



**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ**

**Материалы X Международной научной конференции
Красноярск, 12–15 сентября 2023 г.**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Институт космических и информационных технологий

*Мероприятие проведено при поддержке
Правительства Красноярского края,
Госкорпорации РОСКОСМОС, ИКИ РАН,
КРОО «Ассоциация выпускников КГТУ»*

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы X Международной научной конференции
Красноярск, 12–15 сентября 2023 г.

Электронное научное издание

Научный редактор
Е. А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2023

УДК 528.8:004.932(063)
ББК 26.0+32.811.3
P326

Редакционная коллегия:

Е. А. Ваганов (науч. ред.), доктор биологических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель СФУ; *Г. М. Цибульский* (отв. ред.), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СИИ ИКИТ СФУ; *М. В. Носков*, доктор физико-математических наук, профессор; *В. Б. Кашкин*, доктор технических наук, профессор; *В. И. Харук*, доктор биологических наук, профессор; *Ю. А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, руководитель НУЛ «ИПКМ» ИКИТ СФУ; *Р. В. Брежнев*, кандидат технических наук, доцент кафедры СИИ ИКИТ СФУ

P326 Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы X Междунар. науч. конф. Красноярск, 12–15 сентября 2023 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Электрон. дан. (13,3 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2023. – Электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb Ram ; Windows 98/XP/7 ; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-7638-4867-0

Представлены современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования, рассмотрены модели и методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, приведены результаты мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов и явлений. Обсуждена проблематика построения и развития региональных систем дистанционного зондирования Земли из космоса, показана их роль в решении социально-экономических задач регионов.

Предназначены для специалистов в области дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологий, аспирантов, студентов, обучающихся по соответствующим профилям подготовки.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

УДК 528.8:004.932(063)
ББК 26.0+32.811.3

ISBN 978-5-7638-4867-0

© Сибирский федеральный университет, 2023

Электронное научное издание
Компьютерная верстка Е. А. Сафиной
Подписано в свет 04.09.2023. Заказ № 19722
Тиражируется на машиночитаемых носителях
Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391)206-26-16; <http://rio.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	9
<i>Брежнев Р. В., Федоров И. Е., Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Герасимова Е. И.</i> Развитие технологии интерактивного формирования процессов обработки и анализа данных ДЗЗ.....	9
<i>Бронов С. А., Калитина В. В., Чайковский В. Е., Чайковская Д. Г.</i> Особенности моделирования исполнительных устройств аппаратуры космических спутников для дистанционного зондирования Земли.....	14
<i>Бронов С. А., Калитина В. В., Чумаченко А. А., Вайман М. Е.</i> Управление исполнительными устройствами космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли.....	18
<i>Вечерков В. В., Дунаева Е. А., Филина Я. А.</i> Совместное использование ДЗЗ и БВС для оценки внутрислоевого неоднородности.....	22
<i>Гостева А. А., Баженова Н. А.</i> Разработка веб-приложения в Google Earth Engine для наблюдения за глобальным состоянием атмосферы.....	27
<i>Гулютин Н. Н.</i> Использование протокола RTMP для обработки данных с БПЛА алгоритмами компьютерного зрения в реальном времени.....	31
<i>Жуковская В. А., Пятаева А. В., Гулютин Н. Н.</i> Создание дйтасета для детектирования крон деревьев.....	35
<i>Подольская Е. С., Кокуркин А. Д.</i> Опыт применения ГИС-инструментов с открытым кодом для распознавания дорог.....	39
<i>Полевицкова Ю. А.</i> Использование лидарной съемки как элемент стратегии развития цифровых платформ.....	43
<i>Пушкарев А. А., Кузнецова А. С., Ерунова М. Г., Якубайлик О. Э.</i> Региональная информационная система «АгроМониторинг» ФИЦ КНЦ СО РАН...	46
<i>Раевич А. П., Добронец Б. С., Попова О. А.</i> Развитие технологий оценки состояния лесного покрова.....	50
<i>Субботин Д. Е., Михайленко Л. В., Маннанов М. З., Егоров А. С.</i> Перспективные малые космические аппараты дистанционного зондирования земли с различной целевой аппаратурой.....	53

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	55
<i>Авраменко Ю. В., Хмельнов А. Е., Федоров Р. К.</i> Векторизация карто-схемы подстилающей поверхности Иркутской области.....	55
<i>Гордиенко А. С., Корнеев А. В.</i> Распознавание последствий пожаров на основе комплекса дешифровочных признаков.....	59
<i>Гостева А. А., Зайцев Н. Е., Матушко А. К., Таныгин К. Е.</i> Анализ температуры поверхности и ее сезонных изменений с использованием данных Landsat 8–9 C2L2.....	63
<i>Дмитриев Е. В., Кондранин Т. В., Мельник П. Г., Слюсарева И. В.</i> Многомасштабная текстурная сегментация спутниковых изображений лесных территорий.....	68
<i>Евстратова Л. Г., Степанченко О. Е.</i> Информационное обеспечение экологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым данным.....	77
<i>Жуков А. А., Клещ А. В., Жукова Е. Ю., Ботвич И. Ю.</i> Концепт базы данных «Оценка секвестрации углерода растительностью техногенно нарушенных территорий Республики Хакасия».....	82
<i>Захарова Н. Б., Шевченко Б. С.</i> Контроль данных дистанционного зондирования о температуре поверхности Черного и Азовского морей.....	88
<i>Им С. Т.</i> Оценка влияния климатических факторов на динамику растительного покрова Хакасии.....	93
<i>Картушинский А. В., Ботвич И. Ю., Картушинский С. А.</i> О функциональных разрывах аэрокосмических данных поверхности Земли для моделирования экологических процессов.....	97
<i>Кашницкий А. В., Антошкин А. А., Денисов П. В., Толпин В. А., Трошко К. А.</i> Верификация информации о местах произрастания сельскохозяйственных культур на основе среднего значения индекса NDVI на поле.....	102
<i>Макаров Д. С., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Харламов Д. В.</i> Исследование покрытого снегом льда методом ГНСС-рефлектометрии.....	106
<i>Мачука К. Р., Керчев И. А., Марков Н. Г.</i> Семантическая сегментация мультиспектральных изображений хвойных деревьев, полученных с помощью БПЛА.....	110
<i>Нарыкова А. Н., Плотникова А. С.</i> Анализ результатов моделирования запасов углерода лесной подстилки на территории Республики Карелия и Карельского перешейка.....	115

<i>Никитина А. Д., Нарыкова А. Н., Плотникова А. С., Данилова М. А.</i> Корреляционный анализ факторов распределения почвенного органического углерода территории Республики Карелия и Карельского перешейка.....	120
<i>Павлова Е. В.</i> Элементы природного каркаса Южно-Минусинской котловины локального уровня.....	124
<i>Пармузин Е. И., Шутяев В. П.</i> Исследование чувствительности модели к данным спутниковых наблюдений при вариационной ассимиляции.....	128
<i>Перфильев Д. А.</i> Интеллектуальная технология сегментации изображения кислотности почвы.....	132
<i>Пятаев А. С., Писаренко Э. А.</i> Алгоритм удаления фона для задачи выделения кроны деревьев по данным наземной съемки.....	137
<i>Харламов Д. В., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Макаров Д. С.</i> Многочувствительная интерферометрия от сигналов навигационных спутников в слоистых структурах древостоя.....	141
<i>Шаврина У. Ю., Кочеткова Т. Д., Мурашкин В. С., Волкова М. А., Колесниченко Л. Г.</i> Оценка влияния пожаров на теплофизические свойства лишайникового покрова плоскобугристых торфяников криолитозоны Западной Сибири.....	145
<i>Шелопут Т. О., Петров С. В.</i> Алгоритмы сжатия и обработки геофизических данных на основе матричных аппроксимаций.....	148
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ.....	152
<i>Алексеев А. Б., Плотникова А. С.</i> Оценка структурной сложности древостоя хвойно-широколиственных лесов Тверской области по данным воздушного лазерного сканирования.....	152
<i>Белолипецкий В. М., Генова С. Н.</i> Двухслойная параметризация температурной инверсии над городом Красноярском.....	156
<i>Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н.</i> О термодинамике верхнего деятельного слоя Мирового океана.....	160
<i>Варламова Е. В., Соловьев В. С.</i> Отклик интегрального вегетационного индекса (TIN) на изменение климата в Восточной Сибири.....	164
<i>Васильева С. А., Стародубцев В. С.</i> Исследование динамики концентрации метана над послепожарными территориями в Якутии по данным спектрометра TROPOMI.....	168

<i>Гаврилюк Е. А., Бавшин И. М., Тихонова Е. В., Семенков И. Н.</i> Оценка породно-возрастной структуры лесов НП «Смоленское поозерье» на основе интеграции спутниковых, полевых и исторических материалов.....	172
<i>Гиниятуллина О. Л., Гречишкин П. В.</i> Дистанционный мониторинг деформаций селитебных зон на подработанных территориях.....	177
<i>Гостева А. А., Матушко А. К.</i> Алгоритм определения локализации водорослей при комплексном использовании космических снимков.....	182
<i>Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Серeda И. И., Зимин М. В.</i> Разработка методических основ дистанционного мониторинга пшеничных агроценозов.....	186
<i>Дергунов А. В., Якубайлик О. Е.</i> Сравнение температурной стратификации атмосферы по данным прибора мтп-5 и модели GFS в Красноярске.....	191
<i>Жукова Е. Ю., Жуков А. А., Чагин В. В., Клец А. В., Ботвич И. Ю.</i> Динамика восстановленной растительности на тестовых участках в Республике Хакасия по данным SENTINEL 2.....	195
<i>Забродин А. Н., Пономарёв Е. И.</i> Оценка энергетических характеристик пожаров Сибири и степени воздействия на древостои по данным ДЗЗ.....	201
<i>Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э.</i> Построение пространственного распределения PM2.5 над центральными и южными районами Красноярского края.....	206
<i>Кремнева О. Ю., Данилов Р. Ю., Серeda И. И., Зимин М. В.</i> Изучение особенностей спектральных характеристик посевов разных сортов озимой пшеницы с учетом их устойчивости к фитопаптогенам.....	210
<i>Куулар Х. Б., Чульдум А. Ф.</i> Оценка пожаров растительности Республики Тыва за 2020 г. на основе GEE.....	215
<i>Литвинов С. В., Милорадов Г. А., Авдеев К. В., Семёнова О. В.</i> Влияние частного солнечного затмения 25 октября 2022 года на региональную возмущенность ионосферы Западной Сибири.....	220
<i>Маргарян В. Г., Цибульский Г. М., Седракан А. М., Аветисян Г. Д.</i> Пространственно-временные закономерности формирования минимального стока рек в Севанском бассейне.....	225
<i>Маргарян В. Г., Цибульский Г. М., Седракан А. М., Раевич К. В., Аветисян Г. Д.</i> Основные тенденции изменения 30-суточных значений минимального поверхностного стока зимнего периода рек бассейна озера Севан.....	232

<i>Матко Е. В., Сафонова А. Н.</i> Применение глубокого обучения для прогнозирования риска вымирания лесов от деятельности серой цапли на основе данных БПЛА.....	237
<i>Нарыкова А. Н., Плотникова А. С., Гераськина А. П., Шевченко Н. Е.</i> Подготовка предикторов для геопространственного моделирования сообществ дождевых червей Северо-Западного Кавказа.....	242
<i>Никитин А. А., Цыпышева И. Л.</i> Типизация термической структуры вод Японского моря и её изменчивость по данным спутниковой информации в период 1977–2023 гг.....	246
<i>Остроумова В. С., Загельский Н. Г.</i> Анализ локального ледового режима по материалам космосъёмок на примере участка реки Енисей.....	252
<i>Пикурова Е. В., Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В.</i> Картирование эмиссий диоксида серы в тропосфере полярных широт по данным OMPS/SNPP.....	256
<i>Пластинин Л. А., Ступин В. П., Хамедов В. А.</i> Методология и методическое обоснование картографо-космического мониторинга растительного покрова Сибири.....	261
<i>Пономарёв Е. И., Забродин А. Н., Швецов Е. Г.</i> Спутниковый мониторинг интенсивности пожаров растительности в связи с ростом прямых пожарных эмиссий углеродных соединений.....	266
<i>Раевич К. В., Герасимова Е. И., Зеньков И. В., Чинь ле Хунг, Нефёдов Б. И.</i> Исследование открытых горных работ на угольных месторождениях в центральной части США по данным дистанционного зондирования.....	270
<i>Раевич К. В., Герасимова Е. И., Зеньков И. В., Чинь ле Хунг, Нефёдов Б. И.</i> Исследование динамики и показателей деятельности угольных карьеров и тепловых станций Канады по данным дистанционного зондирования.....	276
<i>Раевич К. В., Герасимова Е. И., Зеньков И. В., Чинь ле Хунг, Нефёдов Б. И.</i> Угольные разрезы на территории Южной Суматры по данным спутниковой съемки. Технологии и комплексная механизация открытых горных работ.....	280
<i>Романов А. Н., Хвостов И. В., Трошкин Д. Н., Рябинин И. В., Романов Д. А.</i> Некоторые аспекты дистанционного микроволнового мониторинга леса.....	285
<i>Свердлик Л. Г., Имашев С. А.</i> Предсейсмические возмущения температуры в нижней атмосфере.....	289
<i>Свердлик Л. Г.</i> Аномальные изменения метеопараметров в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии.....	294

<i>Томшин О. А., Соловьев В. С.</i> Анализ пространственно-временной динамики параметров атмосферы во время эпизодов быстрого роста площади лесных пожаров в Восточной Сибири.....	299
<i>Федотова Е. В., Пучкова Н. А., Савицкая О. В.</i> Использование данных в среднем ИК-диапазоне для индикации поврежденных древостоев.....	303

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 004.02, 004.04, 004.5

**Р. В. Брежнев, И. Е. Федоров,
Ю. А. Маглинец, К. В. Раевич, Е. И. Герасимова**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com, ilya.fedorov.00700@gmail.com, maglinets@mail.ru,
ksenia_248@mail.ru, ket_gerakl@mail.ru

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРАКТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЗЗ

Аннотация. В статье описана программная система интерактивного формирования процессов обработки и анализа данных ДЗЗ. Отдельный процесс представляет собой упорядоченное множество, элементами служат вызовы программных модулей обработки данных. Процесс ассоциируется с прикладной задачей, решаемой пользователем системы, как правило, заданной в узкоспециализированном контексте. Система предоставляет набор визуальных средств построения процессов обработки данных. Целевая аудитория пользователей системы включает специалистов в области ДЗЗ и геоинформатики, решающих различные прикладные и научные задачи, основными или промежуточными результатами которых являются геопространственные данные, представленные в растровых и векторных форматах. В работе рассмотрена модификация системы, которая, в отличие от прежней версии, позволяет осуществлять многократное разделение потоков обработки данных. Система прошла тестовую апробацию на задачах анализа данных ДЗЗ Sentinel-2, Landsat-8, 9, Арктика-М в задачах агромониторинга и обнаружения лесных природных пожаров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка спутниковых данных, моделирование процессов, интерактивное формирование процессов, процесс обработки данных, конечный пользователь, параллельные процессы

Введение. Развитие международных космических программ дистанционного зондирования Земли влечет за собой количественный и качественный рост данных спутниковой съемки, которые позволяют расширять спектр научных и прикладных задач мониторинга, востребованных в деятельности государственного управления, бизнеса и среди населения. Определяется направление вектора развития систем дистанционного мониторинга (СДМ) от уровня специализированных к многоцелевым [1–4]. Одним из основных аспектов концепции многоцелевой системы является

наличие развитых средств диалогового взаимодействия конечных пользователей и системы для постановки задач. Результат постановки задачи рассматривается как информационный запрос, который требует немедленной или долговременной обработки, а это значит, что система должна обладать гибкими средствами обработки запросов.

В сформировавшейся на сегодняшний день концепции СДМ исполнение информационных запросов в значительной степени зависит от специалиста по обработке данных, с одной стороны, и разработчика программного обеспечения – с другой. При условии значительного роста числа информационных запросов и распределенного характера обработки спутниковых данных такой подход является неприемлемым, что определяет актуальность исследования и развития программной технологии взаимодействия «пользователь – специалист», предоставляющей возможность обрабатывать информационные запросы конечных пользователей без привлечения разработчиков программного кода.

Описание технологии построения процессов обработки данных. Обсуждаемая программная технология была разработана в 2018 г. коллективом НУЛ информационной поддержки космического мониторинга ИКИТ СФУ [5, 6]. Технология реализуется программно-технологической системой с web-интерфейсом, позволяющей специалистам в интерактивном режиме формировать последовательность обработки разнородных геопространственных данных для получения некоторого результата по запросу пользователя [7]. Пользовательский запрос рассматривается как задача, которая может быть декомпозирована на множество подзадач. Для решения каждой из подзадач в системе предусмотрен соответствующий функционал, представленный как сторонними, так и авторскими библиотеками. Таким образом, каждый элемент в последовательности обработки представляет собой отдельный программный модуль, выполняющий один шаг решения задачи. Каждой задаче устанавливается в соответствие процесс (алгоритм) её решения, реализуемый через совокупность вызовов модулей.

Изначально функциональные возможности системы позволяли выстраивать линейную обработку данных, т. е. такую последовательность, в которой каждый очередной модуль запускался на исполнение только после полного завершения работы предыдущего модуля (рис. 1, а). В целом такой подход является базовым для сценариев, предусматривающих поступление на вход последующего модуля результатов работы предыдущего модуля для дальнейшей обработки. Т. е. возникает понятие промежуточного результата, например, в виде растровых индексных изображений, результатов сегментации, кластеризации, векторных контуров, результатов вычислений различных признаков и т. д.

Период практической эксплуатации системы показал, что часто промежуточные результаты могут быть использованы повторно в других алгоритмах для получения на их основе дополнительных данных, необходи-

мых для исполнения других информационных запросов. Однако передать эти результаты в два и более разных алгоритмов было невозможно.

Для подтверждения данного тезиса рассмотрим абстрактный пример. Пусть два процесса A и B выполняются параллельно. Процесс A на одном из шагов формирует промежуточные данные, которые может использовать алгоритм B как входные для одного из своих модулей. Поскольку процессы не синхронизированы во времени, возможна ситуация, при которой B обращается к еще несуществующим данным. Синхронизировать работу процессов в многомерном случае нецелесообразно, т. к. существует риск появления множества системных процессов, находящихся в состоянии ожидания и занимающих системные ресурсы, в частности, использование процессора и оперативной памяти.

Кроме того, даже в рамках решения одной задачи результатов может быть несколько, например, значения нескольких разнородных признаков — спектрального NDVI и значения площади, занятой однородной растительностью. В случае с линейными алгоритмами, где каждый блок имеет определенный набор входов и выходов, организовать последовательность таким образом, чтобы получить наибольшее количество требуемых результатов далеко не всегда представляется возможным. Одним из вариантов решения данной ситуации является параллельное выполнение модулей в рамках одного алгоритма (рис. 1, б).

