 1 - 2\varepsilon^n + (2\varepsilon - 1)^n - 2C_n^1(1 - \varepsilon)(\varepsilon^{n-1} - (2\varepsilon - 1)^{n-1}) + \\ + C_n^2(1 - \varepsilon)^2(\varepsilon^{n-2} + (2\varepsilon - 1)^{n-2}) - 3C_n^3\varepsilon^{n-3}(1 - \varepsilon)^3, & (1/2) \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

задают вероятности того, что при выбрасывании на интервал $(0,1)$ n случайных точек в самой большой ε -группе будет насчитываться не более $(n - 2)$ и $(n - 3)$ отсчетов соответственно. Формулы (2)-(5) рассчитаны в соответствии с алгоритмической схемой, представленной в [5,6], и могут быть приняты в качестве инвариантов случайного точечного изображения.

Заключение. Приведенные в докладе классификационные признаки и вероятностные зависимости являются устойчивыми инвариантами, характеризующими случайное точечное изображение. В реальных научно-прикладных задачах существенное отклонение параметров, рассчитываемых по набору анализируемых изображений, от универсальных теоретических инвариантов может свидетельствовать о влиянии на опытные данные систематической либо не учтенной заранее компоненты. Приведенный нами список рассчитанных универсальных инвариантов случайных изображений может быть существенно расширен за счет использования основанного на порядковых статистиках детального теоретического анализа, выполненного в монографии [7], однако применение таких инвариантов в практических научно-прикладных задачах затруднено сложностью и трудоемкостью их расчета. В связи с этим важно отметить простоту применения представленных в настоящей работе инвариантных признаков случайных изображений для решения реальных прикладных задач.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041700103-1).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gromilin G., Kosykh V., Popov S., Streltsov V. Suppression of the background with drastic brightness jumps in a sequence of images of dynamic small-size objects // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. Vol. 55. P. 213-221. DOI:10.3103/S8756699019030014.
- [2] Ablameiko S., Anischenko V., Lapitsky V., Tuzikov A. Medical information technologies and systems. Belarus, Minsk: OIPI NAS, 2007.
- [3] Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information technology in medical diagnostics. London: CRC Press, 2019.
- [4] Berry R., Burnell J. The handbook of astronomical image processing. Richmond: Willmann-Bell, 2005.
- [5] Reznik A., Soloviev A. Software and combinatorial-probabilistic tools for the analysis of random point structures // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2022. Vol. 32. P. 636-638. DOI:10.1134/S1054661822030348.
- [6] Reznik A., Soloviev A., Torgov A. On the statistics of anomalous clumps in random point images // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 246-251. DOI:10.25743/SDM.2021.11.90.030.
- [7] David G. Ordinal statistics. Moscow: Nauka, 1979.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПАХАННОСТИ УЧАСТКОВ ЛИЧНЫХ ПОДСОБНЫХ ХОЗЯЙСТВ ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Сабаев А.А.^{1,2}, Понькина Е.В.²

¹ Государственный природный заповедник «Тигирекский», Барнаул

² Алтайский государственный университет, Барнаул

В статье рассматривается методика выявления степени распаханности участков личных подсобных хозяйств (ЛПХ), с использованием индексов вегетации и влажности, построенных на основе мультиспектральных спутниковых снимков Sentinel-2 за вегетационный период. Работа проведена на примере 1000 участков личных подсобных хозяйств Кытмановского района Алтайского края за 2024 год.

Ключевые слова: распаханность сельскохозяйственных земель, мультиспектральные спутниковые снимки, индексы вегетации и влажности, статистический анализ, машинное обучение, R.

USING MACHINE LEARNING METHODS TO ASSESS THE PLOWING RATE OF PERSONAL SUBSIDIARY PLOTS BASED ON MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGERY

Sabaev A.A.^{1,2}, Ponkina E.V.²

¹ Tigiretsky State Nature Reserve, Barnaul

² Altai State University, Barnaul

The article discusses a methodology for identifying the degree of plowing of personal subsidiary plots (LPH) using vegetation and moisture indices constructed from Sentinel-2 multispectral satellite imagery during the growing season. The work was carried out on the example of 1,000 personal subsidiary plots in the Kytmanovsky District of Altai Krai for 2024.

Keywords: plowing rate of agricultural lands, multispectral satellite imagery, vegetation and moisture indices, statistical analysis, machine learning, R.

Одним из аспектов исследования режимов использования участков ЛПХ является оценка степени распаханности, базирующаяся на детектировании наличия и площади пашни, показывающая долю культивируемой пашни от общей площади участка. В данном исследовании производилось нахождение различий в индексах вегетации и влажности между распахируемыми и не распахируемыми участками ЛПХ, и выработка методики классификации распахиваемости, либо не распахиваемости земельных участков с использованием набора спутниковых данных.

В качестве тестовых было выбрано 1000 участков ЛПХ, визуально, по спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения Махар (0,6 м/пиксель) за июль 2024 г. участки были размечены по трём классам: пашня, здания и сооружения, прочие земли.

На основе спутниковых снимков Sentinel-2 за вегетационный период рассчитаны временные ряды индексов GNDVI [2], MCARI [4], MSI [5] и NDMI [8], а также их статистические показатели. Были обучены четыре модели машинного обучения: градиентный бустинг [6], дерево решений [7], случайный лес [1] и метод опорных векторов [3]. Классификация выполнялась на уровне пикселей. Выбор итоговой классификационной модели осуществлен на основе оценки точности на тестовой выборке. В результате классификация всех участков выполнена методом градиентного бустинга, который продемонстрировал более высокую точность (overall accuracy > 0,8) по тестовым данным по сравнению с другими моделями.

По результатам работы разработана программа ЭВМ в среде Python, позволяющая в автоматизированном режиме загрузить спутниковые данные для выбранных полигональных объектов, сформировать датасет и выполнить предобработку (фильтрации, анализ дескриптивных свойств, анализ распределения данных).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Breiman L.* Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5-32.
- [2] *Buschmann C., Nagel E.* In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation // *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 4. P. 711-722.
- [3] *Cortes C., Vapnik V.* Support-vector networks // *Machine Learning*. 1995. Vol. 20, No. 3. P. 273-297.
- [4] *Daughtry C., Walthall C., Kim M., Brown de Colstoun E., McMurtrey J.* Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2000. Vol. 74, Is. 2. P. 229-239.
- [5] *Hunt R., Rock B.* Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances // *Remote Sensing of Environment*. 1989. Vol. 30, Is. 1. P. 43-54.
- [6] *Mason L., Baxter J., Bartlett P., Marcus F.* Boosting algorithms as gradient descent // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1999. Vol. 12. P. 512-518.
- [7] *Quinlan J.* Induction of decision trees // *Machine Learning*. 1986. Vol. 1. P. 81-106.
- [8] *Wilson E.H., Sader S.A.* Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 80, Is. 3. P. 385-396.

О СВЯЗИ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ И ВАРИАЦИЙ ОЗОНА ВО ВРЕМЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ОЗОНОВОЙ АНОМАЛИИ

Серебренникова Л.М.¹, Кашкин В.Б.¹, Рублева Т.В.¹, Симонов К.В.²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Выполнен анализ ежедневных озоновых данных в стратосфере Южного полушария за период 1996-2024 гг. на основе спутниковых измерений спектрометрами TOMS и OMI (NASA). Выявлено, что уменьшение ОСО внутри Антарктической озоновой дыры (АОД) сопровождается увеличением количества озона в циркумполярном вихре. Обнаружены квазидвухлетние колебания озона в средних и полярных широтах. Во время существования АОД квазидвухлетние колебания воздействуют на перенос масс озона.

Ключевые слова: спутниковые данные, стратосфера, озон, квазидвухлетние колебания, волновая активность, циркумполярный вихрь, Антарктическая озоновая дыра.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN QUASI-BIENNIAL OSCILLATIONS AND OZONE VARIATIONS DURING THE EXISTENCE OF THE ANTARCTIC OZONE ANOMALY

Serebrennikova L.M.¹, Kashkin V.B.¹, Rubleva T.V.¹, Simonov K.V.²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk

An analysis of daily ozone data in the Southern Hemisphere stratosphere for the period 1996-2024 was performed based on satellite measurements by TOMS and OMI spectrometers (NASA). It was found that a decrease in TOC inside the Antarctic ozone hole (AOH) is accompanied by an increase in the amount of ozone in the circumpolar vortex. Quasi-biennial oscillations of ozone were detected at mid- and polar latitudes. During the existence of the AOD, the quasi-biennial oscillations affect the ozone mass transport.

Keywords: satellite data, quasi-biennial oscillation, ozone, stratosphere, Antarctic ozone hole, circumpolar vortex, wave activity.