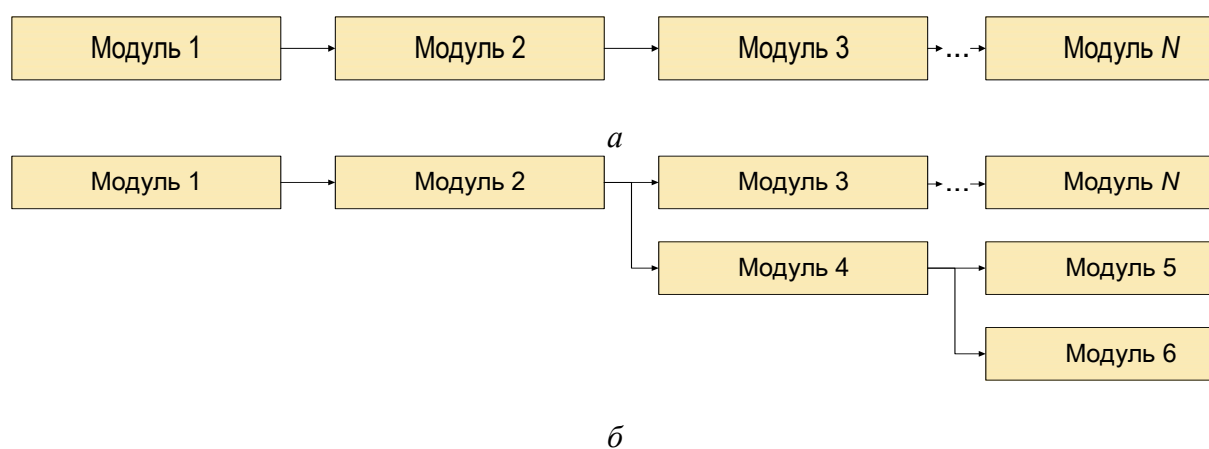


Рис. 1. Схема линейного и разветвленного алгоритма: а) линейный; б) разветвленный

Очевидно, что возможность ветвления алгоритма позволяет не только получать различные конечные результаты, основываясь на одних промежуточных данных, но и оптимизировать время обработки данных, а также время загрузки вычислительных ресурсов.

Результаты и планы развития. Реализация функциональных возможностей системы для интерактивного построения алгоритмов с возможностью многократного ветвления процесса обработки данных затронула модификацию многих системных компонентов. Таким образом, в обновленной версии системы полностью переработан web-интерфейс построения алгоритмов. Внедрена и доработана новая библиотека jsPlumb для графического моделирования. Кроме того, существенные изменения про-

изведены в модели представления алгоритмических конструкций и модели представления информационных запросов конечных пользователей [7].

Обновленная программная технология апробируется на задачах оперативного обнаружения природных лесных пожаров, в рамках которой реализуются функции получения данных Арктика-М, фильтрация облачности с построением маски, нахождение термоточек, построение карты динамики развития пожаров.

В рассмотренном программном решении реализовано безусловное ветвление процесса и предполагается, что каждая ветка обязательно выполнит свою последовательность действий. Данное решение удовлетворяет существующим на сегодняшний день потребностям. Однако в перспективе предполагается реализация условного ветвления и возможности заикливания как всего алгоритма, так и его частей, что значительно расширит возможности управления процессами обработки данных в контексте задач мониторинга.

Отметим также, что разработанная технология в отличие от аналогичных [8-10] реализует клиент-серверную архитектуру и предоставляет кроссплатформенный интерфейс моделирования процессов, основанный на web-технологиях.

Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках проекта «Цифровая импортозамещающая технология обнаружения лесных пожаров на основе использования уникальной российской спутниковой группировки Арктика-М с последующей интеграцией с системой ИСДМ-Рослесхоз» № 2023031409613.

Список источников

1. Arrangement of control over operation of the distributed remote sensing information system of RosLesKhoz / A. A. Matveev, A. S. Mamaev, A. A. Proshin, E. V. Flitman // Modern issues of the Earth Remote Sensing from space. Moscow, 2009. V. 6, No 2. P. 535–541.
2. Peculiarities of arrangement of monitoring and control of the distributed RS systems / I. V. Balashov, V. Yu. Efremov, A. A. Mazurov Junior, A. S. Mamaev et al. // Modern issues of the Earth Remote Sensing from space. Moscow, 2011. V. 8, No 3. P. 161–166.
3. Creation of tools for remote processing of the satellite data in the modern information systems / A. V. Kashnitski, I. V. Balashov, E. A. Lupyan, V. A. Tolpin et al. // Modern issues of the Earth Remote Sensing from space. Moscow, 2015. V. 12. No 1. P. 156–170.
4. Многоцелевая автоматизированная система космического агромониторинга ИКИТ СФУ – состояние и перспективы / R. V. Brezhnev, Yu. A. Maglinets, K. V. Raevich, G. M. Tsybulsky // Materials of the 15th All-Russian open conference “Modern problems of remote sensing of the Earth from Space” – 2017.
5. Брежнев Р. В. Технология графического построения процессов обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / Р. В. Брежнев, А. А. Первалова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы V Междунар. науч. конф., Красноярск, 11–14 сентября 2018 г. / Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. С. 40–43.
6. Brezhnev R. V. An Interactive Environment for Modeling the Processes of ERS Data Processing and Analysis / R. V. Brezhnev, Y. A. Maglinets, K. V. Raevich // CEUR Workshop Proceedings, 2020. P. 61–67.

7. Brezhnev R. V. Interface Model for Spatial Objects Monitoring Task Setting / R. V. Brezhnev, Yu. A. Maglinets, A. V. Kornilaeva, E. A. Maltsev.
8. Lobzenyov V. N. Complete cycle of ERS data processing in IMC software package // Publications of the International Conference “From Image to Map: Digital Photogrammetric Technologies”. Hainan, China, 2014. P. 13–19.
9. Michael Foumelis, Jose Manuel Delgado Blasco, Yves-Louis Desnos and other ESA SNAP – StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry // IGARSS. 2018. P. 1 364–1 367.

R. V. Brezhnev, I. E. Fedorov,
Yu. A. Maglinets, K. V. Raevich, E. I. Gerasimova
Institute of Space and Information Technology SFU, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: brejnev.ruslan@gmail.com, ilya.fedorov.00700@gmail.com, maglinets@mail.ru,
ksenia_248@mail.ru, ket_gerakl@mail.ru

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR INTERACTIVE FORMATION OF ERS DATA PROCESSING AND ANALYSIS PROCESSES

Abstract. A software system for interactive simulation of remote sensing data processing and analysis processes are described in the article. A separate process is an ordered set, the elements are calls to data processing software modules. A process is associated with an applied task solved by the user of the system, usually set in a highly specialized context. The system provides a set of visual tools for building data processing processes. The target audience of system users includes specialists in the field of remote sensing and geoinformatics who solve various applied and scientific problems, the main or intermediate results of which are geospatial data presented in raster and vector formats. The paper considers a modification of the system, which, unlike the previous version, allows multiple separation of data processing flows. The system has been tested on the tasks of remote sensing data analysis Sentinel-2, Landsat-8, 9, Arktika-M in the tasks of agromonitoring and detection of forest natural fires.

Keywords: Earth remote sensing, workflow, satellite data processing, processes modeling, an interactive modeling environment, data process algorithm, end user, parallel processes

С. А. Бронов¹, В. В. Калитина¹, В. Е. Чайковский¹, Д. Г. Чайковская²

¹ Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия;

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;

e-mail: nul-sapr@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Предложены новые принципы моделирования динамических объектов для автоматизированного проектирования исполнительных устройств, в том числе, космических спутников для дистанционного зондирования Земли. Предусмотрена возможность изменения структуры модели исследуемого объекта в процессе счёта с переходом от более сложных моделей к более простым (для уменьшения времени счёта) и обратно (для повышения точности). Рассмотрены общие принципы преобразования исходной математической модели путём разделения её на подсистемы с соответствующими дифференциальными уравнениями. При смене модели общее число переменных состояния остаётся неизменным. Но часть из них рассчитывается методами численного интегрирования, а часть задаётся в виде постоянных коэффициентов.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, исполнительные устройства, моделирование

Аппаратура космических спутников для дистанционного зондирования Земли содержит исполнительные устройства (ИУ) для перемещения регистрирующих устройств. Это могут быть электроприводы вращательного или поступательного движения. Для повышения качества снимков Земли к таким ИУ предъявляются повышенные требования по скорости и точности наведения, а также плавности перемещения.

В процессе проектирования ИУ КА ДЗЗ приходится их моделировать [1], чтобы убедиться в достижении требуемых параметров [2].

Высокие требования к техническим характеристикам приводят к тому, что используемые модели ИУ должны быть как можно более детализированными и учитывать даже мелкие процессы в электрических и механических частях ИУ. Но это существенно увеличивает время моделирования, особенно в системах управления ИУ с обратными связями.

В то же время внимательное рассмотрение вычислительного процесса показывает, что такие детализированные модели нужны не в продолжении всего процесса моделирования, а только в момент достижения заданных значений скорости или угла поворота (в зависимости от типа исследуемого ИО). Как правило, отработка целеуказания состоит из трёх фаз: разгон, движение с постоянной скоростью и доводка до заданного значения регулируемой величины. Высокая точность нужна только на третьей

фазе. Но и в этом случае существуют условия, когда высокая детализация модели не нужна, например, при плавном движении.

Предлагается учитывать режим работы и менять структуру модели объекта исследования, уменьшая или увеличивая её сложность.

В рассматриваемом случае математические модели представляют собой системы дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(t; x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_m; a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,k}); \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(t; x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_m; a_{2,1}, a_{2,2}, \dots, a_{2,k}); \\ &\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(t; x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_m; a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,k}), \end{aligned} \right\}$$

где x – переменные состояния, u – внешние воздействия, a – параметры соответствующего уравнения.

В матричной форме записи:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{f}(t, \bar{x}, \bar{u}, A), \quad (1)$$

где A – массив параметров.

Каждому дифференциальному уравнению соответствует постоянная времени, которая определяется его параметрами. Эти постоянные времени, как правило, существенно различаются по величине. Часто их можно разделить на несколько групп: большие по величине постоянные времени характеризуют медленные и плавно меняющиеся процессы, малые постоянные времени – быстро меняющиеся процессы.

Поэтому можно выделить несколько подсистем для дифференциальных уравнений в соответствии с их постоянными времени:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}^1}{dt} &= \bar{f}^1(t, \bar{x}^1, \bar{u}^1, A^1); \\ \frac{d\bar{x}^2}{dt} &= \bar{f}^2(t, \bar{x}^2, \bar{u}^2, A^2); \\ &\dots \\ \frac{d\bar{x}^k}{dt} &= \bar{f}^k(t, \bar{x}^k, \bar{u}^k, A^k), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где верхний индекс соответствует номеру выделенной подсистемы.

Если удаётся разделить систему (1) на подсистемы (2), то в процессе моделирования можно подключать или отключать соответствующие подсистемы, переходя к большему или меньшему числу переменных и тем самым увеличивая или уменьшая время счёта. Это возможно, в частности, если исследуемый объект представляет собой комплекс отдельных устройств с соответствующими автономными моделями.

Для определения моментов переключения между моделями постоянно контролируют характер изменения внешних воздействий \bar{u} и результаты расчёта переменных состояния \bar{x} . Это позволяет выявить смену режимов работы и моменты переключения моделей.

В более сложных случаях не удаётся выполнить разделение общей модели на полностью автономные дифференциальные уравнения, так как существует взаимное влияние быстрых и медленных процессов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}^1}{dt} &= \bar{f}^1(t; \bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^k; \bar{u}^1; A^1); \\ \frac{d\bar{x}^2}{dt} &= \bar{f}^2(t; \bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^k; \bar{u}^2; A^2); \\ &\dots \\ \frac{d\bar{x}^k}{dt} &= \bar{f}^k(t; \bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^k; \bar{u}^k; A^k), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где показано смешение переменных состояния \bar{x}^i в каждом уравнении, в то время как сами уравнения остаются разделёнными.

Это имеет место тогда, когда быстрые и медленные процессы сочетаются в модели одного устройства и их невозможно выделить в отдельные устройства. Но при этом всё равно можно выделить переменные состояния \bar{x}^i , соответствующие быстрым и медленным процессам.

В этом случае при исключении какой-либо подсистемы соответствующие ей переменные состояния должны принимать фиксированные значения. Эти значения могут быть нулевыми или какими-либо другими, определяемыми особенностями процессов, режимами работы и целями моделирования. Эти значения могут задаваться из логических соображений или рассчитываться. Тогда можно не рассчитывать дифференциальные уравнения исключаемых подсистем из общей модели, оставив соответствующие переменные состояния в других уравнениях как постоянные коэффициенты, например:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}^1}{dt} &= \bar{f}^1(t; \bar{x}^1, \bar{x}_0^2, \bar{x}^3, \bar{x}_0^4, \dots, \bar{x}_0^k; \bar{u}^1; A^1); \\ \frac{d\bar{x}^3}{dt} &= \bar{f}^2(t; \bar{x}^1, \bar{x}_0^2, \bar{x}^3, \bar{x}_0^4, \dots, \bar{x}_0^k; \bar{u}^2; A^2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где из всех подсистем в модели оставлены только подсистемы 1 и 3. Остальные подсистемы исключены, а их переменные состояния представлены в виде постоянных коэффициентов (нижний индекс 0).

Здесь важно, чтобы в момент перехода от одной модели к другой и изменении состава переменных состояния они все (в данном случае k) оставались в процессе счёта. В одних случаях этот счёт будет сложным с использованием методов численного интегрирования, а в других становится более простым и заключается в подстановке их в качестве постоянных коэффициентов.

Заключение. Организация процесса моделирования с изменением структуры модели обеспечивают повышение точности при одновременном уменьшении времени счёта, что важно при исследовании сложных объектов с многочисленными подсистемами.

Список источников

1. Ковалев И. В., Титовская Н. В., Титовский С. Н. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве // Проблемы современной аграрной науки. Материалы международной научной конференции. КГАУ, 2019. С. 200–204.

2. Титовский С. Н., Титовская Н. В. Методы обучения программированию в вузе // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции. КГАУ, 2015. С. 144–146.

S. A. Bronov¹, V. V. Kalitina¹, V. E. Chaykovsky¹, D. G. Chaykovskaya²

¹ Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

² Graduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: nul-sapr@mail.ru

SPECIFICITY OF MODELING OF ACTUATORS OF SPACE SATELLITE EQUIPMENT FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

Abstract. New principles of modeling dynamic objects for computer-aided design of actuators, including space satellites for remote sensing of the Earth, are proposed. It is possible to change the structure of the model of the object under study in the process of counting with the transition from more complex models to simpler ones (to reduce the counting time) and vice versa (to increase accuracy). The general principles of transformation of the original mathematical model by dividing it into subsystems with corresponding differential equations are considered. When the model changes, the total number of state variables remains the same. But some of them are calculated by numerical integration methods, and some are given in the form of constant coefficients.

Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, actuators, simulation

С. А. Бронов, В. В. Калитина, А. А. Чумаченко, М. Е. Вайман
Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
e-mail: nul-sapr@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Рассмотрены принципы управления исполнительными устройствами космических аппаратов на основе использования индукторных двигателей двойного питания (ИДДП) с частотным, амплитудным и фазовым управлением. Приведена математическая модель ИДДП и результаты расчёта его характеристик по этой модели. Показано, что управление с помощью изменения частот питающих напряжений обеспечивает регулирование скорости, а управление с изменения регулируемых фазовых сдвигов питающих напряжений — регулирование угла поворота ротора. Управление изменением амплитуд питающих напряжений позволяет улучшить переходные характеристики при частотном и фазовом управлении. При фазовом управлении ИДДП приобретает свойства шагового двигателя и может использоваться для регулирования угла поворота ротора без датчика обратной связи по углу поворота.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, электропривод, система управления

Введение. Космические аппараты (КА) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) содержат исполнительные устройства для перемещения рабочих инструментов различного функционального назначения, в частности, выполняющих съёмку поверхности Земли [1].

К таким исполнительным устройствам предъявляются повышенные требования по точности и плавности движения. Они должны обеспечивать точность позиционирования с наведением на заданную точку Земной поверхности, а с другой стороны — плавное движение регистрирующего инструмента вслед за перемещением наблюдаемого участка поверхности из-за движения КА по орбите.

Поэтому исполнительные устройства должны обеспечивать низкие и сверхнизкие скорости движения. Для них обычно используют синхронные двигатели с постоянными магнитами и механические редукторы с большими коэффициентами передачи. Наличие механических передач снижает надёжность систем в целом и может быть источником дополнительных пульсаций скорости из-за износа механических элементов.

Предлагается рассмотреть возможность использования для этих целей специальных электродвигателей двойного питания (ИДДП) [2].

ИДДП относятся к классу индукторных двигателей переменного тока, у которых статор и ротор набираются из стальных пластин с явно

выраженными зубцами, создающими зубцовый воздушный зазор. При этом ротор выполняется без обмоток, а на статоре располагаются две многофазные обмотки, которые запитываются двумя многофазными системами напряжений переменного тока, создающими каждая своё вращающееся электромагнитное поле. Выбор чередования фаз такой, что поля вращаются навстречу друг другу в общем пространстве ИДДП, и образуется единое поле с разностной частотой, в результате угловая скорость ротора:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{Z_r},$$

где ω_1, ω_2 – угловые частоты питания первой и второй обмоток, Z_r – число зубцов ротора (зависящее от числа зубцов статора по определённой формуле).

В соответствии с этим основной способ управления ИДДП – частотный, с помощью изменения угловых частот питающих напряжений. Также имеются способы управления амплитудный (путём изменения амплитуд обоих питающих напряжений U_{1m} и U_{2m}), а также фазовый (путём изменения текущих фазовых сдвигов ε_1 и ε_2).

В результате имеется 6 основных управляющих величин: двумя частотами, двумя амплитудами и двумя фазовыми сдвигами. В реальности осуществляется комбинирование перечисленных управляющих величин и возникает большое число возможных управлений. При этом оказывается, что одни и те же значения угловой скорости и угла поворота можно получить несколькими способами, т. е. имеется избыточность возможностей управления ИДДП. За счёт этой избыточности можно удовлетворять дополнительные условия, возникающие при проектировании.

Для исследования этих базовых способов управления была разработана математическая модель двухфазного ИДДП, которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d\bar{\psi}}{dt} = -\mathbf{R}\bar{i} + \bar{u}; \\ \bar{\psi} = \mathbf{L}\bar{i}; \\ M = \frac{1}{2}\bar{i}^T \frac{d\mathbf{L}}{d\theta_r} \bar{i}, \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M + M_s}{J}; \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r, \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2, \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} u_{1a} = U_{1m} \cos(\theta_1 + \varepsilon_1); \\ u_{1b} = U_{1m} \cos(\theta_1 + \varepsilon_1 - 90^\circ); \\ u_{2a} = U_{2m} \cos(\theta_2 + \varepsilon_2); \\ u_{2b} = U_{2m} \cos(\theta_2 + \varepsilon_2 - 90^\circ), \end{array} \right\}$$

где \mathbf{R}, \mathbf{L} – матрицы сопротивлений и индуктивностей обмоток; $\bar{u}, \bar{i}, \bar{\psi}$ – векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмоток; θ_r – угол поворота ротора; M – электромагнитный момент; U_{1m}, U_{2m} – амплитуды напря-

жений; θ_1 и θ_2 – текущие фазовые сдвиги напряжений; ε_1 и ε_2 – регулируемые фазовые сдвиги напряжений.

На рис. 1 показаны процессы при одновременном изменении частот ω_1 , ω_2 и амплитуд питающих напряжений. Видно, что угловая скорость имеет некоторую колебательность. Эта колебательность тем меньше, чем больше амплитуды питающих напряжений.

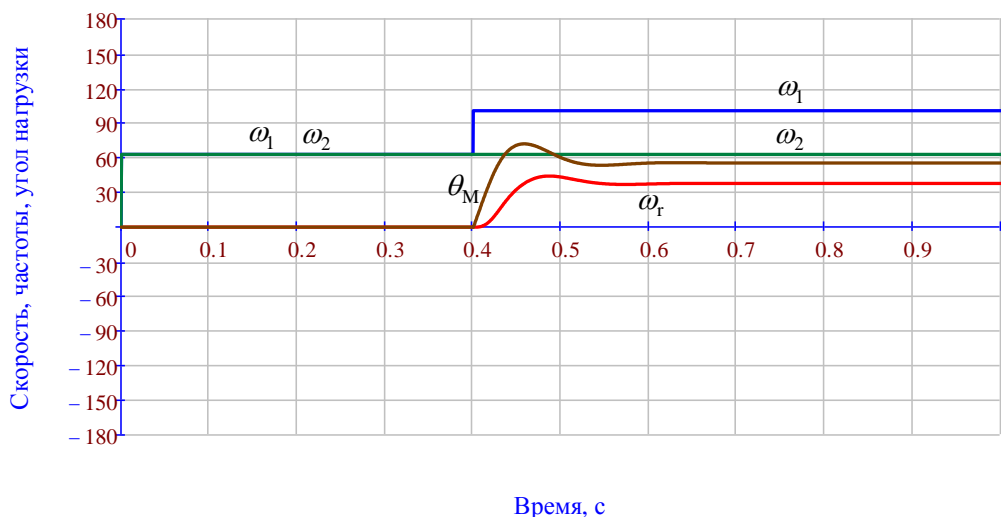


Рис. 1. Процессы в ИДДП при частотном управлении

На рис. 2 показаны процессы при изменении регулируемых фазовых сдвигов ε_1 и ε_2 .