Введение. Как показали многочисленные наземные и спутниковые измерения, на пространственно-временную изменчивость озона влияют не только фотохимические механизмы, но внешние и внутренние геофизические факторы. Одним из них являются волновые процессы в средней атмосфере [1]. Для анализа волновой активности часто используется такое явление как квазидвухлетние колебания (КДК) экваториального зонального ветра в широтном поясе с полушириной $\pm 12^\circ$ [2]. Средний период КДК составляет 28 месяцев. В стратосфере данное атмосферное явление наблюдается в слое от ~ 100 гПа (~ 16 км) до ~ 3 гПа (~ 40 км). Построенный в работе [3] мгновенный вертикальный профиль зонального ветра в атмосферном слое 18-35 км имеет вид волны, в которой восточные ветры сменяются западными (восточная и западная фаза КДК). В результате квазидвухлетние колебания оказывают динамическое влияние на процессы от тропосферы до стратосферы, а также от экватора до полюсов. В тоже время эти квазирегулярные межгодовые колебания с чередованием направления ветра происходят в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА), оказывая влияние на перенос газовых атмосферных примесей, в том числе и озона.

Ввиду этого исследования пространственно-временной изменчивости озоносферы Южного полушария не теряют своей актуальности. Здесь в полярных широтах в зимне-весенний период ежегодно, начиная с 1985 г., наблюдается планетарная аномалия – Антарктическая озоновая дыра (АОД). В [4] определяется, что АОД – это участок стратосферы над южной полярной областью, где общее содержание озона (ОСО) меньше климатической нормы равной 220 е.Д. (1 е.Д. = 10^{-5} м). Период существования этого планетарного геофизического объекта составляет 3-4 месяца. Отметим, что в отдельные годы площадь, которую может занимать АОД, достигает более 20 млн км² [5].

В данной работе изучались вариации общего содержания озона в средних и полярных широтах Южного полушария в зимне-весенний период 1996-2024 гг. по спутниковым данным спектрофотометров TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer, Earth probe, 1996-2004 гг.) и OMI (Ozone Monitoring Instrument, Aura, 2004-2024 гг.) NASA. Эти приборы осуществляли надирные измерения обратно рассеянного солнечного излучения в спектральном диапазоне 290-400 нм в течение суток [6]. Погрешность измерений составляет не более 2%. Алгоритм определения ОСО с помощью TOMS и OMI аналогичен наземной методике, рассмотренной в [4]. После предварительной обработки спутниковая информация представлена в открытом доступе базы NASA [5].

Вариации озона в средних и полярных широтах Южного полушария. По данным TOMS и OMI нами получена карта распределения общего содержания озона в Южном полушарии за 5 октября 2024 г. (рисунок 1, а). При построении данной карты использовалась интерполяция по методу Krigе и заполнение пропущенных пикселей в пакете Surfer-13. На рисунке 1, а видно, что АОД – это «темная» область, где регистрируется ОСО менее 220 е.Д. Она расположена в широтном диапазоне (70-90° ю.ш.). Здесь 5 октября 2024 г. минимальное значение озона составило 107 е.Д.

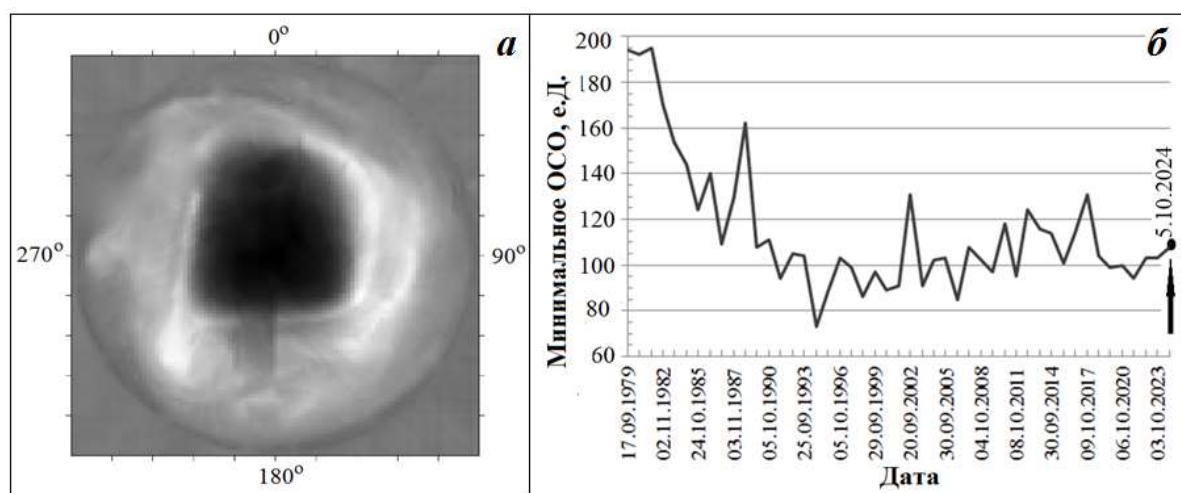


Рис. 1. Карта распределения озона в Южном полушарии за 5 октября 2024 г. (а) и вариации минимумов ОСО в АОД за период 1979-2024 гг. (б).

На рисунке 1, а показано, что озонная аномалия окружена «кольцом» с повышенными значениями ОСО, «светлая» область в средних широтах в диапазоне от 30 до 65° ю.ш. Это зона действия циркумполярного вихря (ЦВ). По оценкам [4], радиус полярного вихря, в среднем, составляет 4505 км. В метеорологии, под ЦВ понимается циклоническое вращение воздуха в тропосфере и стратосфере вокруг полюса, с запада на восток в системе ОЦА [7,8].

Ранее в работе [4] в «кольце» ЦВ был выполнен анализ зональных средних значений ОСО в сентябре-октябре с 1996 по 2011 годы, когда существовала планетарная озонная аномалия над Антарктидой. Обнаружено, что в двух 5-градусных широтных кругах (45-50° ю.ш.) и (50-55° ю.ш.), где наиболее активен циркумполярный вихрь, наблюдаются максимальные значения ОСО.

На рисунке 1, б приведены минимальные значения озона в АОД, характеризующие «глубину» полярной аномалии, с 1979 по 2024 годы по данным [5]. Отметим, что минимумы ОСО за весь изучаемый период варьировались в пределах от значений 194 е.Д. (1979) до 85 е.Д. (2006). Из рисунка 1, б видно, что во временном промежутке 1979-1987 гг. происходит резкое снижение минимумов ОСО со 194 е.Д. до 108 е.Д., т.е. в 1.8 раза. Выявлено, что в период с 1996 по 2024 годы «глубина» озонной аномалии изменялась не столь существенно, всего в пределах 47 е.Д.

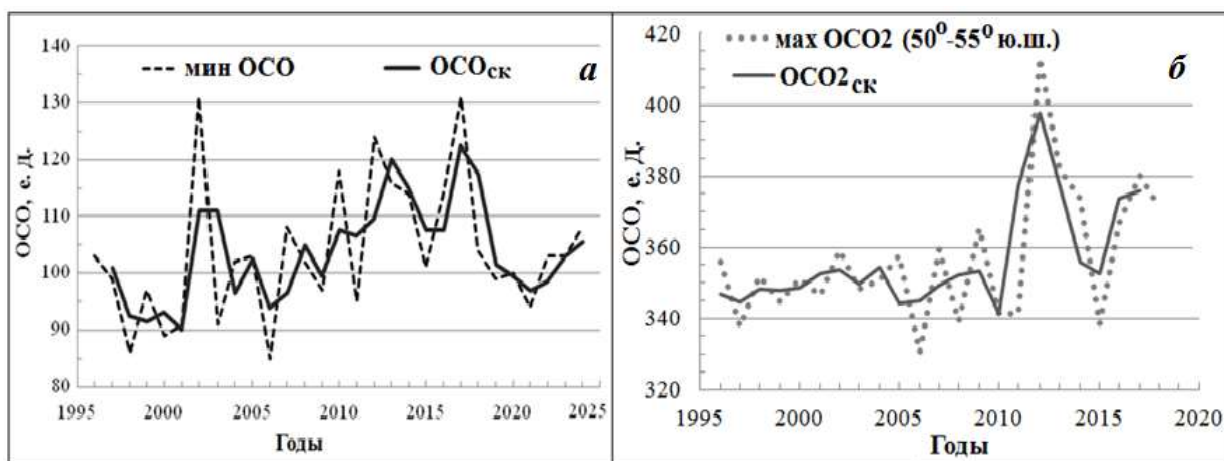


Рис. 2. Межгодовые вариации: минимумов ОСО за период 1996-2024 гг. (а) и максимальных значений ОСО в сентябре-октябре 1996-2018 гг. (б).

На основе спутниковых данных TOMS и OMI проведен анализ ежедневных минимальных значений ОСО в озонной аномалии за август-октябрь. На рисунке 2, а приведены межгодовые вариации минимумов ОСО за период 1996-2024 гг. Для сглаживания колебаний минимумов ОСО и выявления закономерностей в пространственно-временной изменчивости озона в нижней стратосфере Антарктиды рассчитывалось скользящее среднее. Рассчитывался коэффициент корреляции R между рядами минимумов ОСО и сглаженного с периодом 2 года (OCO_{ck}), который составил $R_1 = 0.71$. Полученный результат указывает на наличие существенной корреляционной связи между вариациями «глубины» АОД и квазирегулярными межгодовыми атмосферными колебаниями (КДК).