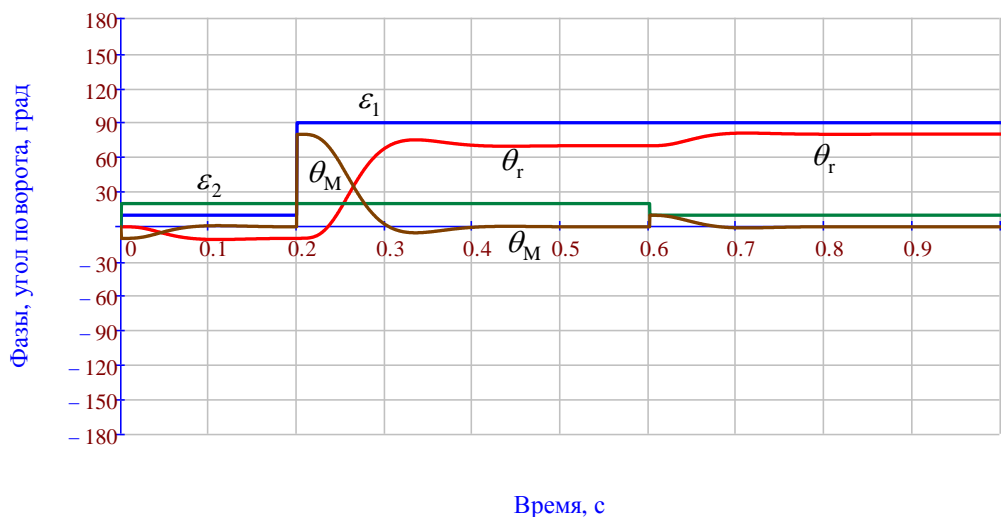


Рис. 2. Процессы в ИДДП при фазовом управлении

Частоты питания в данном случае одинаковые. Это приводит к тому, что ротор двигателя находится в неподвижном начальном состоянии. В момент времени 0,2 с задается увеличение фазового сдвига ε_1 и ротор поворачивается на соответствующий угол θ_r . В момент времени 0,6 с зада-

ётся уменьшение регулируемого фазового сдвига ε_2 . Видно, что угол поворота ротора дополнительно увеличивается.

В данном случае демонстрируется одно из достоинств ИДЦП – возможность регулирования угла поворота без использования датчика угла по некоторой аналогии с шаговым двигателем. Это позволяет упростить конструкцию и систему управления исполнительным устройством.

Заключение. Рассмотренные возможности построения исполнительных устройств позволяет расширить функциональные возможности и улучшить технические характеристики приборов КА для ДЗЗ.

Список источников

1. Ковалев И. В., Титовская Н. В., Титовский С. Н. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве // Проблемы современной аграрной науки. Материалы международной научной конференции. КГАУ, 2019. С. 200–204.

2. Бронов С. А., Авласко П. В., Поваляев В. А., Непомнящий О. В., Ефимов А. В. Программный модуль автоматизированного комплекса для исследования индукторных электроприводов двойного питания // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 12. С. 1–5.

S. A. Bronov, V. V. Kalitina, A. A. Chumachenko, M. E. Vajman

Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: nul-sapr@mail.ru

CONTROL OF SPACECRAFT ACTUATORS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

Abstract. The principles of control of spacecraft actuators based on the use of dual-power inductor motors (IDDP) with frequency, amplitude and phase control are considered. The mathematical model of IDDP and the results of calculating its characteristics according to this model are given. It is shown that control by changing the frequencies of the supply voltages provides speed regulation, and control by changing the adjustable phase shifts of the supply voltages provides control of the rotor rotation angle. Controlling the change in the amplitudes of the supply voltages allows you to improve the transient characteristics in frequency and phase control. With phase control, the IDDP acquires the properties of a stepper motor and can be used to adjust the angle of rotation of the rotor without a rotation angle feedback sensor.

Keywords: spacecraft, Earth remote sensing, electric drive, control system

В. В. Вечерков, Е. А. Дунаева, Я. А. Филина

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия
e-mail: v.valenteev11@yandex.ru, water_crimea@hotmail.com, mrs.filina@gmail.com

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЗЗ И БВС ДЛЯ ОЦЕНКИ ВНУТРИПОЛЕВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Аннотация. В работе представлены результаты дистанционной оценки внутриполевой неоднородности посевов в степной и предгорной зонах Республики Крым с использованием БВС DJI Phantom 4 Pro+ V 2.0 и сервиса «ВЕГА-Science» (<http://sci-vega.ru/>). Работы проводились в период с мая по июль 2022 г. в степном и предгорном районах Крыма. Выявлена, внутриполевая неоднородность посевов озимых (пшеница) и яровых (ячмень, подсолнечник, горчица, рапс) культур как по данным БВС, так и данным ДЗЗ, и отличие средних значений NDVI.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, сервис «ВЕГА-Science», посев, NDVI

Введение. Использование беспилотного воздушного судна (БВС) является актуальным и эффективным инструментом получения независимой информации о состоянии посевов. Периодическая аэрофотосъемка с БВС сельскохозяйственных угодий и получение на ее основе индекса NDVI позволяет своевременно выявлять проблемные участки в посевах и принимать меры по их устранению. Ранее выполнялись работы [1–4] по исследованию возможности использования БВС для идентификации состояния посевов сельскохозяйственных культур, которые показали перспективность данного направления.

Целью данного исследования является оценка внутриполевой неоднородности посевов с использованием БВС и данных ДЗЗ.

Материалы и методы. Дистанционный мониторинг посевов проводился с мая по июль 2022 г. на разных этапах роста сельскохозяйственных растений на полях ФГБУН «НИИСХ Крыма» в Клепининском с/п Красногвардейского района (пшеница, ячмень, горчица, подсолнечник) и Крымскорозовском с/п Белогорского района (рапс). Съемки проводились на встроенную 20-мегапиксельную камеру беспилотника DJI Phantom 4 Pro+ V 2.0 на высоте 120 м над поверхностью земли и затем увязывались со спутниковыми данными Sentinel-2B. Средние значения NDVI получены по данным сервиса «ВЕГА-Science» [5]. Прогнозная урожайность определена по уравнениям связи NDVI и урожайности (данные ФГБУН «НИИСХ Крыма»).

Результаты. Съемка поля под озимой пшеницей в Клепининском сельском поселении проводилась дважды – на стадии колошения и молочно-восковой спелости 12 и 27 мая (19-я и 21-я недели соответственно). Результаты съемки приведены на рис. 1 и 2.

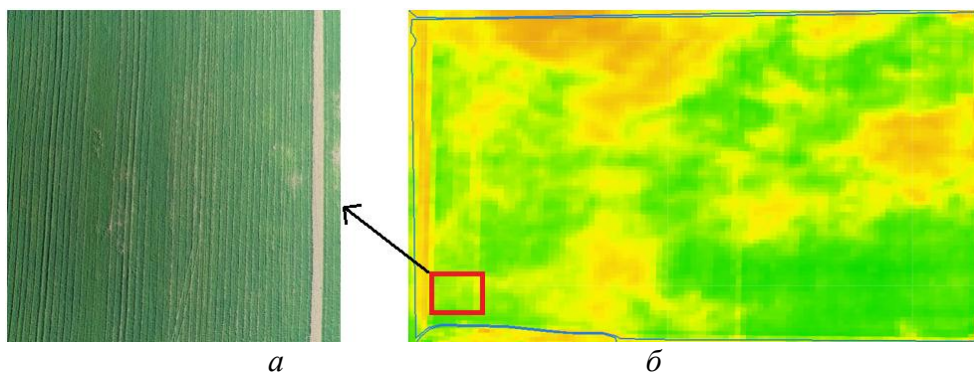


Рис. 1. Съемка поля озимой пшеницы БВС 12 мая (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 16 мая (б) 2022 г.

На поле наблюдались неравномерность роста сельскохозяйственных растений, точечные проплешины. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,66, по полю – 0,74.

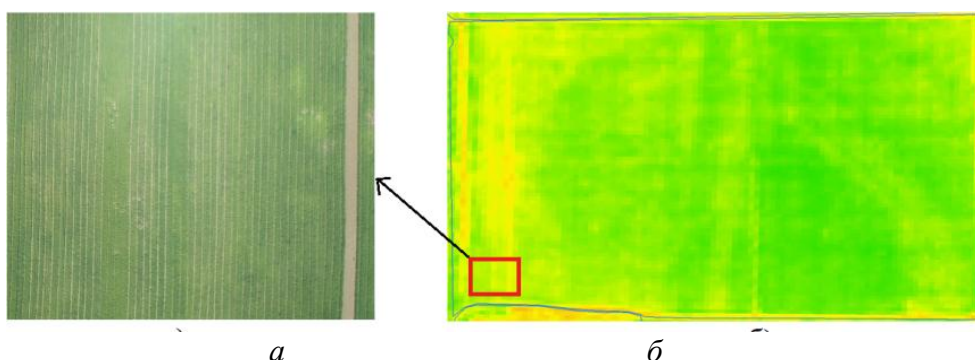


Рис. 2. Съемка поля озимой пшеницы БВС 27 мая (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 5 июня (б) 2022 г.

Проведение дистанционного мониторинга на этом же поле спустя 2 недели показало, что посев стал более равномерным, при этом определенные ранее проплешины на поле остались. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,61, по полю – 0,81. Прогнозная урожайность составила 33,4 ц/га, фактическая – 33,3 ц/га.

Съемка поля ярового ячменя проводилась 27 мая (21-я неделя). Растения находились на стадии кущения (см. рис. 3).

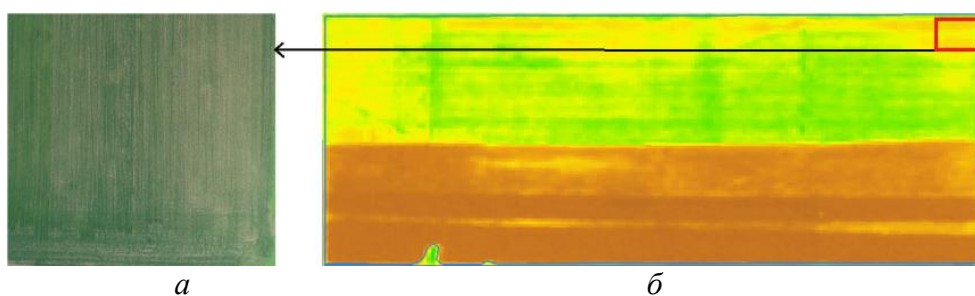


Рис. 3. Съемка поля ярового ячменя БВС 27 мая (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 5 июня (б) 2022 г.

На данном этапе роста листья ярового ячменя не перекрывают междурядья, вследствие чего с воздуха еще заметна почва на поле. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,48, по полю – 0,64. Прогнозная урожайность составила 20,9 ц/га, фактическая – 27,4 ц/га.

Также, 27 мая проводилась съемка поля горчицы, находившейся в фазе цветения (см. рис. 4).

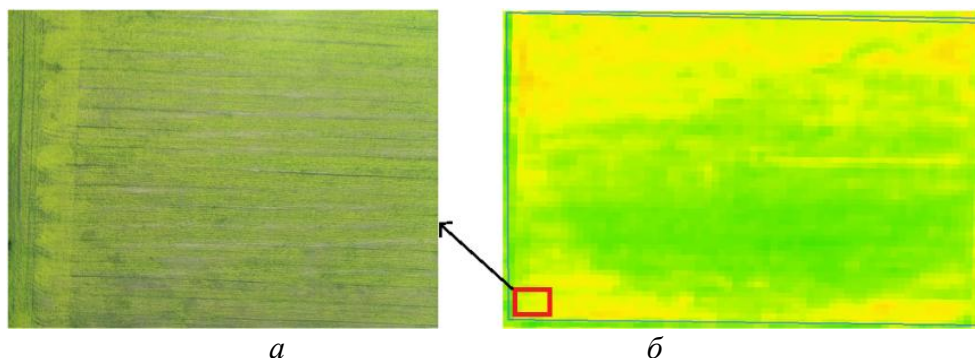


Рис.4. Съемка поля горчицы БВС 27 мая (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 5 июня (б) 2022 г.

На поле отчетливо наблюдались полосы без растений, которые служили маркерами при производстве посева культуры. Также, наблюдались локальные проплешины. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,55, по полю – 0,77. Фактическая урожайность 6,7 ц/га.

Съемка поля подсолнечника в фазе цветения (см. рис.5) проводилась 14 июля (28-я неделя).

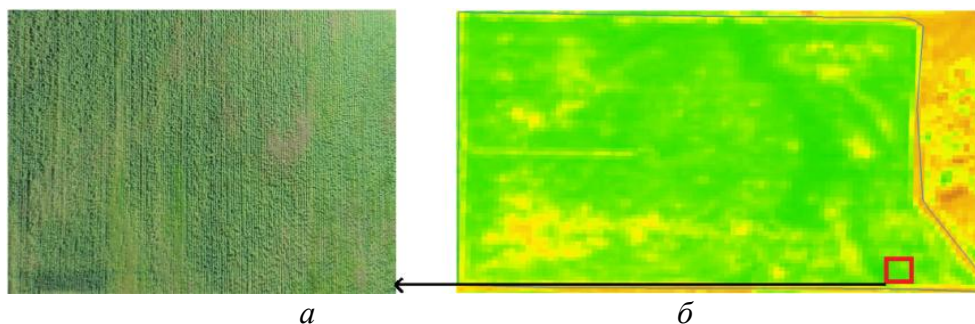


Рис. 5. Съемка поля подсолнечника БВС 14 июля (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 15 июля (б) 2022 г.

На поле наблюдалась неравномерность роста подсолнечника: более высокие и крупные растения находились по краю поля, также, наблюдались большие проплешины по полю. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,69, по полю – 0,74. Прогнозная урожайность составила 13,6 ц/га, фактическая – 11,0 ц/га.

Съемка в Крымскорозовском сельском поселении проводилась 3 июня (22-я неделя). Рапоропша находились в фазе стеблевания (см. рис. 6).

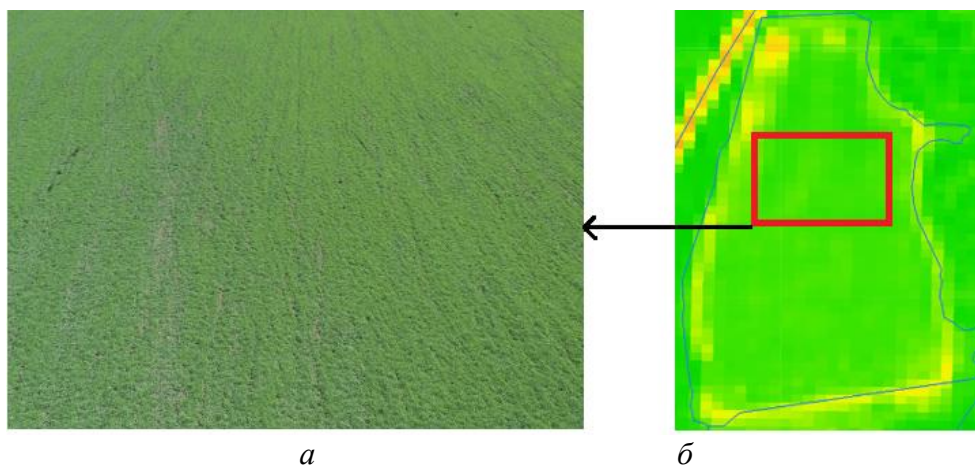


Рис. 6. Съемка поля рапсоропши БВС 3 июня (а) и спутниковые данные Sentinel-2В по состоянию на 5 июня (б) 2022 г.

На момент съемки рост и развитие рапсоропши были равномерными по всему полю, без каких-либо отклонений. Среднее значение NDVI в заданном квадрате составило 0,73, по полю – 0,67.

Выводы. Результаты исследований показали перспективы совместного использования данных БВС и ДЗЗ для идентификации внутрислолевой неоднородности и для анализа отклонения урожайности участков от среднего значения по полю. Приведенные результаты и элементы методологии могут быть использованы в технологиях точного земледелия для минимизации потерь урожая.

Список источников

1. Дунаева Е. А., Головастова Е. С., Вечерков В. В., Попович В. В. Совместное использование беспилотных летательных аппаратов и дистанционного зондирования Земли для оценки биопродуктивности посевов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы V Международной научной конференции. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2018. С. 302–306.
2. Дунаева Е. А., Головастова Е. С., Вечерков В. В. Мониторинг сельскохозяйственных земель с использованием аэрофотосъемки // Тенденции, направления и перспективы развития экономических отношений в современных условиях хозяйствования. Материалы III межрегиональной с международным участием научно-практической конференции. 2018. С. 305–308.
3. Вечерков В. В., Дунаева Е. А. Исследование возможности использования БПЛА для идентификации состояния посевов сельскохозяйственных культур // Агрехимическое обеспечение цифрового земледелия. Материалы Международной научной конференции. 2019. С. 16–21.
4. Вечерков В. В., Филина Я. А., Дунаева Е. А. Оценка состояния посевов с использованием беспилотного воздушного судна и данных дистанционного зондирования земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VIII Международной научной конференции. Красноярск, 2021. С. 13–16.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашницкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа

V. V. Veчерkov, Ie. A. Dunaieva, Ya. A. Filina

Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

e-mail: v.valenteen11@yandex.ru, water_crimea@hotmail.com, mrs.filina@gmail.com

JOINT USE OF ERS AND BVS FOR EVALUATION OF INTRA-FIELD INHOMOGENEITY

Abstract. The paper presents the results of a remote assessment of intra-field heterogeneity of crops in the steppe and foothill zones of the Republic of Crimea using the DJI Phantom 4 Pro + V 2.0 and the VEGA-Science service (<http://sci-vega.ru/>). The work was carried out from May to July 2022 in the steppe and foothill regions of Crimea. It is noted that intra-field heterogeneity of crops of winter (wheat) and spring (barley, sunflower, mustard, milk thistle) crops, both according to the BVS and remote sensing data, and the difference in the average values of NDVI.

Keywords: remote monitoring, “VEGA-Science”, NDVI, crops

А. А. Гостева¹, Н. А. Баженова²

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, atlas3101@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ В GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЛОБАЛЬНЫМ СОСТОЯНИЕМ АТМОСФЕРЫ

Аннотация. Данная научная статья посвящена разработке веб-приложения на основе Google Earth Engine для мониторинга глобальных состояний атмосферы. Цель работы – создание удобного инструмента посредством облачных технологий для ученых, предприятий и общественности для отслеживания пылевых облаков, влияния лесных пожаров и вулканической активности на атмосферу, антропогенного влияния на климат. Методология работы включает использование спутниковых данных Sentinel-5P TROPOMI и методов API Google Earth Engine для доступа к геопространственным данным и анализу данных. Результаты работы могут быть применены в научных исследованиях, промышленности и информационных службах для мониторинга и анализа глобальных состояний атмосферы. Работа предоставляет новые возможности для изучения атмосферных явлений и обеспечения информированных решений.