В анализе использовались три типа данных за сентябрь и октябрь: максимальные значения ОСО, приведенные в [4], максимумы озона периода 2012-2018 гг., полученные на основе ежедневной спутниковой информации [5], и минимумы общего содержания озона в АОД. Значения первого и второго типа данных относятся к двум указанным выше 5-градусным зонам, где действует циркумполярный вихрь. В качестве примера на рисунке 2, б приведен график вариаций максимальных значений ОСО в широтной зоне ($50-55^\circ$ ю.ш.).

Для сглаживания ряда $\max OCO_2$ рассчитывалось скользящее среднее с окном 2. На рисунке 2, б представлен сглаженный график ряда OCO_{2ck} . Коэффициент корреляции между рядами $\max OCO_2$ и OCO_{2ck} составил $R_2 = 0.76$. Полученный результат указывает на наличие существенной корреляционной связи между вариациями максимумов OCO_2 в 5-градусной зоне ЦВ ($50-55^\circ$ ю.ш.) и сглаженным рядом с периодом, равным 2. Полученный ряд максимумов OCO_2 наглядно показывает квазидвухлетнюю цикличность вариаций в изучаемой широтной зоне «кольца» циркумполярного вихря.

Дополнительно рассчитывались коэффициенты корреляции R между рядами мин ОСО и $\max OCO_1$ (в $45-50^\circ$ ю.ш.), а также между – мин ОСО и $\max OCO_2$ (в $50-55^\circ$ ю.ш.). В первом случае $R_{11} = 0.52$, а во втором – $R_{22} = 0.64$. Отсюда следует, что уменьшение общего содержания озона внутри Антарктической озоновой дыры сопровождается увеличением количества озона в циркумполярном вихре в широтной зоне ($50-55^\circ$ ю.ш.).

Закключение. При анализе значений ОСО в Южном полушарии во время существования Антарктической озоновой аномалии по спутниковым данным во временных рядах минимумов и максимумов ОСО были обнаружены квазидвухлетние колебания, модулируемые квазирегулярной периодичностью зонального ветра. Уменьшение общего содержания озона внутри АОД сопровождается увеличением количества озона в ЦВ. Выявлены существенные колебания максимальных и минимальных значений ОСО в исследуемый период. Полагаем, что они связаны с волновой активностью в стратосфере и сменой фаз КДК, которые являются высокочастотными квазирегулярными изменениями атмосферы. При восточной фазе ОСО возрастает.

тает, а при западной – понижается. Полученные результаты позволяют анализировать процессы в системе общей циркуляции в Южном полушарии во время существования АОД на межгодовых масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Kashkin V.B., Rubleva T.V., Romanov A.A.* Modulation of the meridional ozone transfer by the Southern oscillation, ENSO, in the time of filling Antarctic ozone hole // *Proceedings of SPIE*. 2020. Vol. 11560. Art. No. 115608. DOI:10.1117/12.2575634.
- [2] *Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Ефимов М.М.* Моделирование остаточной меридиональной циркуляции в разные фазы квазидвухлетнего колебания // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, №. 1. С. 27-36.
- [3] *Сидоренков Н.С., Зотов Л.В.* Квазидвухлетняя цикличность ветра в экваториальной стратосфере // *Геофизические процессы и биосфера*. 2024. Т. 23, № 3. С. 52-58.
- [4] *Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г.* Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: СФУ, 2015. 182 с.
- [5] NASA. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 21.02.2025).
- [6] *Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J. et al.* The ozone monitoring instrument: overview of 14 years in space // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18, No. 8. P. 5699-5745.
- [7] *Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л.* Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб: РГГМУ, 2013. 327 с.
- [8] *Lecouffe A., Godin-Beekmann S., Pazmino A., Hauchecorne A.* Evolution of the intensity and duration of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex edge for the period 1979-2020 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 2, No. 6. P. 4187-4200. DOI:10.5194/acp-22-4187-2022.

ОБРАБОТКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СОСТАВЕ ЦЕНТРА КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «ИКИ-МОНИТОРИНГ» ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СПУТНИКОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Уваров И.А.

Институт космических исследований РАН, Москва

В ИКИ РАН разработана технология сбора, хранения и анализа метеоданных. Архив поддерживается в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» и основан на использовании моделей NCEP и WRF. Данные отображаются на картах и анализируются в виде временных рядов совместно с показателями, полученными на основе спутниковых данных. Данные интегрированы в несколько специализированных информационных систем для мониторинга природных и антропогенных объектов.

Ключевые слова: метеорологические данные, климат, временные ряды, информационная система, спутниковый мониторинг, базы данных.

PROCESSING THE METEOROLOGICAL DATA WITHIN THE «IKI-MONITORING» CENTER FOR COLLECTIVE USE IN SATELLITE INFORMATION SYSTEMS

Uvarov I.A.

Space Research Institute RAS, Moscow

At the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS), the technology has been developed for collecting, storing, and analyzing meteorological data. The archive is maintained within the «IKI-Monitoring» User Center and is based on models such as NCEP and WRF. The data are visualized on maps and analyzed as time series alongside indicators derived from satellite data. These data are integrated into several specialized information systems for monitoring natural and anthropogenic objects.

Keywords: meteorological data, climate, time series, information system, satellite monitoring, databases.

Разработка специализированных тематических систем спутникового мониторинга предполагает возможность проведения комплексного анализа данных дистанционного зондирования в сочетании с другими видами информации, среди которых особое место занимают метеорологические показатели. Такой интегрированный подход позволяет получать более полную картину состояния окружающей среды, что особенно важно для решения задач оценки природных рисков, мониторинга климатических изменений и управления природными ресурсами. Область применения таких данных чрезвычайно широка: от оценки рисков возникновения природных пожаров и влияния засухи на рост растений до отслеживания распространения вулканических пепловых облаков, исследования процессов на поверхности океана и морей, а также анализа атмосферных явлений в различных регионах мира.

Для реализации этих задач в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) была создана современная технология автоматического получения, хранения и анализа метеорологических данных. Эта система обеспечивает сбор информации из различных источников, включая прогнозные модели и ретроспективные показатели. Используемые данные значительно различаются по набору доступных параметров (метеозлементов), по частоте обновлений и по географической локализации. В качестве исходных данных выступают как измерения, полученные в точках метеостанций – включая фактические наблюдения – так и данные, полученные на узлах регулярной сетки.

Обработанные статистически данные могут быть представлены по различным административным единицам: районам, областям или другим территориальным делениям. Такой подход позволяет проводить анализ как на локальном уровне, так и в масштабах всей территории исследуемого региона. Используются данные, рассчитанные моделью NCEP с пространственным разрешением 0.25° , а обновление происходит каждые три часа. В архивах ИКИ РАН хранятся более двух десятков показателей состояния атмосферы у поверхности Земли – такие как

температура воздуха, влажность, давление – а также вертикальные профили температуры на различных изобарических уровнях.

Основываясь на данных NCEP, в ИКИ РАН рассчитываются более детальные данные с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting). Расчеты с помощью этой модели позволяют получать данные с разрешением 15 и 5 км. Это особенно важно для локальных исследований и оценки погодных условий в конкретных районах или объектах.

Визуализация метеорологических данных осуществляется с помощью разнообразных методов отображения на картах. Для данных на регулярной сетке применяются изолинии – линии одинаковых значений параметров; для точечных измерений или данных с метеостанций используют картограммы и значки. Значки могут быть выполнены в виде прямоугольных символов с цветовой кодировкой и числовыми значениями, что позволяет быстро оценить текущие показатели. Одновременный анализ нескольких параметров осуществляется через сложные значки или комбинированные графические элементы – например, совмещенные графики или диаграммы внутри одного символа.

Визуализация также возможна в разрезе территориальных единиц – например, по административным районам – с помощью картограмм или цветowych заливок. Показатели могут быть представлены как в абсолютных значениях (например, температура в градусах Цельсия), так и в относительных величинах (например, отклонение от многолетней нормы). Такой подход облегчает интерпретацию данных и выявление аномалий.

Анализ временной динамики метеорологических параметров осуществляется для различных объектов: отдельных точек наблюдения, районов или станций. Специальный интерфейс системы позволяет строить графики временных рядов – это значительно упрощает выявление трендов и сезонных колебаний. Такой инструмент способствует совместному анализу изменений нескольких показателей и их взаимосвязи с другими важными величинами – например, индексами растительности (NDVI), уровнем осадков или гидротермическим коэффициентом.

Использование временных рядов позволяет сравнивать сезонные колебания за разные годы, выявлять особенности климатических характеристик конкретных регионов или объектов наблюдения. Это особенно важно при оценке долгосрочных трендов изменения климата или при прогнозировании возможных природных катастроф.

На основе обработанных климатических данных формируются производные показатели – статистические преобразования исходных параметров – для выявления погодных аномалий или особенностей развития природных процессов. Например, рассчитываются средние многолетние значения для конкретного дня года или месяца; отклонения текущих значений от этих средних; накопленные показатели за год; региональные нормы. Также применяются сглаживания временных рядов и индексы температуры или гидротермического коэффициента для более глубокого анализа климатической ситуации.