Ключевые слова: веб-приложение, облачные технологии, PaaS, Google Earth Engine, Sentinel-5P TROPOMI

Введение. Атмосфера Земли является ключевым компонентом, обеспечивающим поддержание жизни на планете. В связи с ростом сложности атмосферных систем возрастает потребность в инструментах, способных наблюдать и анализировать состояние атмосферы в глобальном масштабе. Несмотря на существующие приложения, предоставляющие данные о состоянии атмосферы, большинство из них ограничено обобщенными индексами, что затрудняет получение полной картины загрязнений и динамики их изменения.

Цель данной работы заключается в разработке приложения на основе Google Earth Engine для наблюдения и анализа глобальных состояний атмосферы. В работе предлагается использование возможностей Google Earth Engine, облачной платформы для анализа геопространственных данных, с целью предоставления всестороннего представления об атмосферных условиях по всему миру. Основное внимание уделяется созданию удобного пользовательского интерфейса и интеграции различных источников данных для создания точной и актуальной картины глобальной атмосферы.

Разрабатываемое приложение будет способствовать более качественным исследованиям, помогать предприятиям контролировать воздействие своей деятельности и предоставлять пользователю информацию о глобальных состояниях атмосферы.

Облачная платформа Google Earth Engine. Google Earth Engine (GEE) – это облачная платформа, разработанная Google для работы с геопространственными данными и анализа окружающей среды [1]. GEE предоставляет доступ к огромному объему общедоступных геоданных и инструментарию для их обработки и анализа. Веб-приложения, разработанные на базе GEE, относятся к платформе как сервису (PaaS), предоставляя разработчикам среду для создания и развертывания геопространственных приложений, основанных на облачных вычислениях [2].

Веб-приложения на базе GEE предлагают преимущества в масштабируемости, доступе к богатым геоданным, удобстве разработки, гибкости и адаптивности, облачной инфраструктуре и сотрудничестве, что обеспечивает эффективный анализ и исследования в области геопространственных данных.

Спутник Sentinel-5P TROPOMI. Источником геоданных для веб-приложения является спутник Sentinel-5P TROPOMI [3]. Спутник обладает следующими основными преимуществами: высокое пространственное разрешение до $7 \times 3,5$ км², высокая чувствительность и широкий спектр измеряемых газов.

Он предоставляет полные и актуальные наборы геоданных, включающие информацию о содержании различных атмосферных газов, включая загрязнения, такие как диоксид азота, озон, формальдегид, монооксид углерода, метан и диоксид серы. Эти данные обеспечивают важную информацию для мониторинга качества воздуха, изучения климатических изменений и оценки антропогенного влияния на атмосферу.

Реализация веб-приложения. Веб-приложение было разработано в интегрированной среде разработки (IDE) Code Editor в GEE посредством языка JavaScript [4]. Данная IDE позволяет интегрироваться с обширной библиотекой геопространственных данных платформы и в кратчайшие сроки подключаться к методам API GEE [5].

Данное веб-приложение реализует такие функциональные требования как:

- обработка введенных значений: промежуток времени, элементзагрязнения, точка на карте;
- подготовка данных;
- построение графиков загрязнений;
- построение анимации загрязнений за выбранный пользователем временной промежуток;
- экспорт графиков на устройство.

Стартовый интерфейс приложения позволяет пользователю выбрать временной промежуток и элемент загрязнения, по которым будут строиться графики, анимация и карта загрязнения (рис. 1).

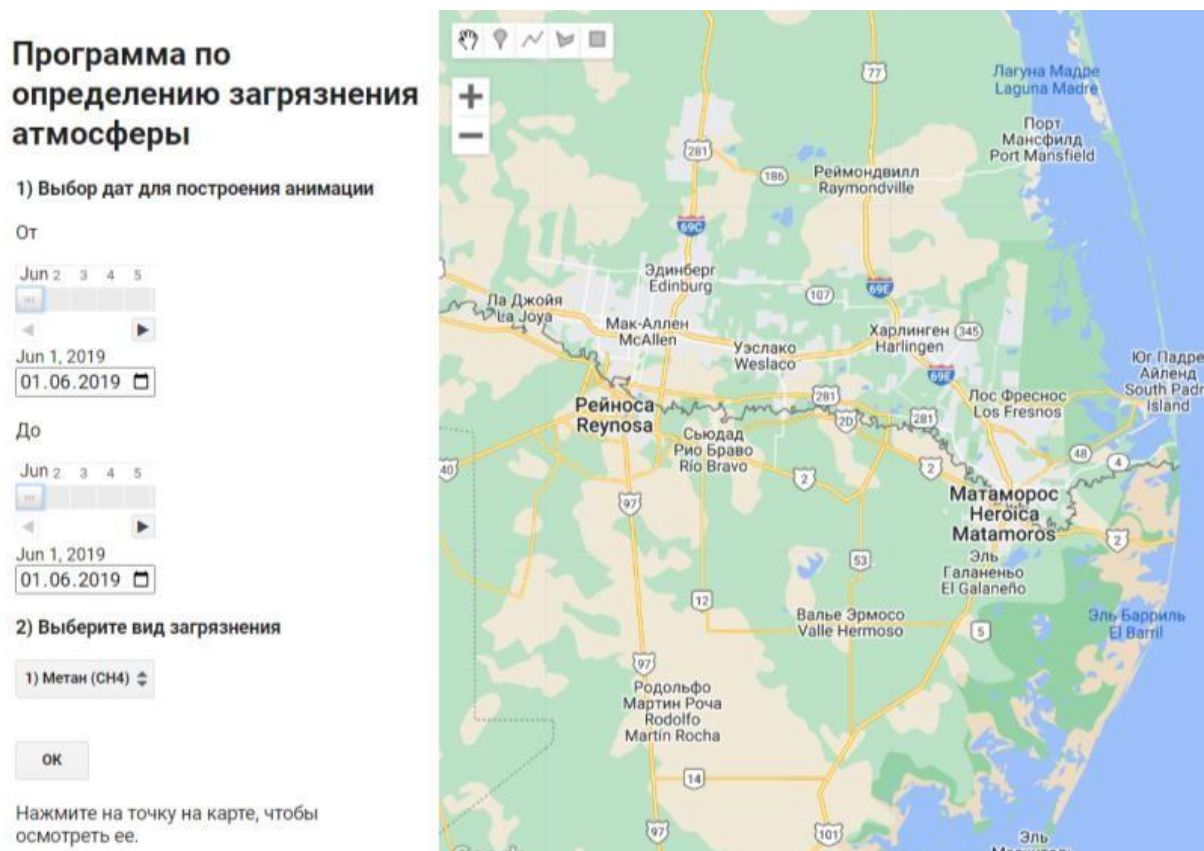


Рис. 1. Стартовая страница веб-интерфейса

После запуска приложения происходит подготовка данных, которая осуществляется посредством фильтрации коллекции снимков по параметрам, которые были введены пользователем. Подключение коллекции снимков происходит из каталога данных Google Earth Engine [6]. Окно приложения обновляется (рис. 2).

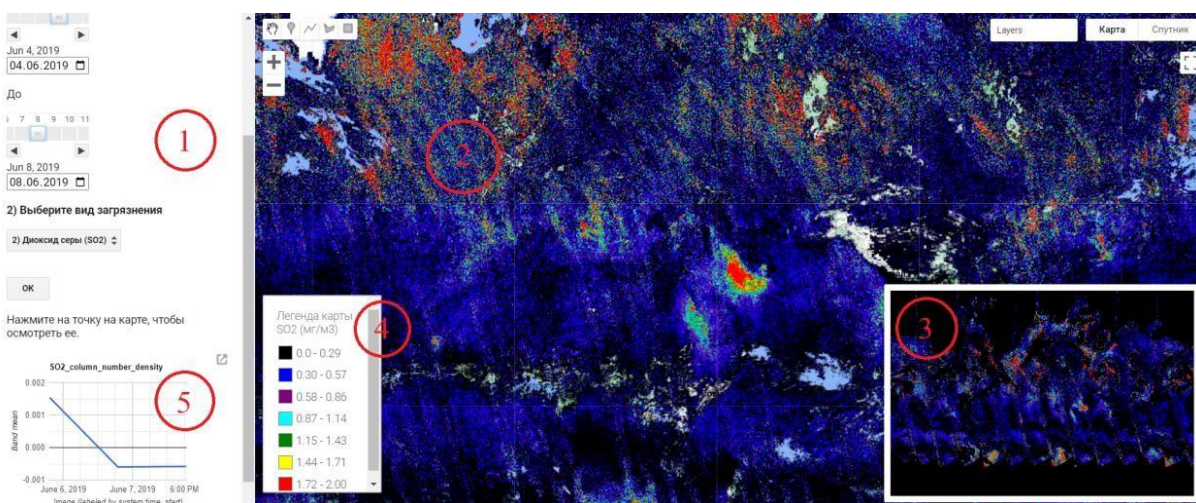


Рис. 2. Интерфейс работы приложения

В окне неизменными остаются виджеты календаря, отвечающие за промежуток времени и выбранный элемент загрязнения (рис. 2.1), а также образуются карта загрязнений (рис. 2.2), анимация (рис. 2.3), легенда карты (рис. 2.4) и график элемента загрязнения (рис. 2.5), которые были реализованы посредством API GEE.

Заключение. Использование облачной платформы Google Earth Engine с данными спутника Sentinel-5P TROPOMI предоставляет уникальные возможности для анализа атмосферных данных. Приложение на основе этих данных имеет потенциал в области мониторинга загрязнения воздуха, климатических изменений и антропогенного влияния на атмосферу. Это способствует более глубокому пониманию и принятию информированных решений в области охраны окружающей среды.

Список источников

1. Google Earth Engine // официальный сайт. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения 10.07.2023).
2. What is Platform as a Server (PaaS)? // сайт. URL: <https://cloud.google.com/learn/what-is-paas> (дата обращения 10.07.2023).
3. Sentinel-5P TROPOMI User Guide // официальный сайт. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi> (дата обращения 10.07.2023).
4. JavaScript // официальный сайт. URL: <https://www.javascript.com/> (дата обращения 14.07.2023).
5. API Reference // официальный сайт. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs> (дата обращения 14.07.2023).
6. Earth Engine Data Catalog Sentinel-5P // сайт. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p> (дата обращения 14.07.2023).

A. A. Gosteva¹, N. A. Bazhenova²

¹ Federal Research Center, “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, atlas3101@yandex.ru

DEVELOPING A WEB APP IN GOOGLE EARTH ENGINE FOR OBSERVING GLOBAL ATMOSPHERIC STATES

Abstract. This scientific article is devoted to the development of a web application based on the Google Earth Engine for monitoring global atmospheric conditions. The purpose of the work is to create a convenient tool through cloud technologies for scientists, businesses and the public to track dust clouds, the impact of forest fires and volcanic activity on the atmosphere, and anthropogenic impact on climate. The work methodology includes the use of Sentinel-5P TROPOMI satellite data and Google Earth Engine API methods for geospatial data access and data analysis. The results of the work can be applied in scientific research, industry and information services for monitoring and analyzing global atmospheric conditions. The work provides new opportunities for studying atmospheric phenomena and providing informed decisions.

Keywords: *web application, cloud technologies, PaaS, Google Earth Engine, Sentinel-5P TROPOMI*

Н. Н. Гулютин

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: gulyutin@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОКОЛА RTMP ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С БПЛА АЛГОРИТМАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Аннотация. Использование беспилотных летательных аппаратов в настоящее время является современным способом сбора и передачи данных в различных областях человеческой деятельностью. Особое значение имеет возможность обработки данных с дронов в режиме реального времени. Для этого в работе показано применение протокола RTMP для обеспечения передачи данных в режиме реального времени.

Ключевые слова: БПЛА, RTMP, передача данных в реальном времени, CDN

В современном научно-технологическом контексте беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся центральной фигурой инноваций в области сбора и передачи данных. Их интеграция с различными дисциплинами, такими как геодезические исследования, экологический мониторинг, и детальная фото- и видеофиксация объектов, подчеркивает их многофункциональность и возрастающую роль в современных научных исследованиях. В ряде применений, например, в задачах детектирования и трекинга объектов [1], в семантического анализа [2], то есть там, где требуется обработка данных в реальном времени, в том числе для задач обнаружения и предотвращения чрезвычайных ситуаций [3].

Для реализации оперативной передачи данных в режиме реального времени корпорацией Macromedia разработан протокол RTMP (Real-Time Messaging Protocol). Первоначальная версия этого протокола в дальнейшем усовершенствована Adobe Systems, что обеспечило особую актуальность и расширение области применения протокола RTMP. Протокол RTMP может быть использован с целью обеспечения оптимизации процессов передачи аудио, видео и дополнительных данных между сервером и клиентским узлом, что делает его крайне эффективным для использования при обработке данных алгоритмами компьютерного зрения [4]. При работе с протоколом RTMP существует ряд ограничений, таких как его зависимость от технологии Flash, потенциальные проблемы с масштабируемостью и ограниченная поддержка со стороны некоторых современных браузеров. RTMP обладает несколькими ключевыми особенностями. Существенное значение имеет низкая задержка передачи данных по этому протоколу [5], что особенно важно для приложений, где требуется мгновенная реакция на происходящие события. Кроме того, протокол

также обеспечивает высокую пропускную способность, что позволяет передавать большие объемы данных без значительной потери качества. Именно это позволяет использовать RTMP протокол для обработки данных с БПЛА.

Для обработки данных с помощью протокола RTMP необходимо выполнить следующие шаги:

1. Выбор и настройка сервера: Интеграция сервера, поддерживающего RTMP (например, Nginx с RTMP-модулем), для приема потока видеоданных с БПЛА.

2. Интеграция кодировщика на БПЛА: Установка и конфигурация кодировщика на борту БПЛА, такого как OBS Studio, для передачи видеоданных в формате RTMP.

3. Передача данных: Инициирование потока видеоданных с БПЛА на сервер через RTMP.

4. Обработка алгоритмом компьютерного зрения для решения конкретной задачи, в том числе анализ и интерпретация результатов.

5. Безопасность и оптимизация: применение мер безопасности для RTMP потока и оптимизация производительности системы на основе анализа рабочей нагрузки.

6. Отображение результатов: интеграция плеера или другого интерфейса для демонстрации результатов обработки в режиме реального времени или после завершения обработки.

Рассмотрим процесс обработки данных от БПЛА до приложения пользователя с помощью RTMP протокола (рис. 1.).

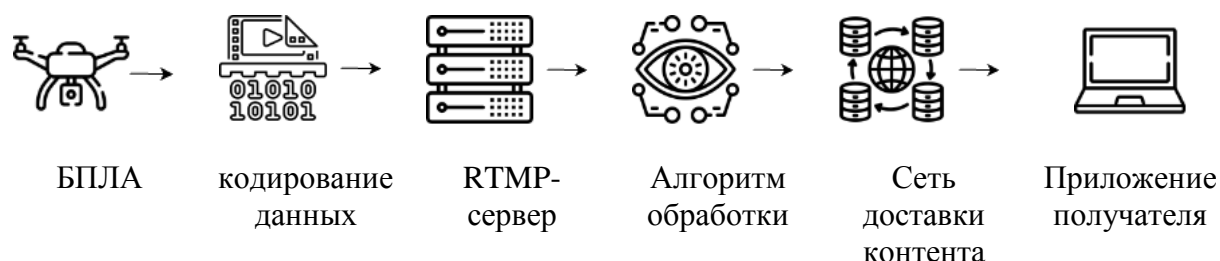


Рис 1. Схема обработки данных, получаемых с БПЛА с помощью протокола RTMP

Сбор данных с оптического сенсора БПЛА и их последующее кодирование, используя передовые стандарты, такие как H.264 для видео и AAC для аудио, является ключевым этапом в этой цепочке передачи. Благодаря такой системе кодирования достигается оптимальное соотношение сжатия и сохранения качества, что критически важно для передачи в условиях реального времени. После кодирования информационные пакеты направляются на сервер, где происходит дополнительная обработка и дистрибуция данных с использованием протокола RTMP. Серверная инфраструктура в этом процессе играет решающую роль. Алгоритмы адаптации потока, масштабирования и обработки данных могут быть интегрированы на сервере для дополнительной оптимизации передачи

данных. Сети доставки контента (CDN) представляют особый интерес, так как они существенно улучшают качество потоковой передачи, сокращая сетевые задержки [6]. Далее полученные данные поступают в алгоритм компьютерного зрения для обработки и решения конкретной задачи, затем через CDN доставляются получателю.

Обработка данных с БПЛА на основе работы протокола RTMP может применяться в различных сценариях – от охраны частной территории до масштабного мониторинга городских пространств или природных объектов. Например, при решении задачи поиска посторонних на закрытой территории актуально распознавание лиц в видеопотоке. При решении этой задачи на первом этапе выполняется обработка видеопотока с квадрокоптера DJI Mini 2, транслируемого в социальную сеть VK Видео как RTMP-сервера, с последующей передачей на локальный компьютер для детекции лиц и глаз с использованием библиотеки компьютерного зрения на языке Python. После инициализации прямой трансляции в VK Видео при наличии аккаунта и установленного приложения DJI Go на мобильном устройстве, видеопоток перенаправляется на локальную машину с использованием инструментов захвата потока, таких как Open Broadcaster Software. Затем для анализа потока использовано разработанное приложение на Python, в котором с применением библиотеки OpenCV происходит детекция лиц и глаз. Этот процесс включает в себя алгоритмы выявления характерных черт лица и областей глаз. Результаты детекции могут быть сохранены, переданы на внешние серверы или использованы в последующих исследовательских задачах. Пример обработки таких данных показан на рис. 2.

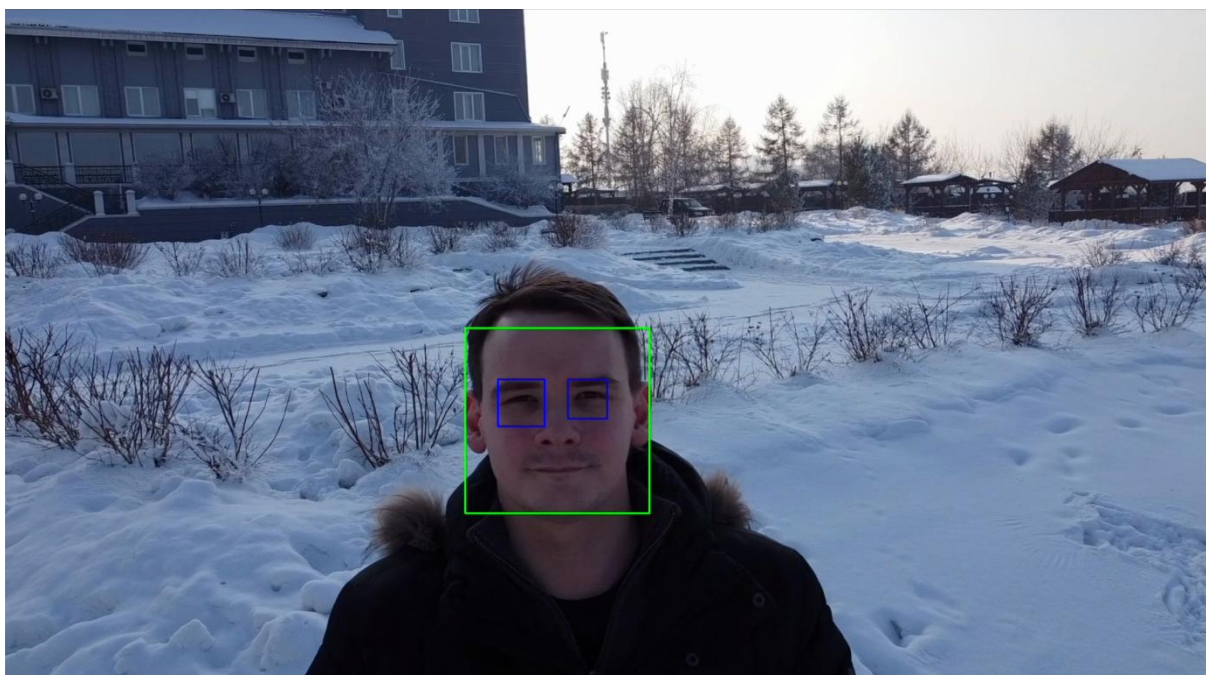


Рис. 2. Пример обработанного изображения, получаемого с БПЛА DJI Mini 2 с помощью протокола RTMP через сервис трансляции социальной сети VK Видео

Поводя итог, следует отметить, что сочетание RTMP и передовых алгоритмов компьютерного зрения в контексте использования БПЛА дает новые возможности для исследований, анализа и мониторинга объектов в режиме реального времени.