Система функционирует с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Работа финансируется в рамках темы Минобрнауки «Космос-Д», госрегистрация 122042500019-6.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уваров И.А., Халикова О.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Платонов А.Е., Прошин А.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 30-45.
- [2] Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычуглов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263-284.

- [3] Радченко М.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Бурцев М.А., Юдин Д.А. Инфраструктура центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг: текущее состояние и перспективы развития // Материалы 21-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 13-17 ноября 2023 г. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 103. DOI:10.21046/21DZZconf-2023a.
- [4] Бутаков Н.Ю., Уваров И.А., Целев В.Ю. Использование моделей WRF и SWAN и их интеграция в ИС «See the Caspian Sea» // Материалы 21-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 13-17 ноября 2023 г. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 69. DOI:10.21046/21DZZconf-2023a.
- [5] Уваров И.А., Костяной А.Г., Лаврова О.Ю. Разработка информационной системы мониторинга Каспийского моря «See the Caspian Sea» на основе спутниковых и метеорологических данных // Материалы 21-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 13-17 ноября 2023 г. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 110. DOI:10.21046/21DZZconf-2023a.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ СЕРВИСОВ С УЧЕТОМ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Фёдоров Р.К., Климонов М.С.

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск

Большое количество сервисов и сложность их взаимодействия является существенным сдерживающим фактором развития сервис-ориентированной архитектуры. Разработанный метод позволяет создавать композиции сервисов с учетом индивидуальных пользовательских рекомендаций. Рекомендации сервисов производятся на основе анализа истории вызовов сервисов.

Ключевые слова: сервис-ориентированная архитектура, OGC WPS, обработка пространственных данных.

SERVICE COMPOSITIONS TAKING INTO ACCOUNT USERS' PREFERENCES

Fedorov R.K., Klimonov M.S.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk

The large number of services and the complexity of their interaction is a significant inhibitory factor in the development of service-oriented architecture. The proposed method allows creating service compositions taking into account individual user recommendations. Service recommendations are made based on an analysis of the history of service calls.

Keywords: service-oriented architecture, OGC WPS, spatial data processing.

Введение. В современном мире в рамках Сервис-ориентированной архитектуры (СОА) [1] активно растет количество сервисов, реализующих предоставление, обработку и публикацию данных. Например, это сервисы предоставления данных дистанционного зондирования земли, обработки пространственных данных, расшифровки генома и т.д. Созданные сервисы значительно упрощают решение многих задач. Часто за ними скрываются большие массивы данных, вычислительные ресурсы, которые трудно развернуть для выполнения нерегулярных вычислений. В области обработки ПД определены и активно используются стандарты Open Geospatial Consortium (OGC) [2]. Наличие большого количества сервисов, с одной стороны, увеличивает возможности исследователей, а с другой стороны, значительно усложняет поиск нужных сервисов для решения конкретной задачи. Применение сервиса в рамках СОА почти всегда приводит к композиции сервисов, т.е. к объединению сервисов предоставления данных, вычислительных сервисов и публикации [3]. Множество используемых сервисов значительно отличается в зависимости тематики исследований каждого пользователя. Например, у ботаников и географов они могут вообще не пересекаться или только в отдельных взятых сервисах. Поэтому является важным при работе в СОА, учитывать не только техническую возможность применения сервиса и ее композицию с другими сервисами, но и личные пользовательские предпочтения.

Постановка задачи. Обозначим множество пользователей $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и множество сервисов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. В рамках геопортала ИДСТУ СО РАН [3] производится сбор статистики применения сервисов. Таким образом, информация о поведении пользователя в информационной системе выражается количеством вызовов c_{ij} сервиса s_j пользователем u_i .

Рекомендательная система для выбора веб-сервисов должна ранжировать сервисы с учетом пользовательских предпочтений. Таким образом, решение проблемы формулируется, как построение функции оценки релевантности сервисов для пользователя:

$$r(u_i, s_j) \rightarrow [0, 1], \quad (1)$$

где $u_i \in U$, $s_j \in S$, значение функции, равное 0, обозначает, что сервис не соответствует нуждам пользователя, а 1 – наоборот. Чем больше значение функции, тем большей релевантностью обладает сервис для выбранного пользователя.

Важно учитывать, что иногда сервисы ориентированы на определенные предметные области или же могут быть универсальными и использоваться в разных предметных областях. Предполагается, что при использовании специалистом нового сервиса его можно рекомендовать другим специалистам из этой же области или коллегам из других областей, но работающим над похожими задачами или имеющим общие области интереса. Возникает подзадача определения близости пользователей.

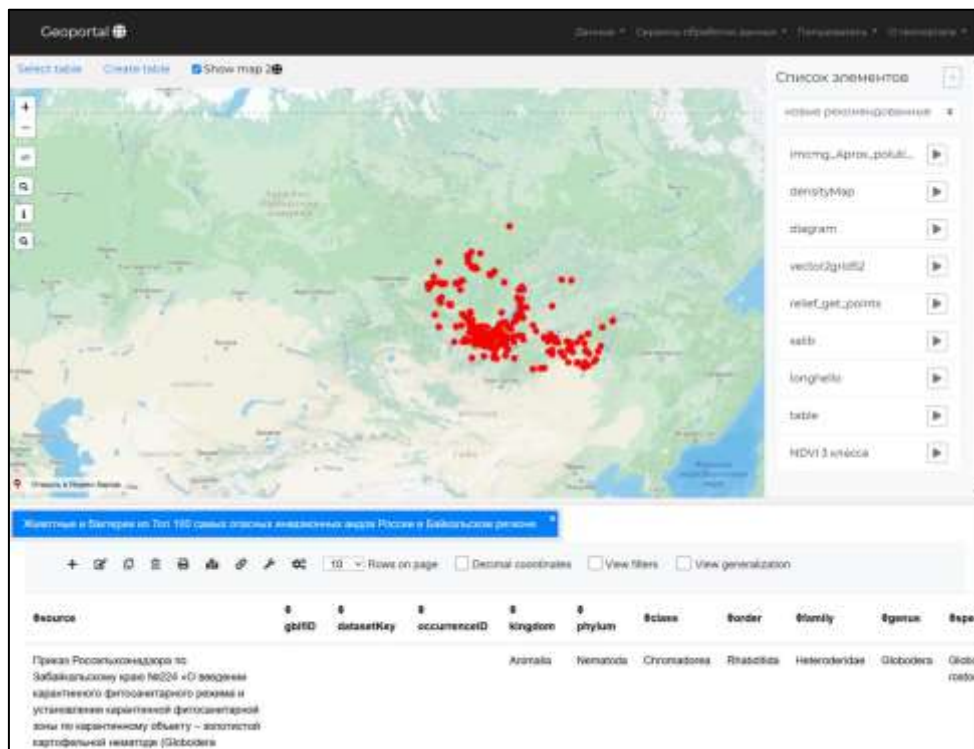
$$d(u_i, u_g) \rightarrow [0, \infty),$$

где d – где функция, определяющая расстояние между пользователями (близость). Значение функции, равное 0, характеризует полное совпадение области интересов, тогда как увеличение значения указывает на их расхождение. Близость пользователей можно оценить на основе статистики их взаимодействия с сервисами. Совпадение множества используемых сервисов с учетом частоты вызовов свидетельствует о схожести исследовательских интересов.

Формирование композиций. На основе метода [4] производится определение возможности передачи данных между сервисами, т.е. возможности создания композиции сервисов.

Для текущего пользователя и сервиса выполняются следующие шаги:

- Шаг 1. Оценка близости пользователей;
- Шаг 2. Формирование списка сервисов, с которыми возможна композиция;
- Шаг 3. Вычисление для каждого сервиса из списка, полученного на шаге 2, функции оценки релевантности сервисов для пользователя и их сортировка (см. рисунок).



Вывод сервисов для сервиса данных.

Заключение. Большое количество сервисов и сложность их взаимодействия является существенным сдерживающим фактором развития сервис-ориентированной архитектуры. Разработанный метод позволяет создавать композиции сервисов с учетом индивидуальных пользовательских рекомендаций. Рекомендации сервисов производятся на основе анализа истории вызовов сервисов. Преимуществом метода является возможность распространения информации об сервисах среди специалистов близких по предметной области.

Работа выполнена при поддержке ЦКП ИИВС ИРНОК, базового проекта 121030500071-2.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bih J.* Service oriented architecture (SOA) a new paradigm to implement dynamic e-business solutions // Ubiquity. 2006. Vol. 4. P. 1-17. DOI:10.1145/1162511.1159403.
- [2] *Schut P.* OpenGIS ® Web Processing Service // Open Geospatial Consortium. 2007. No. 6. P. 1-3.
- [3] *Edmond D., ter Hofstede A.* Service composition for electronic commerce // Proceedings of the Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS-2000). Hong Kong, 2000.
- [4] *Фёдоров P.К.* Метод композиции сервисов обработки пространственных данных // Материалы VI международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024). 2024. С. 160-168. DOI:10.47350/ICCS-DE.2024.25.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТУРОВ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ СО СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-2 ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНОГО РЕЛЬЕФА

Хмельнов А.Е., Хмельнова Т.Ф.

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск

С использованием индекса NDWI на спутниковых изображениях получается выделить контура береговых линий с субпиксельной точностью. При этом становится заметной погрешность взаимного позиционирования снимков Sentinel-2. Разработан алгоритм поиска субпиксельного сдвига растровых изображений, минимизирующего отклонение между парой снимков. После сдвига контура береговых линий, полученные с разных снимков, становятся более согласованными, но ошибки прослеживания этих контуров до конца не исчезают. Разработан алгоритм построения согласованной модели рельефа по неточным контурам береговых линий, который использует информацию об уровне воды в момент выполнения снимков для определения высоты контуров. Выполнено тестирование предложенной технологии на участках Братского водохранилища и оз. Байкал.

Ключевые слова: NDWI, контура береговых линий, субпиксельное совмещение растровых изображений, триангуляции Делоне с ограничениями, алгоритм согласования неточных контуров, Sentinel-2.

THE USE OF SHORELINE CONTOURS EXTRACTED FROM SATELLITE IMAGES FOR CONSTRUCTION OF COASTAL TERRAIN MODELS

Hmelnov A.E., Hmelnova T.F.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the SB RAS, Irkutsk

Using the index NDWI for satellite images it is possible to extract the shoreline contours with a sub-pixel accuracy. However, comparison of the contours obtained from different Sentinel-2 images usually reveals the errors of their relative positioning. We have developed a new algorithm to find the sub-pixel shift for a pair of raster images, which can minimize the error distance between the images after the shift. After applying the shifts computed, the shoreline contours obtained from different images become more consistent, but they will still have some errors caused by clouds, waves etc. So we have developed another algorithm for their reconciliation to construct a consistent relief model from the imprecise coastline contours. The algorithm needs the information about the water level at the time of image acquisition to set the levels, corresponding to the contours. We have tested the proposed technology on some military grid tiles in the area of the Bratsk Reservoir and Lake Baikal.

Keywords: NDWI, shoreline contours, sub-pixel image co-registration, constrained Delaunay triangulations, algorithm for reconciliation of imprecise contours, Sentinel-2.

Введение. Для решения задач гидрологического моделирования водных объектов, оценки последствий изменения уровня воды, требуется получить совмещённую модель рельефа, объединяющую информацию о наземном и подводном рельефе. При этом сложнее всего найти качественную информацию о подводном рельефе, поэтому представляют интерес любые способы хотя бы частичного получения такой информации. В данной работе рассматривается подход, основанный на выделении контуров береговых линий на спутниковых снимках Sentinel-2, сделанных при разных уровнях воды с дальнейшим комбинированием этой информации для получения модели прибрежного рельефа для всего диапазона наблюдаемых уровней воды. Заметим, что для многих практических задач именно этот диапазон высот представляет наибольший интерес и требует наиболее точных данных, в то время как для других фрагментов рельефа может быть использована более грубая информация.

Контура береговых линий. Для построения контуров береговых линий используется водный индекс (NDWI), который вычисляется по зелёному и ближнему инфракрасному каналам: $NDWI = (B_{green} - B_{NIR}) / (B_{green} + B_{NIR}) = (B_{03} - B_{08}) / (B_{03} + B_{08})$ для изображений

Sentinel-2. Разрешение наиболее детальных каналов Sentinel-2 (10 м/пиксель) может показаться недостаточным для решения рассматриваемой задачи, поскольку смещение береговой линии между снимками часто оказывается существенно меньше 10 м. Однако, эти изображения получается обрабатывать с субпиксельной точностью: достаточно вместо бинаризации по порогу использовать готовый алгоритм построения контурных линий (изолиний) растрового изображения NDWI [1].

При построении контурных линий для нескольких уровней яркости растра NDWI необходимо выбрать тот из уровней, который наиболее точно соответствует наблюдаемому в этот момент положению береговой линии. Пиксели растра NDWI принимают значения в диапазоне от -1 до 1 . Сначала при поиске береговых линий для выбора наилучшего уровня яркости мы сразу строили изолинии в диапазоне уровней от 0 до 0.25 с шагом 0.05 . Наиболее подходящий уровень яркости проще всего найти при наличии мостов или других подобных объектов: выбираем тот уровень, для которого ширина моста совпадает с наблюдаемой на снимках высокого разрешения. Чаще всего при этом «побеждали» уровни 0.1 или 0.15 , но всё это зависело от снимка.

В дальнейшем удалось избавиться от необходимости выбора наилучшего порога яркости за счёт реализации массовой параллельной обработки изображений Sentinel-2, которые распространяются с уровнем обработки L1C, до уровня обработки L2A. При этом используется стандартная для этой задачи программа `sen2cor`, в которой пришлось исправить ряд ошибок, препятствующих параллельной работе нескольких её экземпляров на одном компьютере. В результате получается обработать до уровня L2A на компьютере со 128 ГБ оперативной памяти и 12-ядерным процессором AMD Ryzen 9 5900X все полученные с 2017 года достаточно безоблачные изображения для одного тайла (всего 300-500 изображений) за 10-20 часов. Дальнейший опыт использования растров NDWI, построенных по изображениям Sentinel-2 обработанных до уровня L2A, показал, что для них наилучшим уровнем яркости всегда оказывался 0 , что позволяет отказаться от выбора уровня используемых изолиний.

Ошибки позиционирования космоснимков. Простейшим способом проверки точности получаемых контуров является их сопоставление для нескольких снимков одной территории, сделанных в разное время, но при близких уровнях воды: степень отклонения этих контуров характеризует точность метода. При этом становится заметно, что контура с разных снимков часто оказываются смещёнными относительно друг друга на некоторое небольшое расстояние, обычно не превышающее одного пикселя (± 10 м) по каждой из координат [1]. Действительно, в статье [2], опубликованной вскоре после запуска спутника Sentinel-2A, в Таблице 2 приводятся заданные при проектировании системы спутниковых наблюдений требования по точности геопозиционирования продуктов уровня 1 (2σ): 20 м без использования наземных реперных точек и 12.5 м при их использовании. Современные оценки точности геопривязки изображений приведены в отчёте [4]: с марта 2021 г. её среднюю абсолютную величину удалось сократить до 6 м.

Субпиксельное совмещение растровых изображений. Для поиска вектора субпиксельного сдвига $\vec{\delta} = (\delta_x, \delta_y)^T$, обеспечивающего наилучшее согласование двух растровых изображений $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ рассмотрим соответствующие им непрерывные функции $a(x, y)$ и $b(x, y)$, получаемые из $a_{i,j}$ и $b_{i,j}$ с использованием билинейной интерполяции на сетках изображений. В качестве минимизируемой функции ошибок, зависящей от вектора сдвига, будем использовать среднеквадратичное отклонение между двумя функциями изображений при данном сдвиге на пересечении их областей определения:

$$E(\vec{\delta}) = \iint (a(x, y) - b(x + \delta_x, y + \delta_y))^2 dx dy \quad (1)$$

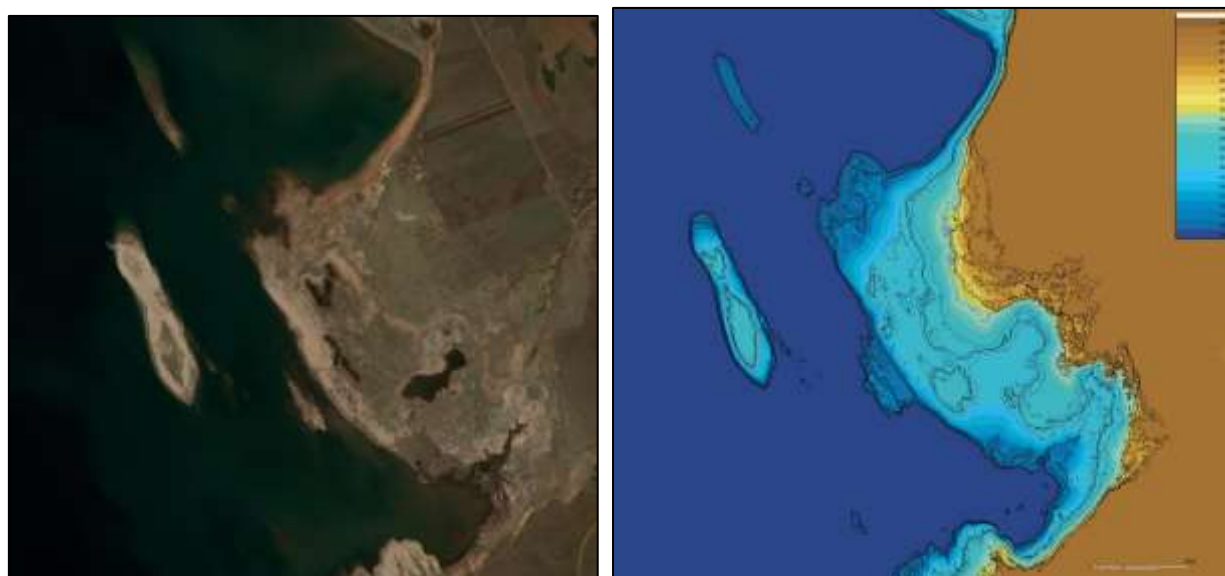
Для минимизации функции используем метод градиентного спуска. Были получены формулы частных производных функции ошибок по координатам вектора сдвига. Реализованы два варианта алгоритма: с числовыми и с символьными вычислениями. Хотя числовые вычисления выполняются быстрее символьных, их приходится делать с нуля для каждого шага алгоритма по двум изображениям с размерами 10980×10980 пикселей. Символьные вычисления

достаточно выполнить один раз, при этом получаются выражения для $E(\vec{\delta})$ в виде полиномов 4 степени, из которых далее легко вычисляются выражения для производных. Выражения быстро вычисляются и позволяют эффективно найти минимум функции. Заметим, что для каждого из 4-х квадрантов, в которые может пойти сдвиг из начальной точки, требуется вычислить своё выражение. Эти вычисления выполняются по мере необходимости, поэтому, как правило, обрабатываются 1-2 квадранта из 4-х. После того как обнаружилось, что смещение между изображениями иногда может превышать 1 пиксель, алгоритм был доработан, чтобы он, при необходимости, продолжал поиск минимума в квадратных окрестностях большего размера, при этом для каждого пикселя такой окрестности, по которому проходит градиентный спуск, требуется вычислить своё выражение для функции ошибок.