Список источников

1. Xiao C. и др. Enhancing Online UAV Multi-Object Tracking with Temporal Context and Spatial Topological Relationships // Drones. 2023. Т. 7. № 6. С. 389, DOI: 2504-446X/7/6/389.
2. Gao X. и др. UAV security situation awareness method based on semantic analysis // IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 2020, С. 272-276, DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9201954.
3. Мамбеталиев А. М. Анализ применения средств видеомониторинга окружающей обстановки на базе беспилотных аппаратов Министерством чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики / А. М. Мамбеталиев, А. А. Сомов // Проблемы автоматки и управления. 2018. № 1(34). С. 49–54.
4. Hu T. и др. Grazing Sheep Behaviour Recognition Based on Improved YOLOV5 // Sensors. 2023. Т. 23. № 10. С. 4752. DOI: 1424-8220/23/10/4752.
5. Кульчицкий А. И. Использование компьютерного зрения для распознавания техники / А. И. Кульчицкий, Н. С. Макачук, Г. А. Калашников // Научный аспект. 2023. Т. 18, № 5. С. 2 245–2 253.
6. Taha M., Ali A. Redirection and Protocol Mechanisms in Content Delivery Network-Edge Servers for Adaptive Video Streaming // Applied Sciences. 2023. Т. 13. № 9. С. 5 386. DOI: 2076-3417/13/9/5386.

N. N. Gulyutin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: gulyutin@gmail.com

USING THE RTMP PROTOCOL FOR PROCESSING DATA FROM UAV BY REAL-TIME COMPUTER VISION ALGORITHMS

Abstract. The paper examines the role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the context of contemporary data collection and transmission. Particular attention is paid to the use of the RTMP protocol for optimizing real-time data transfer. By employing computer vision methods, this approach allows for in-depth analysis of research objects. The results of the study confirm the potential of this combination for various scientific and applied fields. Conclusions highlight the importance of integrating RTMP and UAVs for efficient real-time object monitoring.

Keywords: UAVs, RTMP, real-time data transmission, computer vision, CDN, object analysis

В. А. Жуковская, А. В. Пятаева, Н. Н. Гулютин
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: anna4u@list.ru

СОЗДАНИЕ ДЕЙТАСЕТА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ

Аннотация. Разработка набора данных для решения задачи детектирования кроны по данным аэрофотосъемки является первым шагом к созданию автоматизированной системы оценки здоровья деревьев. Качественная разметка кроны деревьев с определением их породы имеет решающее значение для дальнейшей работы алгоритма принятия решений. В настоящей работе набор данных размечен вручную по данным БПЛА с помощью платформы Roboflow. Для разметки использованы данные, построенные на территории экопарка Гремячая грива в городе Красноярск. Построенный набор данных состоит из 8615 размеченных деревьев: берез, сосен и елей.

Ключевые слова: набор данных, кроны деревьев, БПЛА, компьютерное зрение, Roboflow

Актуальность выполнения мониторинга состояния деревьев на городских и лесопарковых территориях заключается в необходимости своевременного получения точной и объективной информации о состоянии природных ресурсов для эффективного планирования мероприятий по управлению ими. Одним из современных способов получения такой информации являются технологии глубокого обучения, позволяющие обрабатывать визуальные данные и принимать управленческие решения. Первым этапом выполнения экологического мониторинга является детектирование кроны деревьев. Применение технологий глубокого обучения для решения этой задачи требует привлечения специализированных наборов данных.

Разработка набора данных кроны деревьев. Существуют различные платформы для работы с наборами данных, например, Encord [1], V7 [2], Roboflow [3] или LabelBox [4]. На этих платформах размещаются аннотированные изображения. Несмотря на доступность различных наборов данных для детектирования кроны деревьев, таких как Vert Dataset [5], LandCover.ai [6], Yosemite Tree Dataset [7] каждый набор данных обладает своими уникальными особенностями. Деревья городских и лесопарковых территорий Красноярска существенно отличаются по видовому составу от видового состава деревьев в существующих наборах данных, что существенно снижает качество работы алгоритмов принятия решений. Создание собственного дейтасета с размеченными снимками для городских и лесопарковых территорий Красноярска, позволит решить данную проблему.

В настоящей работе для создания набора данных использована платформа Roboflow. Основными возможностями Roboflow является загрузка и хранение большого объема данных, связанных с изображениями и видео, обучение моделей компьютерного зрения, экспорт и развертывание моделей, интеграция с другими платформами и фреймворками, а также, визуализация и анализ результатов. Важно отметить, что эффективность модели классификации деревьев с использованием Roboflow будет зависеть от качества разметки данных и разнообразия обучающего набора. Поэтому важно собрать достаточное количество разнообразных изображений деревьев и точно указать их метки, чтобы обученная модель обеспечить необходимую точность классификации по этим данным. Roboflow также обладает значительным преимуществом в поддержке передовых методов и алгоритмов компьютерного зрения. Платформа включает в себя поддержку различных архитектур нейронных сетей, таких как современные сверточные нейронные сети и предоставляет доступ к широкому спектру предобученных моделей. Для создания набора данных в задаче детектирования деревьев размечались ортофотопланы, полученные по данным съемки БПЛА. На изображениях присутствуют следующие виды деревьев: ель, сосна береза. Примеры деревьев выполненной съемки приведены на рис. 1 (а–в) соответственно.



Рис. 1. Примеры изображений деревьев из материалов съемки:
а) ель; б) сосна; в) береза

Аэрофотосъемка выполнялась 20 июля, 21 июля и 24 июля 2023 г. с помощью квадрокоптера DJI Mini 2 на лесопарковой территории «Гремячая грива» в городе Красноярске на высоте 70 метров. Каждый ортофотоплан загружен на платформу как отдельное изображение. После загрузки изображений деревьев на платформу для каждого дерева требуется указать его контуры с использованием ограничивающей рамки и класс, к которому это дерево относится. На рис. 2 показан пример разметки изображений в интерфейсе Roboflow. На этом изображении присутствуют деревья только двух классов: береза и сосна.

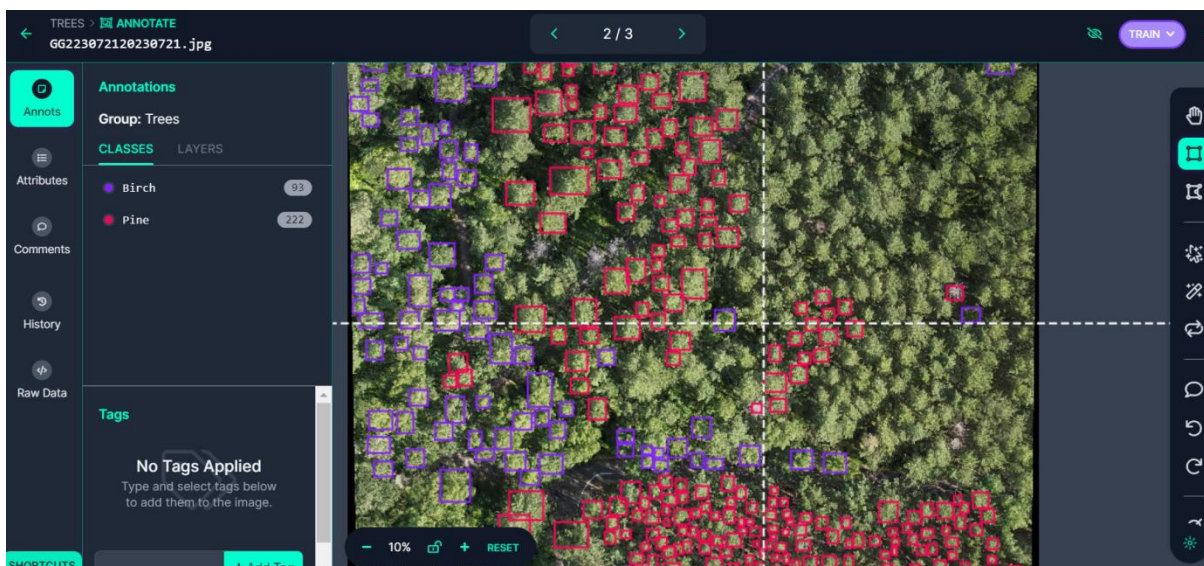


Рис. 2. Процесс разметки набора данных

При выполнении разметки каждое дерево описывается набором координат в формате x , y , ширина и высота, которые можно использовать для вычисления координат x_1 , y_1 , x_2 , y_2 (рис. 3), что позволяет затем загрузить датасет в модель глубокой нейронной сети и проверить корректность ее работы путем сравнения координат ограничивающих рамок, предсказанных моделью и размеченных вручную.



Рис. 3. Координаты меток и примеры разметки

Созданный таким образом набор данных в настоящее время состоит из 4051 берез и 4564 сосен. Размеченные данные могут быть использованы для обучения и тестирования моделей для классификации новых БПЛА-изображений деревьев на территории Красноярских лесов и лесопарков.

Заключение. В работе выполнено создание набора данных кроны деревьев на территории эко парка Гремячая грива с помощью платформы Roboflow. Разметка данных позволит создать надежную и точную модель классификации кроны деревьев для подсчета их количества, определения породы дерева и затем выделения контура кроны.

Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках проекта «Цифровая импортозамещающая технология обнаружения лесных пожаров на основе использования уникальной российской спутниковой группировки Арктика-М с последующей интеграцией с системой ИСДМ-Рослесхоз» № 2023031409613.

Список источников

1. Unlock AI From Your Data | Encord // <https://encord.com/>.
2. Roboflow. (2023). “Roboflow: Computer Vision Made Easy.” Получено с <https://roboflow.com/>.
3. Training Data Platform // <https://www.v7labs.com/sign-up>.
4. Labelbox. The Leading AI Platform for Building Intelligent Applications // <https://labelbox.com/>.
5. Trees Computer Vision Project. Vert Dataset // <https://universe.roboflow.com/project-nqwx/trees-3nzd6>.
6. LandCover.ai (Dataset for Automatic Mapping of Buildings, Woodlands, Water and Roads from Aerial Imagery) // https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.df38096c-64c372e2-9fc601de-74722d776562/https/paperswithcode.com/dataset/landcover-ai.
7. Yosemite Tree Dataset // <https://github.com/nightonion/yosemite-tree-dataset>.

V. A. Zhukovskaya, A. V. Pyataeva, N. N. Gulyutin
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: anna4u@list.ru

CREATING A DATASET FOR TREE CROWN DETECTION

Abstract. The development of a data set for solving the problem of crown detection based on aerial photography data is the first step towards creating an automated tree health assessment system. High-quality marking of tree crowns with the definition of their species is crucial for the further work of the decision-making algorithm. In this work, the data set is marked manually according to UAV data using the Roboflow platform. For marking, we used data built on the territory of the Gremyachaya Griva ecopark in the city of Krasnoyarsk. The constructed dataset consists of 8615 labeled trees: birch, pine and spruce.

Keywords: data set, tree crowns, UAV, computer vision, Roboflow

Е. С. Подольская^{1,2}, А. Д. Кокуркин²

¹ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов, Москва, Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
e-mail: ekaterina.podolskaia@gmail.com

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ИНСТРУМЕНТОВ С ОТКРЫТЫМ КОДОМ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОГ

Аннотация. Распознавание дорог является областью исследований геоинформатики и прикладных наук, для которых сейчас используются инструменты с открытым кодом. Статья посвящена изучению применимости актуальных инструментов геоинформатики для распознавания дорог разных классов. Описан опыт использования плагина MapFlow для Open Source QGIS на примере территорий населенных пунктов и подъездов к ним в Ермаковском лесничестве Красноярского края. Сделан обзор дополнительных плагинов для распознавания дорог в QGIS. Отмечены возможности нейросетей для распознавания дорог в региональном транспортном моделировании для наземного перемещения к ресурсам леса и лесным пожарам.

Ключевые слова: инфраструктура, дорожная сеть, распознавание дорог, открытый код (Open Source), OSM, MapFlow

Распознавание дорог по снимкам разного типа продолжает оставаться актуальной темой в широком спектре тематических проектов [1] [2]. Для лесного хозяйства и регионального лесного транспортного моделирования наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса особое значение имеют дороги без твердого покрытия, к которым относятся лесные дороги [3], преимущественно отсутствующие в мировых базах данных (таких как Open Data OSM, например). Общеизвестно, что качество и актуальность имеющихся в свободном доступе наборов данных зависит от континента, страны и региона. Инструменты с открытым кодом и актуальные космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения позволяют актуализировать данные по дорогам.

Цель работы состоит в изучении возможностей ГИС-инструментов с открытым кодом для распознавания дорог разных классов на примере нескольких тестовых территорий населенных пунктов в Красноярском крае, одном из центров современного лесного хозяйства и лесной промышленности и обладающего значительной неравномерностью развития инфраструктуры дорог. Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи: дать характеристику опыту использования плагина Open Source MapFlow для распознавания дорог на примере территорий в Ермаковском лесничестве Красноярского края, дать обзор плагинов и инструментов распознавания дорог в QGIS в проекте регионального транспортного моделирования наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса.

Распознавание дорог было проведено с использованием плагина MapFlow (<https://plugins.qgis.org/plugins/mapflow/>) в программном обеспечении с открытым кодом Open Source QGIS, актуальная версия от 12.06.2023 г. MapFlow для QGIS является одним из используемых и популярных по данным библиотеки «открытых» инструментов для геоинформатики (<https://plugins.qgis.org/>) плагинов тематики искусственного интеллекта [1] [4]. Наряду с распознаванием дорог (<https://docs.mapflow.ai/userguides/pipelines.html#roads>), компания GeoAlert (<https://geoalert.io/>) ведет разработки по распознаванию зданий, леса и мест строительства по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения.

Согласно документации, обучение модели сегментации дорог выполнено преимущественно для сельской местности по данным из космоса уровня пространственного разрешения порядка 0,3–0,5 м с использованием улучшения связности отдельных сегментов дороги (https://ru.docs.mapflow.ai/userguides/models_changelog/index.html#id9).

Для тестов выбраны территории трех типичных (различных по типам дорог, внутренней планировке и наличию подъездов по дорогам) населенных пунктов Ермаковского лесничества Красноярского края. Была использована демо-версия плагина, имеющая ограничения по площади обработки территории.

Методика работ состояла в следующем. Для расчетов по каждой отдельной дороге были подготовлены следующие исходные данные: линейный слой OSM и полигональный слой MapFlow. Для дорог разных типов в качестве вспомогательного инструмента был выбран буфер в 1,5 м, он построен вокруг линий OSM. Для расчета среднего процента совпадений были выполнены сбор и обобщение геометрии полигонального слоя дорог MapFlow, а также аналогичные операции для геометрии буферизованного слоя OSM. Результатирующими операциями являются анализ сопоставления слоев и преобразование полигонов в линии при помощи стандартной функциональности QGIS. Такой анализ сопоставления выполнен для территорий трех выбранных в Ермаковском лесничестве населенных пунктов: Ермаковское, Григорьевка, Танзыбей и их окрестностей.

Для населенного пункта Ермаковское средний процент соответствий геометрии дорог, сгенерированных MapFlow по снимкам MapBox, и данных по дорогам проекта OSM равен 30,81 %, для Григорьевки – 28,03 %, для Танзыбея – 34,90 % (рис. 1). Можно сделать вывод о том, что при совпадении более 30–40 % дорога является распознанной, однако могут наблюдаться несовпадения геометрии дорог. Такие результаты связаны с различиями масштабов данных проекта OSM и космических снимков, по которым плагин MapFlow выполняет дешифрирование дорог.

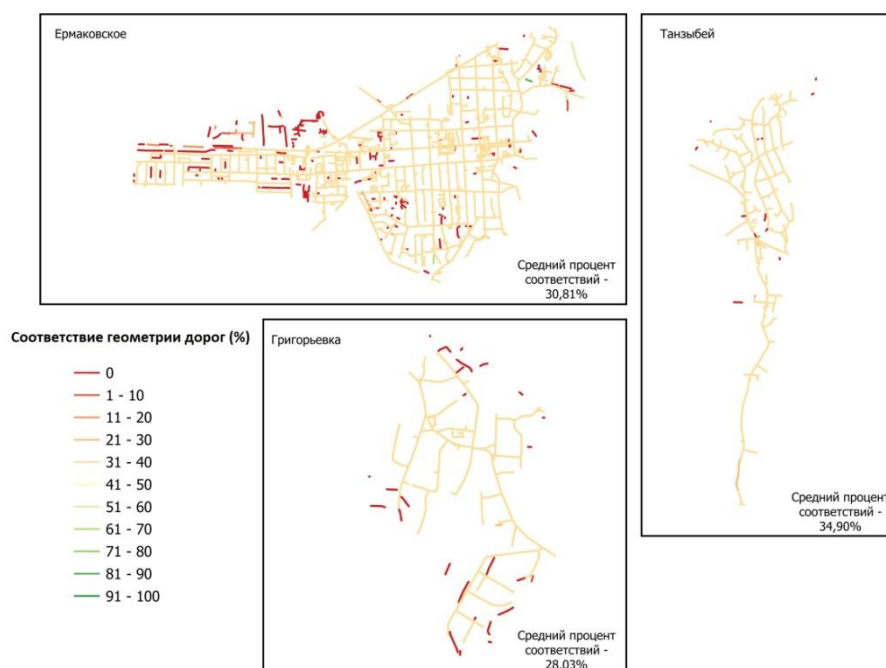


Рис. 1. Результаты сопоставления данных по дорожной сети проекта OSM и распознавания дорог при помощи плагина MapFlow

Помимо MapFlow, для распознавания лесных дорог применим плагин QGIS Deepness, или Deep Neural Remote Sensing, позволяющий получить в QGIS векторные или растровые результаты распознавания заранее обученной модели (<https://plugins.qgis.org/plugins/deepness/>). Из решений на Python можно отметить статью [5], где приведены варианты дешифрирования дорог в амазонских лесах. В системе Kaggle (<https://www.kaggle.com/>) для лесных дорог используются следующие архитектуры семантического сегментирования: DeepLabv3 и DeepLabv3+ с модулем декодера для уточнения результатов (<https://www.kaggle.com/code/balraj98/road-extraction-from-satellite-images-deeplabv3>). Отметим, что в настоящее время Open Source-инструменты распознавания дорог предназначены в основном для дешифрирования улиц в планировке населенных пунктов.

Заключение и направления будущих исследований. Полученные результаты распознавания при помощи плагина MapFlow могут служить дополнительными данными по дорогам для регионального проекта лесного транспортного моделирования, а также применяться в других инфраструктурных проектах, требующих актуальных данных по дорогам.

Благодарности. Статья является частью разработок по региональному лесному транспортному моделированию наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса Лаборатории мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН [1] [4] [6-8]. Работа выполнена в рамках темы Государственного задания «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер № 121121600118-8.