Массовая обработка изображений. При пакетной обработке спутниковых изображений одной трапеции (тайла), сделанных в разное время, необходимо выбрать среди них базовое изображение – качественный снимок без облаков и других помех, найти вектора смещений для всех остальных снимков относительно базового изображения, и сдвинуть на эти вектора соответствующие контура береговых линий. При этом необходима информация об уровне воды на момент создания каждого изображения, которая добавляется к атрибутам объектов, описывающих выделенные контура береговых линий, в виде вычисляемого поля. После этого требуется вручную отобрать качественные контура, которые будут далее использованы для построения модели рельефа. Это – самый трудоёмкий этап, но без него нельзя обойтись, т.к. для рассматриваемых территорий характерна частая облачность, а для некоторых тайлов есть годы, в которые не было ни одного безоблачного снимка. Ручная работа облегчается сценариями на Python, позволяющими динамически подгружать данные при раскрытии узлов в создаваемом ими дереве слоёв QGIS.

Построение модели рельефа по неточным контурам. Даже после сдвига, компенсирующего ошибку привязки изображений Sentinel-2, контура для разных уровней могут пересекаться из-за погрешности измерений и влияния таких природных явлений, как волнение, облачность, и т.д. Поэтому возникла задача построения модели рельефа по контурам береговых линий, которые могли быть получены с ошибками. Алгоритм для решения этой задачи должен удовлетворять следующим требованиям:

1. при отсутствии ошибок результат должен совпадать с триангуляцией, построенной по контурам, как по изолиниям рельефа;
2. накопление информации (добавление новых контуров) должно постепенно повышать точность получаемой модели.



Сопоставление снимка Яндекс и результирующей триангуляции.

Такой алгоритм удалось разработать и реализовать в составе ПО для работы с триангуляциями. Он основан на построении вспомогательной триангуляции, в которой каждому треугольнику сопоставляется истинный уровень его затопления – тот, который лучше всего согласуется с его списком затапливающих уровней.

Заключение. Использование свободно распространяемых спутниковых данных позволяет получить беспрецедентный охват исследуемых территорий. Наиболее проблемным шагом предложенной технологии является ручная проверка качества используемых контуров, сейчас мы проводим исследования по упрощению этой работы за счёт автоматизации выделения некачественных фрагментов изображений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Hmel'nov A.E., Gachenko A.S., Ruzhnikov G.M.* Construction of nearshore underwater terrain model by coastline detection on open satellite images for different water levels // 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. Vol. 11916, No. 3. P. 56-71.
- [2] *Tr'emas T.L. et al.* Sentinel-2: presentation of the CAL/VAL commissioning phase // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI. International Society for Optics и Photonics, SPIE, 2015. Vol. 9643. P. 964309. DOI:10.1117/12.2194847.
- [3] Storey J.C. et al. A note on the temporary misregistration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 186. P. 121-122. DOI:10.1016/j.rse.2016.08.025.
- [4] *S2 MSI ESL team.* Sentinel-2 L1C data quality report. Technocal Report OMPC.CS.DQR.01.07-2023. ESA, 2023. Is. 90.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСАДОК МОНОКУЛЬТУР ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ДРЕВОСТОЕВ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СЪЕМОК СО СПУТНИКОВЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

Якимов Н.Д., Дергунов А.С., Краснощечков К.В., Пономарёв Е.И.
Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск

Представлена сопряженная калибровка спутниковых и беспилотных измерений сезонной динамики спектральных характеристик посадок монокультур лесобразующих древостоев Сибири (сосна сибирская, лиственница, осина, берёза, сосна, ель) на примере уникального экспериментального полигона в окрестностях г. Красноярска. Получена динамика вегетационных характеристик для 6 монокультур древостоев в течение полного фенологического цикла (120-275 дни сезона). Для лиственных древостоев уровень значимости модельной кривой составил 0.77-0.95 (БПЛА/RedEdge-MX) и 0.61-0.93 (Landsat-8, -9/OLI). Для хвойных древостоев – на уровне 0.41-0.96 и 0.43-0.9 соответственно. Сравнение полученных данных показало приемлемый уровень сопоставимости значений NDVI, при зафиксированном расхождении значений в пределах 19-34%.

Ключевые слова: Сибирь, монокультуры древостоев, спектральные характеристики, NDVI, Landsat, БПЛА.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SIBERIAN MONOCULTURE FOREST STANDS FROM SATELLITE AND UAV DATA

Yakimov N.D., Dergunov A.S., Krasnoshchekov K.V., Ponomarev E.I.
Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk

This study presents joint calibration of satellite and UAV measurements. Seasonal spectral dynamics were analyzed for monoculture stands of key Siberian species: Siberian pine, larch, aspen, birch, Scots pine, and spruce. Research utilized a unique test site near Krasnoyarsk. Seasonal vegetation dynamics were tracked across a full phenological cycle (days 120-275). For deciduous stands, model curve significance reached 0.77-0.95 (UAV/RedEdge-MX) and 0.61-0.93 (Landsat-8, -9/OLI). For coniferous stands, significance was 0.41-0.96 (UAV) and 0.43-0.90 (satellite). NDVI values showed acceptable comparability. Recorded discrepancy ranged between 19 and 34%.

Keywords: Siberia, monoculture stands, spectral characteristics, NDVI, Landsat, UAV.

Введение. В настоящее время оценка состояния растительных покровов, в особенности на обширных труднодоступных территориях, является актуальной задачей, решаемой с использованием средств дистанционного мониторинга [1]. Спутниковые данные (Landsat-8, -9) охватывают территорию Сибири и с учетом периодичности съёмки (8-16 дней) эффективно применяются для мониторинга лесных экосистем. Однако пространственное разрешение (30 м), даже с применением методов повышения качества изображения – паншарпинга (15 м), недостаточно для детального анализа на уровне древостоев [2]. Данные БПЛА, напротив, предоставляют данные высокого пространственного разрешения (до 3 см) и более гибкую периодичность съёмки, но имеют ограничение в виде значительно более низких охватов площади, затратности и трудоемкости обработки данных по времени [2]. С учётом всех особенностей они подходят для изучения локальных лесных участков [2,3]. Наиболее эффективным может быть использование спектральных характеристик растительности на комбинированных данных со спутника и БПЛА. Для этого необходима взаимная калибровка таких данных, особенно с привязкой к основным лесобразующим древостоям.

Цель работы – Оценить уровень расхождения между спектральными характеристиками, полученными по данным Landsat-8, -9 (OLI) и БПЛА (RedEdge-MX), для посадок монокультур основных лесобразующих пород Сибири в течение вегетационного сезона. Количественно определить степень согласованности данных разных систем для их последующей взаимной калибровки и повышения качества комплексного дистанционного мониторинга в Сибири.

Район и методы исследования. Исследование проведено в окрестностях Красноярского края на полигоне с посадками монокультур шести основных древостоев Сибири: ели сибирской (*Picea obovata*), берёзы кустарниковой (*Betula fruticosa*), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), осины обыкновенной (*Populus tremula*), лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) и сосны сибирской (*Pinus sibirica*). Общая площадь территории составила ~8 га.