Список источников

1. Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 1–21. DOI 10.31509/2658-607x-202252-115
2. Abdollahi A., Pradhan B., Alamri A. RoadVecNet: a new approach for simultaneous road network segmentation and vectorization from aerial and google earth imagery in a complex urban set-up // GIScience & Remote Sensing, 2021. 58:7. pp. 1 151–1 174. DOI: 10.1080/15481603.2021.1972713
3. Орлов В. А. Автоматизированное распознавание лесных дорог по космическим снимкам // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 1–4.
4. Подольская Е. С. Обзор плагинов Open Source QGIS для лесной отрасли // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 2. С. 1–11. DOI 10.31509/2658-607x-202142-1.
5. Botelho J. Jr., Costa S. C. P., Ribeiro J. G., Souza C. M. Jr. Mapping roads in the Brazilian Amazon with Artificial Intelligence and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2022. N 14. P. 3625. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14153625>
6. Подольская Е. С. Обзор опыта решения задач транспортного моделирования в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 1–32. DOI 10.31509/2658-607x-2021-44-92.
7. Подольская Е. С. Сезонность дорог в транспортном моделировании ГИС-проекта лесного хозяйства // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции / под. ред. С. У. Увайсова. Москва: РТУ МИРЭА, 2022. С. 267–271.
8. Podolskaia E. S. Open geodata and Open Source GIS in the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS) // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-4/W2-2021, 123–125, URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W2-2021-123-2021>, 2021.

E. S. Podolskaia^{1,2}, A. D. Kokurkin²,

¹ Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
e-mail: ekaterina.podolskaia@gmail.com

EXPERIENCE OF USING OPEN SOURCE GIS TOOLS FOR THE ROAD RECOGNITION

Abstract. Road recognition is a research topic of geoinformatics and applied sciences with use of Open Source tools. Paper is devoted to the applicability of relevant geoinformatics tools to recognize roads of different classes. Experience of using MapFlow plug-in for Open Source QGIS is described on the example of settlements and their surroundings in Ermakovskoye forestry, Krasnoyarsk Region (Kray). An overview of additional plugins for road recognition in QGIS is presented. Some possibilities of neural networks for recognizing roads in regional transport modeling for ground movement to the forest resources and forest fires are noted.

Keywords: infrastructure, road network, road recognition, Open Source, OSM, MapFlow

Ю. А. Полевщикова
ООО «ИнноГеоТех», Иннополис, Россия
e-mail: i.polevschikova@innopolis.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ КАК ЭЛЕМЕНТ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ

Аннотация. Леса являются важнейшей экосистемой, поэтому мониторинг лесной территории необходим при оценке растительного покрова. Цифровые сервисы занимают значительное место в развитии инновационной составляющей цифровизации лесной отрасли. Это позволяет упрощать деятельность лесопользователей и органов государственной власти для получения данных и сведений о лесных территориях, учета древесины, фиксирования и проведения лесохозяйственных мероприятий. Повышенное внимание к лесному мониторингу с использованием технологий лидарной съемки и искусственного интеллекта является одним из элементов стратегии создаваемых цифровых сервисов.

Ключевые слова: леса, мониторинг, лидарная съемка, нейронные сети, искусственный интеллект, цифровой сервис

В лесных регионах России с целью увеличения эффективности лесного мониторинга все чаще используются инструменты геоинформационных систем и искусственного интеллекта. В бизнес-практике такая стратегия играет существенную роль для принятия управленческих решений и построения аналитических данных. Получение объективно точных данных о лесе с использованием технологий лидарной съемки на региональном и глобальном уровне является критическим при выработке решений по эффективному управлению лесным хозяйством. Поэтому создание цифровых сервисов для оценки лесного покрова имеет важное научно-практическое значение не только для осуществления лесоустройства, но и для оценки лесного покрова с точки зрения инвестиционной привлекательности для бизнеса и лесопользователей.

Цифровой сервис предполагает использование интерактивных инструментов геопространственного анализа данных и алгоритмов нейронных сетей. В первую очередь это создание гибких инструментов по работе с геоданными, моделями работы нейронных сетей (компьютерного зрения), инструментами пространственного анализа, аналитикой полученных данных [1–3]. На сегодняшний день существуют различные инструменты для обработки и анализа геопространственных данных. Сочетание технологий лидарной съемки на основе съемки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и цифровой фотограмметрии помогает при измерении высоты крон лесного полога [4; 5]. Данная пространственная информация

имеет основополагающее значение при мониторинге лесных насаждений и содействии городскому планированию и управлению.

Серьезную угрозу для лесов – их рост и развитие – представляет влияние инвазивных вредителей [6]. С целью мониторинга состояния таких лесных насаждений в последнее время используют технологии БПЛА. Своевременное и раннее определение здоровья лесов повышает интерес к применению методов автоматического мониторинга, что также оказывает воздействие на изменение климата и его последствия. Для преодоления сложностей по классификации неоднородностей лесного покрова, большого разнообразия характеристик деревьев (их цвета и текстуры), разрабатывают методы обработки данных лидарной съемки.

Разработка цифровых платформ для наблюдения за лесными экосистемами с целью цифровизации постепенно внедряется в повседневную работу лесопользователей и органов государственного управления. Ключевыми задачами целевой аудитории являются получение актуальных и достоверных данных о лесе в цифровом формате, анализ качественных и количественных характеристик лесных насаждений и подготовка ведомственных документов для органов государственной власти с целью получения цифровой базы данных о лесах [7; 8]. Внедрение передовых технологий для мониторинга лесной среды способствует оперативному отслеживанию лесных пожаров, незаконных вырубок деревьев и других факторов изменения. Анализ флоры, обработка данных, прогнозирование динамики, оценка причин и последствий изменений в лесной среде обеспечивает цифровизация леса.

В рамках развития цифровой экономики активно ведется построение методологии на основе картографической оптимизации информационно-аналитических инструментов [9–11]. Умные леса и методы обработки данных о них становятся в центре внимания многих ученых. Цифровые сервисы анализируют и объединяют экологические процессы и формы управления лесами.

Компанией ООО ИнноГеоТех ведется разработка цифровой платформы по лесному мониторингу. В рамках реализации новой лесоустроительной инструкции (2022) предусмотрено внедрение автоматизированных методов и технологий, включающих использование методов искусственного интеллекта и лидарной съемки. Технологии машинного обучения основаны на использовании методов сегментации (объединение классификации и детекции). Источником данных зондирования земли выступают воздушное лазерное сканирование и цифровая аэрофотосъемка. Сейчас работа осуществляется над созданием MVP (Minimal Viable Product) модели платформы. Цифровой сервис будет направлен на автоматизацию процессов анализа: повышение точности определения целевых характеристик леса и обеспечение возможности масштабирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nitoslawski S. A., Wong-Stevens K., Steenberg J. W. N., Witherspoon K., Nesbitt L., Konijnendijk van den Bosch C. C. The Digital Forest: Mapping a Decade of Knowledge on Technological Application for Forest Ecosystems // *Earth's Future*. 2021.
2. Nitoslawski S. A., Galle N. J., Konijnendijk Van Den Bosch C., Steenberg J. W. N. Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry // *Sustainable Cities and Society*. Volume 51. 2019.
3. Lechner A. M., Foody G. M., Boyd D. S. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management // *One Earth* 2. 2020.
4. Zhou L., Meng R., Tan Y., Lv Zh., Zhao Y., Xu B., Zhao F. Comparison of UAV-based LiDAR and digital aerial photogrammetry for measuring crown-level canopy height in the urban environment // *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 69. 2022.
5. Cao L., Liu H., Fu X., Zhang Zh., Shen X., Ruan H. Comparison of UAV LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry Point Clouds for Estimating Forest Structural Attributes in Subtropical Planted Forests // *Forests*. Volume 10, Issue 2. 2019.
6. Barmpoutis P., Stathaki T., Kamperidou V. Monitoring of Trees' Health Condition Using a UAV Equipped with Low-cost Digital Camera // *IEEE Explore*. 2023.
7. Singh R., Gehlot A., Vaseem Akram Sh., Kumar Thakur A., Buddhi Dh., Kumar Das P. Forest 4.0: Digitalization of forest using the Internet of Things (IoT) // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. Volume 34, Issue 8, Part B. 2022.
8. Oldekop J. A., Rasmussen L. V., Agrawal A., Bebbington A. J. et al. Forest-linked livelihoods in a globalized world // *Nature plant*. 2020.
9. Bezrukova T. L., Kuksova I. V., Kirillova S. S., Gyiazov A. T. Forecasting development of forest complex in the formation of digital economy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019.
10. Gabrys J. Comparison of UAV LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry Point Clouds for Estimating Forest Structural Attributes in Subtropical Planted Forests // *Bif Data & Society*. 2020.
11. Zhang Y., Wu H., Yang W. Forests Growth Monitoring Based on Tree Canopy 3D Reconstruction Using UAV Aerial Photogrammetry // *Forests*. Volume 10, Issue 12. 2019.

Iu. A. Polevshchikova

ООО «InnoGeoTech», Innopolis, Russia

e-mail: i.polevschikova@innopolis.ru

USE OF LIDAR SURVEY AS AN ELEMENT OF DIGITAL PLATFORMS DEVELOPMENT STRATEGY

Abstract. Forests are the most important ecosystem. Therefore, forest area monitoring is necessary for land cover assessment. Digital services occupy a significant place in the development of the innovative component of the digitalization of the forest industry. This makes it possible to simplify the activities of forest users and public authorities to get data and information about forest areas, accounting for timber, recording and carrying out forest management activities. Increased attention to forest monitoring using lidar and artificial intelligence technologies is one of the elements of the digital services strategy being created.

Keywords: forests, monitoring, lidar survey, neural networks, artificial intelligence, digital service

А. А. Пушкарев¹, А. С. Кузнецова¹, М. Г. Ерунова¹, О. Э. Якубайлик²

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

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: flash550@yandex.ru, anna.simakina.97@mail.ru, marina.erunova@gmail.com,
oleg@icm.krasn.ru

РЕГИОНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «АГРОМОНИТОРИНГ» ФИЦ КНЦ СО РАН

Аннотация. В данной статье рассматривается региональная информационная система «АгроМониторинг», разработанная в ФИЦ КНЦ СО РАН. Система предназначена для оперативного дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель Красноярского края. В статье приведены сведения о распространяемых в системе спутниковых данных и получаемых на их основе информационных продуктов, различных тематических картах и иных геопространственных данных. Представлено описание серверной и клиентской частей архитектуры, а также доступных в системе модулей для работы с геопространственными данными. Перечислены ключевые возможности информационной системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геопространственные данные, БПЛА, FABDEM, сельское хозяйство

Региональные информационные системы аграрного мониторинга играют важную роль в сельском хозяйстве, повышая эффективность и устойчивость развития данной отрасли [1; 2]. Системы направлены на сбор, хранение, обработку, анализ и распространение информации о погоде, почвенных и морфометрических характеристиках местности и других факторах в автоматизированном режиме [3]. Такого рода данные позволяют фермерам устанавливать оптимальные сроки сева и отслеживать ход формирования сельскохозяйственных культур, а также осуществлять технологические операции (подкормка, укосы) и принимать более обоснованные решения в процессе управления хозяйствами.

В данной статье представлено описание региональной информационной системы аграрного мониторинга, разработанной в ФИЦ КНЦ СО РАН.

Система «АгроМониторинг» ФИЦ КНЦ СО РАН состоит из клиентского веб-приложения и серверной части, которая в свою очередь включает в себя приложения для автоматизированного скачивания и обработки спутниковых данных, базы данных для хранения сущностей приложения и метаданных о ДДЗ. На сервере также расположены два веб-приложения, реализующие доступ к данным по REST API и приложения, предоставляющие клиентской стороне картографические материалы по протоколу WMS.

Система предназначена для оперативного дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Красноярского края. Направлена на распространение данных, таких как:

- спутниковые снимки Sentinel-2 и Landsat 8/9 и продукты, получаемых на их основе (вегетационные индексы NDVI, GCI, VARI, SAVI, MSAVI2) [4];

- компьютерные модели Global Forecast System (GFS) [5] и NASA's Global Precipitation Measurement (GPM) [6] содержащие значения температур и количества осадков;

- цифровая модель рельефа (ЦМР) глобального масштаба FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) [7], а также построенные на основе данной ЦМР тематические карты морфометрических характеристик рельефа местности;

- ортофотоплан местности, ЦМР и тематические карты морфометрических характеристик рельефа местности высокого пространственного разрешения. Данные подготовлены при помощи аэрофото съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА);

- тематические карты на основе архивных данных (цифровые карты полей, агрохимические характеристики почвы, тематические карты размещения сельскохозяйственных культур и др.).

Для работы с распространяемыми в системе данными пользователям доступны модули «Карта» и «Просмотр поля». Первый модуль отвечает за визуализацию данных и работу с ними (рис. 1). При помощи инструментов данного модуля пользователь может изменять параметры добавленных на страницу слоев (степень прозрачности, цветовая схема, процент облачности для спутниковых данных и др.), просматривать атрибутивную информацию слоев, менять их очередность и т. д.

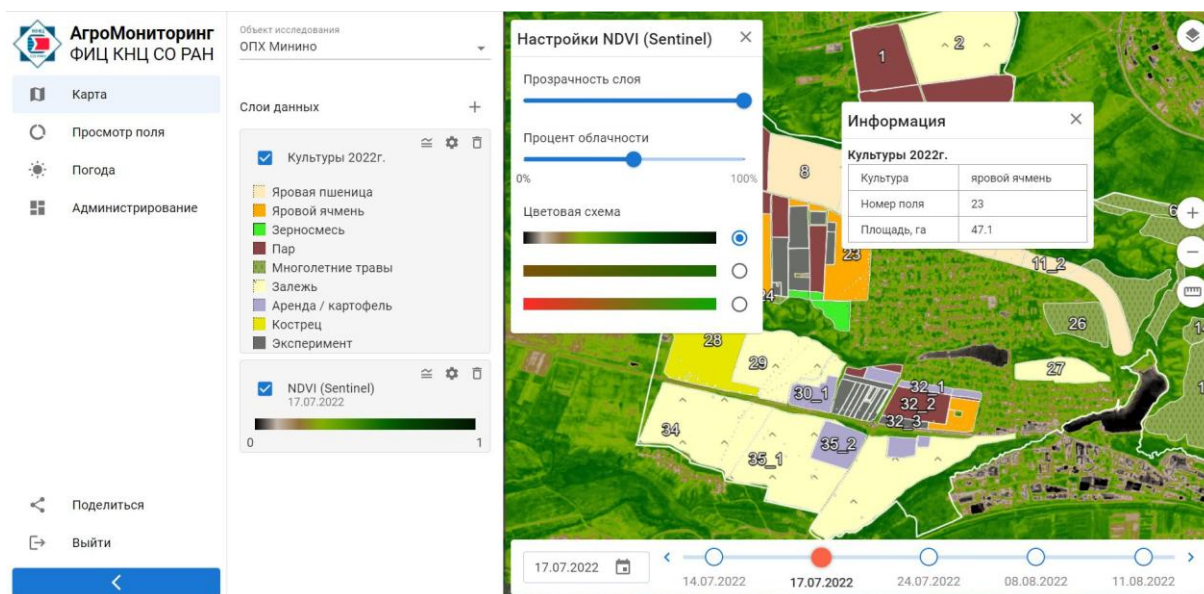


Рис. 1. Интерфейс страницы просмотра данных

Аналитический модуль «Просмотр поля» разработан для проведения анализа значений вегетационных индексов и метеорологических параметров конкретных сельскохозяйственных угодий (рис. 2). В модуле предусмотрено 3 типа представления данных: на карте, в виде текстовой информации о конкретном поле и в виде графиков.

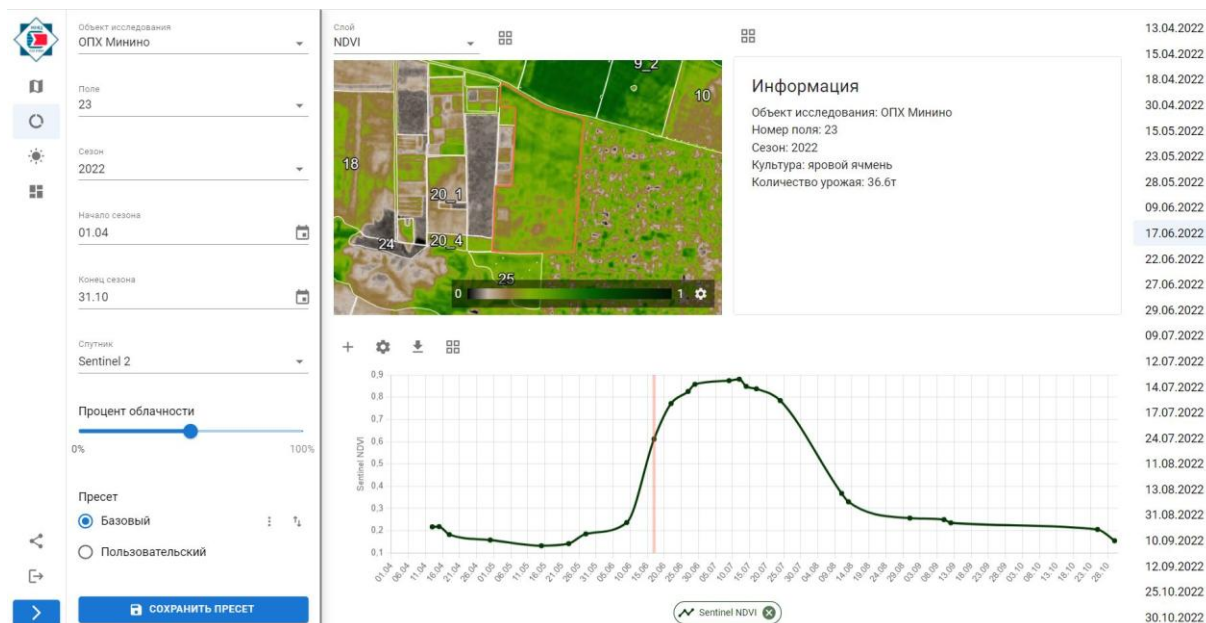


Рис. 2. Интерфейс страницы анализа сельскохозяйственных угодий

К ключевым возможностям информационной системы аграрного мониторинга относятся:

- автоматический импорт, обработка и предоставление спутниковых данных;
- автоматизированный расчет вегетационных индексов NDVI, GCI, VARI, SAVI, MSAVI2;
- предоставление информации о текущей погоде, ближайшем прогнозе погоды (с шагом 3 часа) и прогноз на 3 дня вперед;
- аналитические расчеты показателей мониторинга (метеорологические параметры, значения вегетационных индексов) и их отклонение от средних многолетних значений;
- инструменты работы с пространственными данными (получение информации об атрибутивном наполнении данных, измерение расстояний и площадей, масштабирование и др.);
- качественная оценка состояния посевов сельскохозяйственных культур по комплексному набору данных о местности, реализованного в системе.

Региональная информационная система «АгроМониторинг» ФИЦ КНЦ СО РАН апробирована на территориях опытно-производственных хозяйств (ОПХ) ФИЦ КНЦ СО РАН («Михайловское», «Курагинское» и «Минино»). В будущем планируется расширить территориальный охват системы, включив другие сельскохозяйственные территории Красноярского края.

Список источников

1. Zahran S. A. E.-S., Saeed R. A.-H., Elazizy I. M. Remote sensing based water resources and agriculture spatial indicators system // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2022. Vol.25. P. 515–527.
2. Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Толпин В. А. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 66–83.
3. Fritz S., See L., Bayas J. C. L., Waldner F., Jacques D., Becker-Reshef I., Whitcraft A., Baruth B., Bonifacio R., Crutchfield J., Rembold F., Rojas O., Schucknecht A., Van der Velde M., Verdin J., Wu B., Yan N., You L., Gilliams S., Mücher S., Tetrault R., Moorthy I., McCallum I. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps // Agricultural Systems. 2019. Vol. 168. P. 258–272.
4. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D., Nendel C., Erasmi S., Hostert P. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 269. 112831.
5. The Global Forecast System (GFS) Documentation Retrieved from: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php.
6. Hou A.Y., Kakar R. K., Neeck S., Azarbarzin A. A., Kummerow C. D., Kojima M., Oki R., Nakamura K., Iguchi T. The Global Precipitation Measurement Mission // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. Vol. 95. No. 5. P. 701–722.
7. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. 17(2). 024016.

A. A. Pushkarev¹, A. S. Kuznetsova¹, M. G. Erunova¹, O. E. Yakubailik²

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: flash550@yandex.ru, anna.simakina.97@mail.ru, marina.erunova@gmail.com, oleg@icm.krasn.ru

REGIONAL INFORMATION SYSTEM «AGROMONITORING» FRC KSC SB RAS

Abstract. This article discusses the regional information system “AgroMonitoring” of the FRC KSC SB RAS. The system is designed for operational remote monitoring of agricultural lands of the Krasnoyarsk region. The article provides information about satellite data distributed in the system and information products obtained on their basis, various thematic maps and other geospatial data. The description of the server and client parts of the architecture, as well as modules available in the system for working with geospatial data, is presented. The key features of the information system are listed.

Keywords: remote sensing, geospatial data, UAV, FABDEM, agriculture

А. П. Раевич, Б. С. Добронев, О. А. Попова

Сибирский федеральный университет Красноярск, Россия

e-mail: raevich.ap@yandex.ru, bdobronets@yandex.ru, OlgaArc@yandex.ru

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

Аннотация. В статье описаны современные подходы различных авторов для формирования наборов данных для обучения моделей с целью оценки состояния кроны деревьев. Рассмотрен подход комбинирования реальных и синтетических данных с использованием игровых движков для создания фотореалистических изображений лесного покрова.

Ключевые слова: лесной покров, оценка состояния кроны деревьев, генерация синтетических изображений деревьев

Введение. Лесной покров является основой экономических и экологических благ человека. Важность развития оперативного контроля за состоянием здоровья лесного покрова для принятия незамедлительных мер по исправлению и борьбе с любыми возникающими нарушениями отмечается многими авторами [1, 2].

Ключевую роль в проведении научных исследований выполняет подготовка исходных данных об области исследования. Для решения задач, связанных с обнаружением, классификацией и ранжированием, применяются модели глубокого машинного обучения [3]. Комбинирование исходных данных с использованием современных игровых инструментов для генерации синтетических изображений позволяют добиться создания фотореалистических изображений лесного покрова с возможностью обучения и тренировки разрабатываемых моделей и алгоритмов.

Описание современных подходов. Из множества показателей оценки лесного покрова отдельно выделяется оценка состояния кроны деревьев, как наиболее часто исследуемый параметр [4, 5, 6]. Для обучения моделей и алгоритмов требуется воспринимать деревья, объекты исследования, в зависимости от способа получения изображений и множества дополнительных факторов. Объект может восприниматься по-разному, в зависимости от угла съемки, расстояния от датчика до объекта, плотности объектов на земной поверхности и сезонных факторов.

Исследования авторов [5, 6] показывают, что обучение моделей оценки лесного покрова на основе реальных снимков сопряжено с различными сложностями: обнаружение отдельных деревьев на плотном фоне затруднительно, невозможно предсказать величину абсолютного процента

потери кроны, сбор наземных данных является трудоемким и по своей сути субъективен.

В работе [6] авторы применили сквозную сверточную нейронную сеть для построения модели полной автоматизации задачи оценки кроны деревьев для реальных изображений деревьев на уровне земли. Несмотря на высокую точность оценок, разработанная авторами модель может выводить только одно оценочное значение потери кроны для всей сцены.

Авторы работы [7] показали, что модель, обученная на комбинированном (реальном и синтетическом) наборе данных, превосходит те же модели, обученные только на синтетическом наборе данных.

В работе авторов [8] разработан инструмент оценки потери кроны в реальном времени, который оценивает интервалы процента потери кроны, а также система ранжирования на основе некоторой относительной меры потери кроны. Авторами принят подход смешения синтетического набора данных (до 10 % по размеру от общего размера) с данными реальных детектированных изображений потерь кроны деревьев для обучения модели, которая будет способна анализировать изображения деревьев, получаемых с дрона, в режиме реального времени.

Для создания синтетических фотореалистичных изображений деревьев авторами исследования использован игровой движок Blender. Надстройка Blender Modular Tree использовалась для создания объектов дерева различной длины и диаметра ствола. Дополнительно менялся изгиб деревьев, форма для создания деревьев определенного вида, определялось количество ветвей, их углы, длина, радиус и вероятность разделения. Применение эффекта гравитации использовалось для моделирования реалистичных ветвей. Задавалась конфигурация листа для каждого вида дерева: форма листа, его длина, радиус и плотность листьев на ветке.

Для полноценного обучения модели требуется большой набор синтетических данных с различной степенью потерь кроны деревьев. Для этого авторами были отранжированы реальные данные полевых исследований с разбивкой на 5 интервалов: 0–20 % (здоровое дерево), 20–40 %, 40–60 %, 60–80 % и 80–100 % (мертвые деревья). Визуальные сцены формировались на разном удалении камеры, под разным углом отклонения от объекта исследования. Для формирования реалистичных сценариев синтетически сгенерированные отдельные деревья вставлялись в различные снимки.

Выводы. Задачи по оценке потерь кроны деревьев, связанные с лесным хозяйством, в основном выполняются вручную и требуют много времени. Модели обнаружения и ранжирования деревьев по заданным интервалам, обученные на сочетании реальных и синтетических изображений, согласно исследованиям авторов, показывают результаты оценок, близкие к экспертным.

Список источников

1. Zheng J. et al. Growing status observation for oil palm trees using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Т. 173. P. 95–121.
2. Yurtseven H. et al. Determination and accuracy analysis of individual tree crown parameters using UAV based imagery and OBIA techniques //Measurement. 2019. Т. 145. P. 651–664.
3. Zhang C. et al. Tree species classification using deep learning and RGB optical images obtained by an unmanned aerial vehicle //Journal of Forestry Research. 2021. Т. 32. № 5. С. 1 879–1 888.
4. Dobbertin M., Brang P. Crown defoliation improves tree mortality models //Forest Ecology and Management. 2001. Т. 141. № 3. P. 271–284.
5. Krisanski S., Taskhiri M. S., Turner P. Enhancing methods for under-canopy unmanned aircraft system based photogrammetry in complex forests for tree diameter measurement //Remote Sensing. 2020. Т. 12. № 10. P. 1 652.
6. Kälın U. et al. Defoliation estimation of forest trees from ground-level images //Remote Sensing of Environment. 2019. Т. 223. P. 143–153.
7. Dwibedi D., Misra I., Hebert M. Cut, paste and learn: Surprisingly easy synthesis for instance detection //Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2017. P. 1 301–1 310.
8. Ho B., Kocer B. B., Kovac M. Vision based crown loss estimation for individual trees with remote aerial robots //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2022. Т. 188. P. 75–88.

A. P. Raevich, B. S. Dobronets, O. A. Popova

Institute of Space and Information Technology SFU, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: raevich.ap@yandex.ru, bdobronets@yandex.ru, OlgaArc@yandex.ru

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR ASSESSING THE CONDITION OF FOREST COVER

Abstract. The article describes the modern approaches of various authors for the formation of data sets for training models in order to assess the state of the tree crown. An approach is considered for combining real and synthetic data using game engines to create photorealistic images of forest cover.

Keywords: forest cover, tree crown condition assessment, generation of synthetic tree images

Д. Е. Субботин, Л. В. Михайленко, М. З. Маннанов, А. С. Егоров
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия
e-mail: mail@samspace.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С РАЗЛИЧНОЙ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРОЙ

Аннотация. Приведена информация о перспективных направлениях работ и опережающих проектах, реализуемых АО «РКЦ «Прогресс», в области создания малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли опико-электронного и радиолокационного наблюдения, представлен опыт АО «РКЦ «Прогресс» по эксплуатации малого космического аппарата «Аист-2Д» и обеспечению органов государственной власти и организаций различных форм собственности данными ДЗЗ для решения социально-экономических задач, а также возможности по созданию космических аппаратов различного целевого назначения и пунктов управления, приёма и обработки информации.

Ключевые слова: космические аппараты, дистанционное зондирование Земли, тематические задачи потребителей

АО «РКЦ «Прогресс» – ведущее российское предприятие и один из мировых лидеров в области создания и эксплуатации ракет-носителей, космических комплексов дистанционного зондирования Земли и автоматических космических аппаратов прикладного назначения. АО «РКЦ «Прогресс» обладает компетенциями для обеспечения полного жизненного цикла создания ракетно-космических комплексов: от разработки космических аппаратов и ракет-носителей под них до запуска и гарантийного обслуживания.

Основные направления деятельности:

- создание, модернизация и эксплуатация ракетных комплексов (ракет-носителей, наземных средств их подготовки и запуска);
- создание и эксплуатация космических комплексов (КК) дистанционного зондирования Земли;
- создание и эксплуатация космических комплексов для медико-биологических и технологических исследований;
- услуги по запуску космических аппаратов (КА);
- услуги по размещению полезных нагрузок и проведению научных экспериментов на космических аппаратах;
- изготовление продукции производственно-технического назначения.

Одно из приоритетных направлений работы АО «РКЦ «Прогресс» – создание космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Данные ДЗЗ необходимы для решения различных задач – от мони-

торинга чрезвычайных ситуаций до поиска полезных ископаемых и картографирования территорий.

МКА «Аист-2Д» запущен 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» РН «Союз-2» этапа 1а. АО «РКЦ «Прогресс» является разработчиком и оператором МКА «Аист-2Д», обеспечивая управление, приём и обработку получаемой информации.

В настоящее время МКА находится в режиме штатной эксплуатации, успешно выполняя свои задачи, работая на орбите более 7 лет. Стоит отметить, что достаточно высокое разрешение в панхроматическом и мультиспектральном диапазонах в сочетании со значительной шириной полосы захвата является одним из главных преимуществ МКА «Аист-2Д» по сравнению с другими функционирующими аппаратами.

На основе опыта и технических решений, полученных при создании МКА «Аист-2Д», предприятие разрабатывает универсальную платформу для построения МКА различного назначения. В её состав входит полный набор обеспечивающей аппаратуры, включая систему управления движением с высокими характеристиками по скорости и точности и антенные комплексы управления и передачи целевой информации на наземные пункты приёма.

АО «РКЦ «Прогресс» располагает всеми необходимыми средствами для создания и сдачи заказчику «под ключ» космических аппаратов ДЗЗ, включая проектирование, создание, услуги по выведению на целевые орбиты ракетой-носителем «Союз-2», лётно-конструкторские испытания и сдачу в эксплуатацию, а также создание наземного сегмента, обеспечивающего управление, приём и обработку целевой информации.

D. E. Subbotin, L. V. Mikhailenko, M. Z. Mannanov, A. S. Egorov
Progress Space-Rocket Centre, Samara, Russia
e-mail: mail@samspace.ru

PROMISING EARTH REMOTE SENSING SMALL SATELLITES WITH VARIOUS IMAGING EQUIPMENT

Abstract. The article deals with the prospective focus areas and projects ahead of time SRC Progress implements in the field of design and development of the Earth remote sensing small satellites for optoelectronic and radar imaging. The article also presents SRC Progress' experience in operating Aist-2D small satellite and providing governmental authorities and entities of various forms of legal incorporation with remote sensing data to answer social and economic challenges of current importance. In addition, the article discusses ways of designing both satellites for various purposes and data receiving, control and processing stations.

Keywords: satellite, remote sensing of the Earth, Customers' thematic tasks

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 004.932.2

Ю. В. Авраменко, А. Е. Хмельнов, Р. К. Федоров

ФГБУН Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия
e-mail: avramenko@icc.ru, hmelnov@icc.ru, fedorov@icc.ru

ВЕКТОРИЗАЦИЯ КАРТО-СХЕМЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В статье показан способ фильтрации карто-схемы, полученной на основе классификации спутниковых снимков. Представление растровых данных в векторном формате позволяет сократить занимаемый ими объем, повысить удобство анализа этих данных. Карто-схема для множества задач является излишне детальной и содержит единичные пиксели отличающихся классов. Например, овраги в полях классифицируются нейронной сетью пастбищами, или выделяются огороды в пределах населенных пунктов. Множество единичных пикселей (объектов с малой площадью) значительно увеличивает объем данных и затрудняет его анализ, например, получение объекта с наименьшей площадью или подсчет суммарной площади всех объектов определенного класса. Применение существующих фильтров не позволяет решить данную проблему, т.к. происходят морфологические изменения исходных границ. В результате применения предложенных решений удалось сократить число полигональных объектов до 20% от общего на основе анализа связанных компонент. Полученные результаты могут применяться при обработке данных ДЗЗ.

Ключевые слова: классификация, выделение связанных областей, удаление шумов, векторизация

В ходе работ по прогнозированию экологической обстановки Байкальской природной территории (БПТ) была решена задача составления карто-схемы подстилающей поверхности. Карто-схема была получена путем классификации космоснимков Sentinel-2 при помощи нейронной сети на базе архитектуры семейства ResNet50. Затем была выполнена постобработка, направленная на удаление таких классов как облачность и отсутствие данных. Следующим шагом это перевод полученных результатов в векторный формат. Однако карто-схема для множества задач является излишне детальной и содержит единичные пиксели отличающихся классов. Например, овраги в полях классифицируются нейронной сетью пастбищами, или выделяются огороды в пределах населенных пунктов. Множество единичных пикселей (объектов с малой площадью) значительно увеличивает

объем данных и затрудняет его анализ, например, получение объекта с наименьшей площадью или подсчет суммарной площади всех объектов определенного класса. Удаление объектов с малой площадью при помощи известных методов фильтрации может привести к изменениям контуров объектов. Следовательно, требуется разработать и реализовать собственный фильтр. В текущей работе предлагается удалить объекты с малой площадью на растровом изображении в два шага: 1 – выделение связанных компонент (СК), 2 – удаление объектов с малой площадью.

Решение задачи выделения СК хорошо известно. Идея алгоритма состоит в обходе изображения маской (четырёх или восьмисвязной) для маркировки пикселей уникальным номером – меткой. Существующие реализации данного алгоритма как правило разделяют на одно-, двух-, многопроходные [1]. Однопроходные алгоритмы как правило являются рекурсивными, что может вызывать проблему нехватки памяти. Двухпроходные алгоритмы требуют составления таблицы эквивалентности меток, которая может быть настолько большой, что ее обработка будет требовать неприемлемого количества времени. Эффективность многопроходных реализаций зависит от количества СК на изображении.

В работах [2] таблица эквивалентности меток содержит записи вида {метка с минимальным значением} {множество эквивалентных меток} $l_{\min}, \{l_1 \dots l_n\} | l_{\min} \in \{l_1 \dots l_n\}$. В работе [3] приведена двухпроходная реализация алгоритма выделения СК. В ней строится упорядоченный список эквивалентных меток $\{l_n : l_m\} | l_n \leq l_m$. Однако в работе не рассмотрены все случаи переопределения эквивалентных меток, полученных в результате нескольких переходов, как на рисунке 1. Рассмотрим следующий список эквивалентных меток $\{[1:1], [2:2], [3:2], [4:2], [5:3]\}$. Метка 5 должна быть промаркирована меткой 3, а т.к. метка 3 уже обработана, то переопределить 5 за один проход не получится. В текущей работе для решения данной проблемы предлагается использовать разработанную функцию получения конечного значения метки. Функция принимает на вход метку до тех пор, пока ее значение не будет равно конечному.

$$f(x_i) = \begin{cases} x_i, & x = i \\ f(f(x_i)), & f(x_i) < i \end{cases}$$

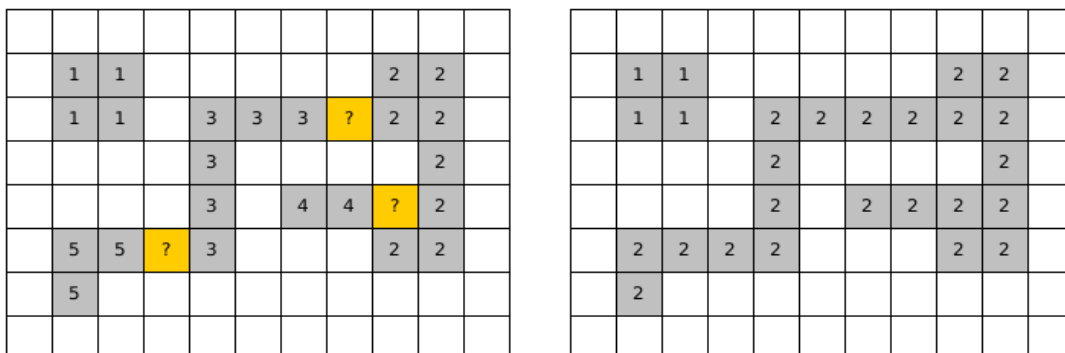


Рис. 1. Слева – конфликт меток, справа – конечный результат

Удаление объекта с малой площадью осуществляется присвоением новой метки всем его пикселям. Фильтр должен обрабатывать два случая, возникающих при удалении: удаляемый объект целиком вложен в другой объект – новая метка определяется однозначно (метка более крупного объекта); удаляемый объект находится на границе нескольких объектов – необходимо осуществить выбор новой метки среди соседних объектов. Выбор новой метки среди соседних объектов зависит от решаемой задачи. Например, если необходимо сохранить площадь определенного класса, то он должен иметь меньший приоритет. Формируется приоритет классов при помощи упорядоченного списка. Удаление объектов работает по принципу скользящего окна. На вход подается изображение; маска объектов, подлежащих удалению, построенная на основе выделенных СК; список приоритета классов. На первом проходе определяются вложенные объекты и метки классов подлежащие удалению (перезаписи). На втором проходе происходит удаление.

В ходе выполнения задачи векторизации был улучшен метод выделения связанных компонент и реализован фильтр устранения объектов с малой площадью. Итоговый векторный слой, соответствующий одному растровому изображению, содержит в среднем на 20 % меньше объектов по сравнению с векторизацией без удаления шума. Пример продемонстрирован на рис. 2. Фрагмент векторного представления карто-схемы подстилающей поверхности показан на рис. 3.

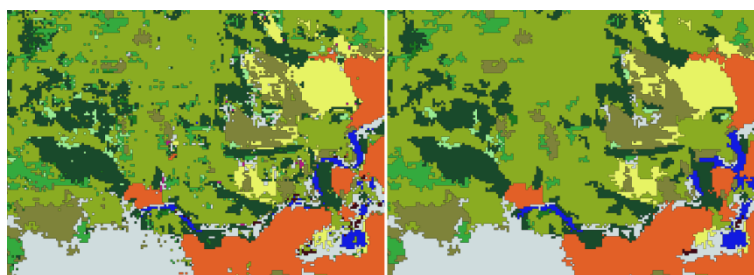


Рис. 2. Результат удаления шума

Карто-схема подстилающей поверхности

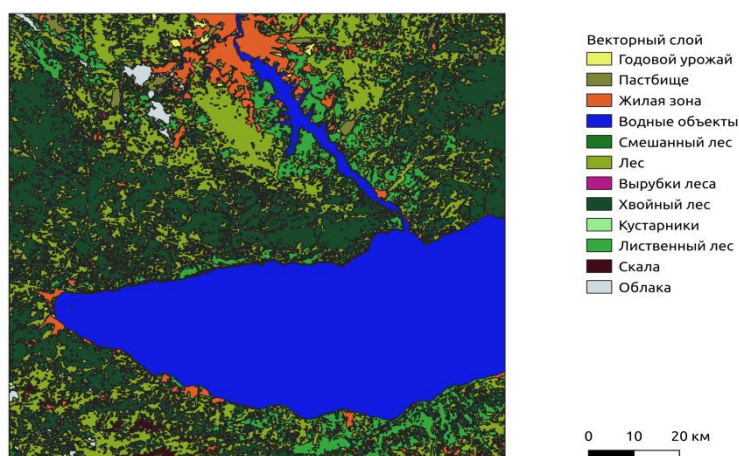


Рис. 3. Результат векторизации и удаления шума

Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (номер гос. регистрации 121030500071-2).