В работе использовались спутниковые данные среднего пространственного разрешения Landsat-8, -9/OLI (14 сцен) и данные высокого пространственного разрешения БПЛА/RedEdge-MX (9 сцен). Так как получать синхронные данные, не проводя ежедневные съемки, является достаточно сложной задачей, синхронность данных достигалась сопоставимым временем съемки (11:45-13:00), когда параметры солнца (азимут, угол) в меньшей степени влияют на эффект теней от крон при условии плотной посадки древесной растительности. Оценка сомкнутости выполнялась по натурным снимкам из-под полога леса, выполняемым в нади́р по двум снимкам для каждой монокультуры с использованием бинаризации кадров. На синхронной паре снимков (14.06.2024) оценивался % тени деревьев с использованием классификации снимков высокого разрешения, далее методом LSMA [4] корректировались значения отражательной способности с каналов NIR и Red. Облачность непосредственно над участком на спутниковых данных отсутствовала и была умеренной при проведении аэрофотосъемки, где постобработка на основе данных датчика DLS2 оптимизировала яркость полученных сцен. Периодичность полетов БПЛА составляла ~14 дней. Временной сдвиг между датами съемки спутника и БПЛА составлял от 0 до 17 дней. Аэрофотосъемка выполнялась с высоты 50 метров, а обработка данных выполнялась в ПО Metashape PRO, по методике производителя. Данные Landsat Collection 2 Level 1 обрабатывались в ПО QGIS с преобразованием значений сырых значений DN в отражательную способность с учетом угла солнца по стандартной методике (<https://usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>). Дополнительно для повышения пространственного разрешения мультиспектральных изображений Landsat-8, -9 использовалась процедура паншарпинга на основе панхроматического канала методом Brovey Transformation [5].

Результаты. Полученные оценки значений сомкнутости крон достигали 67%, что соответствует критерию сомкнутых древостоев. Для каждого участка монокультур рассчитан класс «тени от крон» (на основе данных синхронной даты – 14.06.2024), в среднем такое значение составило $\sim 15 \pm 7\%$ от площади полигона. Эти данные учтены при корректировке значения NIR и RED, таким образом отражательная способность (TOA Reflectance) увеличилась на 13% и 9% соответственно. Далее оценивался уровень расхождения между спектральной отражательной способностью данных БПЛА и Landsat (рисунки 1).

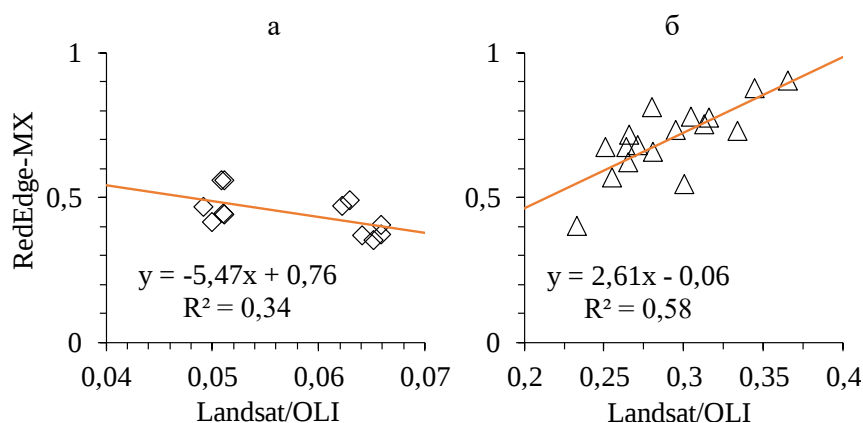


Рис. 1. Сравнение квазисинхронных данных о спектральной отражательной способности поверхности по данным спутника и БПЛА в видимом (а) и ближнем инфракрасном (б) диапазонах.

При сопоставлении двух вариантов данных о спектральной отражательной способности поверхности крон рассматриваемых древостоев зафиксирована линейная связь с уровнем детерминации $R^2 \sim 0.34$ для красного ($\lambda = 0.64-0.67$ мкм) канала и $R^2 \sim 0.58$ для ИК-канала ($\lambda =$

0.85-0.88 мкм). Расхождения объясняются как асинхронностью съёмки, так и значительным различием пространственной разрешающей способности и точностью привязки пикселей непосредственно к рассматриваемым объектам. В течение вегетационного сезона для всех временных срезов NDVI, рассчитанных по данным БПЛА-съёмки, зафиксированы систематические завышения относительно данных по Landsat/OLI (рисунок 2).

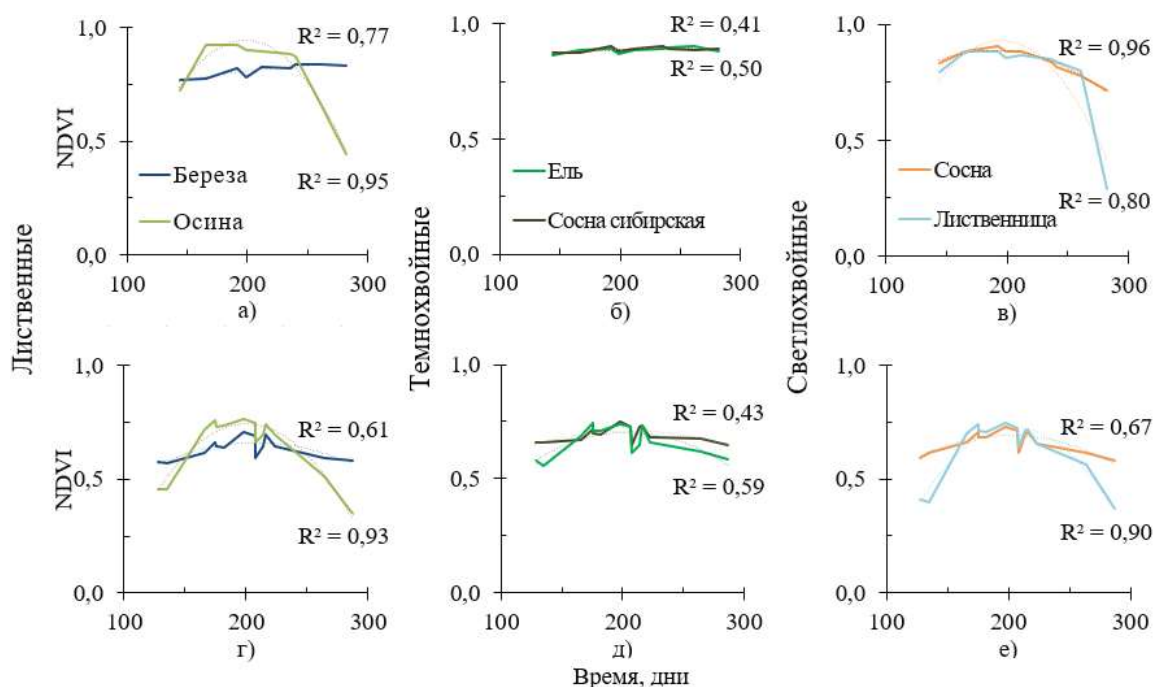


Рис. 2. Динамика значений вегетационного индекса NDVI в течение сезона 2024 г. для лиственных и хвойных монокультур по данным съёмки БПЛА RedEdge-MX (а, б, в) и Landsat-8/9 OLI/TIRS (г, д, е).

Сезонные тренды представлены полиномиальными кривыми 2 степени, уравнение $y=ax^2+bx+c$. С использованием данного уравнения были рассчитаны синхронные по датам значения NDVI для спутника и БПЛА с 14-ти дневным интервалом для которых зафиксированы отклонения в течение сезона, результаты представлены в таблице.

Стандартное отклонение модельных значений NDVI (Δ , %) для хвойные (ХД) и лиственных (ЛД) древостоев за выделенные номера дней (НД).

НД	114	128	142	156	170	184	198	212	226	240	254	268	282
ХД	34	30	27	25	24	23	22	22	22	22	22	22	22
ЛД	26	24	22	21	20	19	19	19	19	20	21	22	22

Уровень расхождения данных варьировал от 34% до 19%. Особенности кривых можно разделить на 3 варианта с учётом классификации категорий лесов: 1) Лиственные, где на участках посадок осины отмечаются понижение (< 0.45) значения NDVI в начале (144 день) и конце вегетационного сезона (282 день), а максимум NDVI (0.75-0.90) закономерно зафиксирован в середине сезона (июль-начало августа). Такая динамика значений NDVI характерна для здоровых лиственных древостоев. Однако для посадок берёзы эта особенность экспериментально не подтверждена. Вероятно, в нашем случае это связано с наличием в нижнем ярусе обильного подроста сосны и ели на участке монокультуры берёзы. Таким образом, при сомкнутости крон на уровне 40%, хвойный подрост нижнего яруса не позволяет снижаться значениям NDVI ниже отметки 0.55; 2) Темнохвойные, участки сосны сибирской и ели с показателем сомкнутости крон $> 66\%$. Характеризуется постоянным уровнем значений NDVI в течение фенологического сезона по данным БПЛА, однако по данным Landsat присутствуют снижения NDVI в граничные сроки периода вегетации, что вполне может быть связано с влиянием

янием граничащих участков, так как перекрытие пикселями Landsat на границе участка составляло 80-90%. Таким образом, при расчёте NDVI в значение для монокультуры ели и сосны сибирской интегрируются сигнал пограничных участков, а величина отклонения между значениями БПЛА и спутника в начале и конце сезона возрастает до $\Delta = 34\%$; 3) Светлохвойные. Для участка монокультуры лиственницы сезонные минимумы NDVI привязаны к периодам сброса хвои (май, октябрь), что зафиксировано закономерным спадом значений NDVI в начале и конце вегетационного сезона по данным БПЛА и Landsat. Ненулевые значения NDVI на границах сезона определяются подростом нижнего яруса, что возможно при зафиксированной сомкнутости крон лиственничников $\sim 45\%$. Отклонения значений за рассмотренный период – на уровне $\Delta = 25\%$.

Заключение. Сравнение данных Landsat/OLI и БПЛА/RedEdge-MX демонстрирует приемлемый уровень сопоставимости значений NDVI: 22-34% для хвойных и 19-26% для лиственных. Тени от крон занижают значения спектральной отражательной способности на снимках Landsat, которую можно улучшить на $11 \pm 2\%$ при калибровке по данным БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Балашов И.В., Кашицкий А.В., Бартаев С.А. и др.* Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 4. С. 73-88.
- [2] *Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В. и др.* Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 87-99.
- [3] *Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И. и др.* Определение породной структуры лесного участка по ортофотопланам беспилотной аэрофотосъемки // Актуальные проблемы современного лесоводства. Вторые Международные чтения памяти Г.Ф. Морозова: сб. ст. 2020. С. 141-152.
- [4] *Zhao Y.I., Xu J., Zhong K. et al.* Impervious surface extraction by linear spectral mixture analysis with post-processing model // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 128476-128489.
- [5] *Pushparaj J., Hegde A.V.* Comparison of various pan-sharpening methods using Quickbird-2 and Landsat-8 imagery // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10. Art. 119.
- [6] *Пономарёв Е.И., Якимов Н.Д., Краснощёков К.В., Дергунов А.В.* Данные съёмки беспилотных и спутниковых систем в анализе спектральных характеристик посадок монокультур лесообразующих пород Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025.

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ УРОЖАЙНОСТИ КУКУРУЗЫ НА ОСНОВЕ ЗНАЧЕНИЙ ТВЕРДОСТИ ПОЧВЫ

Яковлев Д.А.¹, Пошивайло Я.Г.², Иванов Н.М.³, Колесников А.А.²

¹ Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

³ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск

Твёрдость почвы является достаточно важной характеристикой при оценке среды развития корневой системы растений и особенностей механического воздействия на почву при обработке. С появлением современного оборудования появляется техническая возможность привязки данных о твёрдости почвы к пространственным координатам, что открывает новые возможности для анализа полученных данных. В работе рассматриваются подходы к кластеризации сельскохозяйственных угодий по классам твердости почвы и дальнейшее построение прогнозной модели урожайности для кукурузы.

Ключевые слова: геопространственное моделирование, урожайность, твердость почвы, структурные анализ, сельскохозяйственные угодья.

STRUCTURAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL LANDS AND CONSTRUCTION OF CORN YIELD MODELS BASED ON SOIL HARDNESS VALUES

Yakovlev D.A.¹, Poshivaylo Ya.G.², Ivanov N.M.³, Kolesnikov A.A.²

¹ Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

³ Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology RAS, Krasnoobsk

Soil hardness is a rather important characteristic when assessing the environment for the development of the root system of plants and the features of mechanical impact on the soil during processing. With the advent of modern equipment, it becomes technically possible to link data on soil hardness to spatial coordinates, which opens up new possibilities for analyzing the obtained data. The paper examines approaches to clustering agricultural lands by soil hardness classes and further construction of a predictive yield model for corn.

Keywords: geospatial modeling, crop yield, soil hardness, structural analysis, agricultural fields.

Введение. Необходимость в развитии технологий точного земледелия обуславливается наличием почвенных неоднородностей в рамках отдельных сельскохозяйственных угодий. Данные неоднородности оказывают влияние на технические процессы практически на всех этапах сельскохозяйственных работ. Негативной стороной отсутствия учета почвенных неоднородностей являются недоборы урожая и чрезмерные погектарные затраты при производстве продукции. Одной из основных идей точного земледелия является то, что сельскохозяйственные поля, как объекты технологического воздействия обладают рядом пространственно-временных характеристик, относящихся к физико-химическим, механическим и другим свойствам почв и позволяющих дифференцировать те или иные параметры процессов обработки.

Методы и материалы. Одним из таких критериев неоднородности почв является её твёрдость, измеряемая чаще всего в кгс/см² или кПа. В свою очередь твердость является прочностной или силовой характеристикой, а не весовой как плотность. Твердость почвы связана с определенными физико-химическими и агрофизическими свойствами почвы. Высокие значения твёрдости почвы могут оказывать отрицательное влияние на корневую систему растений, ограничивая развитие в пределах почвенного профиля, а также отрицательно сказываться на водном и воздушном режимах почвы. Помимо этого, при высоких значениях твёрдости почвы может быть затруднено прорастание семян после посева, а также могут увеличиваться эксплуатационные затраты при работе машинно-тракторных агрегатов.

В данном исследовании выполнялась оценка и моделирование влияния твёрдости почвы на урожайность зеленой массы кукурузы. Сбор данных проводился в АО «Ивановское», рас-

положенном в с. Ивановка, Баганского района, Новосибирской области, на трех смежных полях площадью 25, 24 и 22 га. Твёрдость почвы на глубине 0-60 см определялась на каждом из трёх полей при помощи пенетрометра SmartSoil S-60 посредством проколов почвы, с регистрацией измерений в кПа через каждый сантиметр глубины.

Далее на основании полученных данных о твёрдости почвы в среде геоинформационной системы QGIS для каждого из трёх полей были построены интерполяционные поверхности, с целью выделения трех классов зонирования твёрдости почвы (низкая, средняя, высокая). Результаты зонирования затем использовались для определения характерных точек отбора проб урожайности.

Биологическая урожайность зелёной массы кукурузы определялась путём отбора характерных растений с трёх погонных метров в трёхкратной повторяемости в каждой определённой ранее зоне твёрдости почвы.

Основная идея исследования заключается в сравнительном анализе результатов регрессионных моделей, получаемых на основе инструментов машинного обучения при расчете зависимости определенных показателей твёрдости почвы и урожайности зелёной массы кукурузы. Изменяемыми параметрами в данном случае будут выступать алгоритмы машинного обучения (линейная регрессия, деревья решений и их ансамбли, полносвязные нейронные сети) и их гиперпараметры, комбинации показателей твёрдости почвы (весь набор полученных значений, усредненные по интервалам, синтезированные с помощью алгоритмов снижения размерности). Для оценки точности использовался показатель средней абсолютной ошибки.

Результаты. По результатам моделирования получены ошибки в 27.8 ц/га для алгоритма CatBoost и 37.5 ц/га для полносвязной нейронной сети, что составляет порядка 7 и 11% соответственно.

Проанализировав результаты точности построенных моделей были сделаны следующие выводы:

- большая абсолютная прогнозная точность урожайности наблюдается по измерениям, выполненным в июне;
- наибольшую стабильность результатов показали алгоритмы Random Forest и kNN;
- совмещение измерений за апрель и июнь не оказало влияния на точность. Возможно требуется введение дополнительных связей, а также включение в исследование измерений будущих сезонов для верификации полученных результатов и корректировки параметров построенных моделей. Однако, следует отметить, что данный вариант демонстрирует стабильные результаты в разных вариантах обработки;
- среди проанализированных комбинаций представления данных наибольшую точность показала комбинация, использующая значения с 6 по 30 см, которая наилучшим образом учитывает особенности корневой системы.

На основе построенных моделей были подобраны наиболее оптимальные значения твёрдости почвы для каждого из 60-сантиметровых интервалов, используя алгоритм Tree-structured Parzen estimator на базе структуры случайного леса.

Заключение. Предлагаемый подход показал свою целесообразность, особенно с учетом регулярного автоматизированного сбора данных о твердости почвы, что позволит в дальнейшем уточнить модели урожайности. Построенные модели позволят учитывать их результаты при дифференцированной обработке почвы. Предложенный подход может быть транслирован на другие культуры. Также перспективным представляется построение многофакторной модели, учитывающей большее число параметров (влажность, параметры рельефа и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рулев А.С., Шинкаренко С.С., Бодрова В.Н., Сидорова Н.В. Геоинформационные технологии в обеспечении точного земледелия // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 115-122. DOI:10.32786/2071-9485-2018-04-15.

- [2] *Biberdzic M., Stojiljkovic J., Barać S., Djikic A., Prodanovic D., Lalevic D.* Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield // *Chilean journal of agricultural research*. 2020. Vol. 80(1). P. 80-89. DOI:10.4067/S0718-58392020000100080.
- [3] *Ferreira C.J.B., Tormena C.A., Severiano E.C., Zotarelli L.* Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2021. Vol. 67(3). P. 383-396. DOI:10.1080/03650340.2020.1733535.
- [4] *Панасюк А.Н., Епифанцев В.В., Дегтярев Д.А.* Ограничения применения колесных тракторов в технологиях растениеводства по уплотняющему воздействию (в условиях Приамурья) // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2024. Т. 18(1). С. 83-90. DOI:10.22450/1999-6837-2024-18-1-83-90.
- [5] *Koolen A.J.* A method for soil compactibility determination // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1974. Vol. 19(3). P. 271-278.
- [6] *Джаббаров Н.И., Добринов А.В.* Оптимальное проектирование почвообрабатывающих машин с учетом их потребной мощности // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 1(106). С. 50-62. DOI:10.24411/2713-2641-2021-10277.