Список источников

1. Стержанов М. Методики выделения связанных компонент в штриховых бинарных изображениях / М. Стержанов // 20 Международная конференция по компьютерной графике и зрению (Графикон). 2010. С. 169–174.
2. Kesheng Wu, Ekow Otoo, and Kenji Suzuki. Optimizing two-pass connected-component labeling algorithms. *Pattern Analysis and Applications*, pp. 117–135, 2009.
3. Spong M W, Vidyasagar M. *Robot Dynamics and Control*. New York: John Wiley and Sons; 1989.

Yu. V. Avramenko, A. E. Hmelnov, R. K. Fedorov
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
e-mail: avramenko@icc.ru, hmelnov@icc.ru, fedorov@icc.ru

VECTORIZATION OF THE LAND USE MAP OF THE OF THE IRKUTSK REGION

Abstract. The article present a method for filtering a map-scheme obtained on the basis of the classification of satellite images. Representation of raster data in vector format allows to reduce the disk volume space they left and make helpful of data analysis. The map for many tasks is too detailed and contains single pixels of different classes. For example, ravines in fields are classified by the neural network as pastures, or vegetable gardens are distinguished within settlements. A lot of single pixels (objects with a small area) significantly increases the amount of data and makes it difficult to analyze it, for example, obtaining an object with the smallest area or calculating the total area of all objects of a certain class. The use of existing filters does not allow solving this problem, because morphological changes in the original boundaries occur. As a result of applying the proposed solutions, it was possible to reduce the number of polygonal objects to 20% of the total based on the analysis of connected components. The results obtained can be used in the processing of remote sensing data.

Keywords: classification, connected component labeling, noise removal, vectorization

А. С. Гордиенко, А. В. Корнеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ДЕШИФРОВОЧНЫХ ПРИЗНАКОВ

Аннотация. В данной статье приведены исследования применения многоспектральных космических снимков Sentinel-2 для определения площади территории пострадавшей от пожаров. Представлены результаты анализа традиционных методов и сделан вывод о необходимости применения комплекса дешифровочных признаков для выявления последствий пожаров. Разработано «дерево решений» на основе индексных изображений, спектральных яркостей и главных компонент. Полученный результат, позволяет решать проблемы, возникающие при использовании только индексных изображений. Результаты подтверждаются информацией из открытых источников и могут быть применены для других территорий.

Ключевые слова: пожары, Sentinel-2, индексы, дерево решений

Введение. Ежегодно на территории РФ лесные пожары затрагивают огромные территории. Основной причиной пожара является человеческий фактор и лишь 13 % всех пожаров возникает в результате естественных причин: самовозгорание каменного угля и торфа, удары молний, извержение вулканов, падение метеоритов и др. Последствия пожаров отражаются на экологической ситуации (деградация почв и растительности, загрязнение атмосферы, сокращение популяции фауны и др.), экономической (сокращение объемов древесины, уничтожение сельхозугодий и др.) и социальной (выгорание населенных пунктов, гибель людей и др.) [1; 2]. Помимо оперативного выявления очагов пожаров, необходимо также выполнять мониторинг последствий катастроф. Часто, пожары охватывают огромные территории, которые могут быть еще и труднодоступными, таким образом, эффективней использовать методы дистанционного зондирования. Цель данного исследования – определение площади территории пострадавшей от пожаров по многоспектральным космическим снимкам (Sentinel-2).

Материалы и методы исследования. Для выполнения исследований выбрана территория Рязанской области. В качестве исходных данных использовались снимки среднего пространственного разрешения (20 м), полученные со съемочной системы Sentinel-2. Серия разновременных снимков отражает ситуацию до пожара, во время пожара и после пожара, произошедшего в 2022 г.

Традиционно, для оперативного мониторинга территорий, пострадавших от пожаров, по данным дистанционного зондирования Земли при-

меняются индексы, такие как Normalized Burn Ratio, Normalized Burn Ratio-SWIR, Normalized Difference Shortwave Infrared Index, Mid-Infrared Bi-Spectral Index, Burnt Area Index for Sentinel 2 [3–7]. Индексные изображения имеют ряд недостатков – помимо выгоревшей территории выделяют объекты гидрографии, не показывают последствия низинных пожаров, либо имеют ограничения по временному интервалу. Для решения данных проблем в работе применялся алгоритм «дерево решений», который позволяет использовать совокупность дешифровочных признаков. При разработке «дерева решений» использовались индексы, яркости в спектральных каналах и главных компонентах.

Результаты. Разработанное в ходе исследования «дерево решений» представлено на рис. 1.

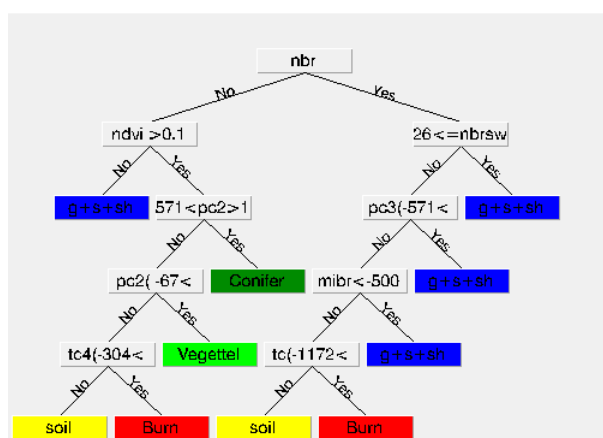
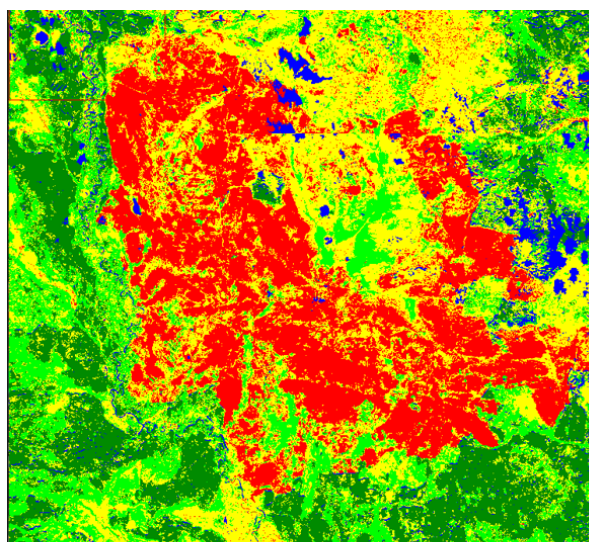


Рис. 1. Итоговое «дерево решений»

Результат классификации, полученный в результате действия алгоритма «дерево решений», представлен на рис. 2.



- – территория, пострадавшая от пожара
- – открытая почва и населенные пункты
- – гидрография, облака, тени
- – растительность
- – хвойная растительность

Рис. 2. Результат классификации

Таким образом, площадь территории, пострадавшей от пожаров, составила около 20 га, что соответствует информации, полученной из открытых источников [8].

Выводы. Проведенное исследование показало, что комплексное использование различных дешифровочных признаков, позволяет эффективно выявлять интересующую информацию. В данном случае, территорию, пострадавшую от пожаров. Такой подход, конечно, требует времени и определенных навыков исполнителя. Дальнейшие исследования планируется посвятить апробации данного «дерева решений» для других территорий и его доработка.

Список источников

1. Влияние лесных пожаров на окружающую среду. Текст: электронный // scilead: [сайт]. URL: scilead.ru/article/3084-vliyanie-lesnikh-pozharov-na-okruzhayushchuyu (дата обращения: 13.04.2023).

2. Причины возникновения лесных пожаров. Текст: электронный // pt-zapovednik: [сайт]. 2021. URL: pt-zapovednik.ru/prichiny-vozniknoveniya-lesnyh-pozharov (дата обращения: 13.04.2023).

3. Индекс NBR для определения гарей. Текст: электронный // Cartetika: [сайт]. 2023. URL: cartetika.ru/tpost/7j50ida7h1-indeks-nbr-dlya-opredeleniya-garei (дата обращения: 14.04.2023).

4. Малинников В. А. Анализ информативности зональных и индексных спутниковых изображений в детектировании деградации средиземноморских лесов / В. А. Малинников. Текст: электронный // Актуальные направления географических исследований в Кемеровской области и других регионах России: сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых ученых в рамках Межрегиональной молодежной научно-проектной школы «ГеоКузбасс», Кемерово, 25–28 февраля 2021 г. / Кемеровский государственный университет. Кемерово: КемГУ, 2021. С. 84–88. URL: elibrary.ru/item.asp?id=46353728 (дата обращения: 14.05.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

5. Медведева М. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров / М. А. Медведева, Д. А. Макаров, А. А. Сиринов. Текст: электронный // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2020. № 5. С. 157–166. URL: elibrary.ru/item.asp?id=44225285 (дата обращения: 14.05.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

6. Украинский П. А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей / П. А. Украинский. Текст: электронный // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. № 4. С. 229–238. URL: elibrary.ru/item.asp?id=20726385 (дата обращения: 15.05.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

7. Alcaras E. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index For Sentinel-2 Imagery. Текст: электронный / E. Alcaras, D. Costantino, M. Pepe // [mdpi: \[сайт\]. 2022.mdpi.com/2072-4292/14/7/1727/htm/](http://mdpi.com/2072-4292/14/7/1727/htm/) (дата обращения: 15.05.2023).

8. Площадь пожаров в Рязанской области снова выросла [сайт]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5536233> (дата обращения 15.05.2023).

A. S. Gordienko, A. V. Korneev
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: a.s.gordienko@sgugit.ru

RECOGNITION OF THE CONSEQUENCES OF FIRE ON THE BASIS OF A COMPLEX OF INTERPRETATION FEATURES

Abstract. This article presents studies on the use of multispectral satellite images Sentinel-2 to determine the area of the territory affected by fires. The results of the analysis of traditional methods are presented and the conclusion is made about the need to use a set of deciphering signs to identify the consequences of fires. A "decision tree" based on index images, spectral channels and principal components has been developed. The result obtained allows solving problems that arise when using only index images. The results are confirmed by information from open sources and can be applied to other territories.

Keywords: fires, Sentinel-2, indices, decision tree

А. А. Гостева¹, Н. Е. Зайцев¹, А. К. Матузко², К. Е. Таныгин¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, n.zaycev@rambler.ru, akmatuzko@icm.krasn.ru,
kirilltanygin0@gmail.com

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ LANDSAT 8–9 C2L2

Аннотация. Изучение температуры поверхности в городе является важной задачей на сегодняшний день. Работа сосредоточена на анализе температуры поверхности в городе Красноярск и его пригородах. Проведена апробация приложения для автоматизированного вычисления температуры поверхности по спутниковым данным Landsat 8–9 C2L2, сделано сравнение полученных данных с показаниями городских метеорологических служб. Выполнен анализ полученных результатов для трех точек наблюдения с разной окружающей средой. Весной и осенью наблюдается снижение температуры поверхности земли. Результаты могут быть применены для развития инфраструктуры городской среды. Также полученные результаты можно применять на других территориях пролета Landsat 8–9.

Ключевые слова: температура, городские острова тепла, спутниковые данные, температура поверхности земли, Landsat

Введение. Температура городской среды – важный фактор, который влияет на жизнедеятельность людей и функционирование города. Исследование температуры городской среды позволяет определить воздействие потепления в городах и установить причины изменения температуры. Результат изучения температуры может быть использован в других исследованиях, а также для принятия решений по планированию и проектированию городской среды. Показатель температуры позволяет изучить такое явление как городской остров тепла. Городской остров тепла – это разница в температуре города и окружающей природной (не урбанизированной) территории [1].

Изучение температуры является актуальной и перспективной темой для города Красноярска. Город обладает сложным рельефом, перепадами высот и наличием большого количества промышленных предприятий, все эти факторы оказывают большое влияние на температуру городской среды.

Для изучения температуры городской среды используются геоинформационные технологии и разнообразные подходы. В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно применяются

для исследования температуры поверхности земли и городских островов тепла [1].

Материалы и методы. К современным методам ДЗЗ и изучения температуры поверхности можно отнести применение спутниковых данных. В статье рассматриваются данные Collection 2 Level 2 (C2L2) со спутников Landsat 8–9.

Спутники Landsat 8 (запущен 11.02.2013) и Landsat 9 (запущен 27.09.21) совершает съёмку территории с повтором каждые 16 дней. В статье рассматриваются данные с прибора Thermal Infrared Sensor (TIRS), который установлен на спутниках. Датчик измеряет температуру поверхности земли в двух тепловых диапазонах с пространственным разрешением 100 метров. Данные являются открытыми и доступными [2].

Для получения данных Landsat 8–9 было применено приложение для автоматизированной загрузки и обработки данных ДЗЗ с целью получения карт температуры поверхности Земли [3]. В результате работы программы, формируются слои с рассчитанной температурой в формате GeoTiff [3].

С сайта Федерального государственного бюджетного учреждения «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [4] были взяты данные с температурой воздуха с автоматической метеорологической станции (АМС) Роев Ручей, автоматического метеорологического комплекса (АМК) Красноярск опытное поле, АМК ул. Дудинская д. 4. Данные выбраны соответственно для дат спутниковых снимков на 12:00.

Полученные данные в формате GeoTiff необходимо обработать для дальнейшего представления их в форме диаграмм, алгоритм работы представлен на блок-схеме на рис. 1. Алгоритм заключается в смене системы координат и вычислении среднего значения температуры поверхности в точках расположения метеостанций.

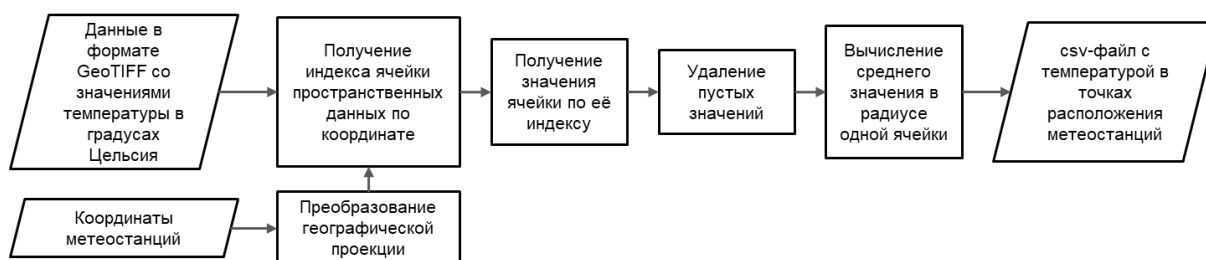


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки пространственных данных

После обработки всех данных, были отобраны те даты, где есть значения по температуре поверхности во всех трех контрольных точках (Опытное поле, ул. Дудинская, Роев ручей) и где зафиксированы температуры воздуха.

Результаты и обсуждения. Таким образом, было отобрано 39 спутниковых снимков, которые относятся к весне, лету и осени с 2014 г. по 2022 г. Данные со спутниковых снимков и метеостанций можно пред-

ставить в виде диаграмм. На рис. 2 представлены диаграммы, на которых сравнивается температура воздуха с метеостанций Роев Ручей и АМК ул. Дудинская 4 с соответствующими им температурами поверхности.

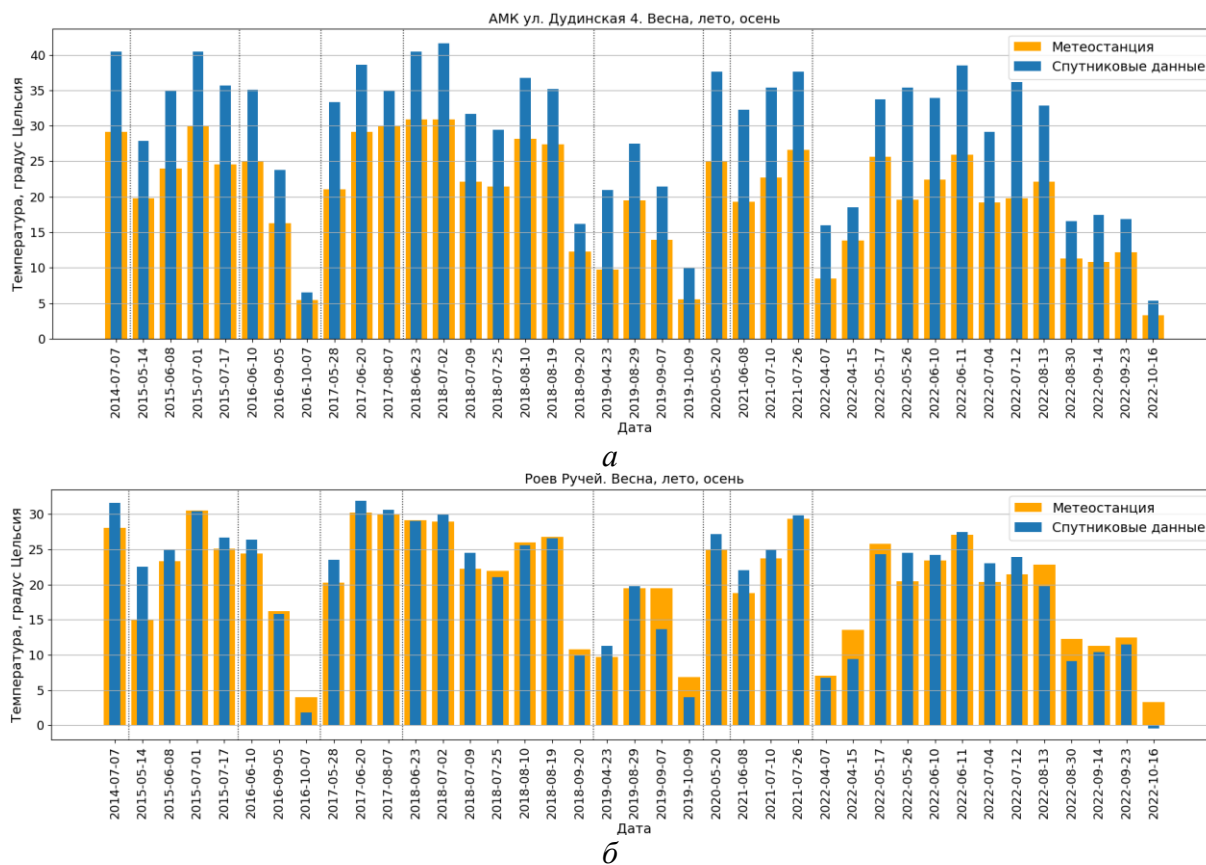


Рис. 2. Сравнение температуры воздуха с метеостанции и спутниковых данных:
а) АМК ул. Дудинская; б) Роев Ручей

Рассмотрев рис. 2, можно сделать вывод, что максимально близкими значения воздуха и поверхности отмечается в осенний период, а в летний период наблюдается максимальная разница в значениях. Это явление можно объяснить снижением активности солнца осенью. Солнце осенью не может нагревать поверхность земли также, как и летом из-за низкого угла падения солнечных лучей и сокращения дневного времени в сутках. Схожие выводы можно сделать и для весенних месяцев. Изучив наблюдения для станции Роев Ручей, можно заметить, что для весенних и осенних данных температура поверхности ниже температуры воздуха. Это можно объяснить особенностью типа поверхности.

Дополнительно был проведен анализ поверхности в трех точках по спутниковым данным, на рис. 3 видно, что наблюдается сезонная зависимость в разнице значений температуры поверхности.



Рис. 3. Сравнение температуры поверхности земли в трёх точках, спутниковые данные

Также можно наблюдать снижение температур для весенних и осенних месяцев. Различие между значениями станций в несколько градусов обусловлено тем, что контрольные станции расположены в разных частях города, с разной инфраструктурой и разным качеством подстилающей поверхности.

Выводы. В результате анализа можно сделать вывод, что весной и осенью наблюдается снижение температуры поверхности земли, это связано с активностью солнца, также прослеживается зависимость температуры от типа поверхности. Результаты можно применить для решения экологических задач и задач развития инфраструктуры городской среды.

Список источников

1. Stewart, Iain D. The urban heat island: A guidebook / Iain D. Stewart, Gerald Mills. Амстердам: ELSEVIER, 2021. 171 с.
2. USGS. Landsat Satellite Missions [Электронный ресурс] // USGS : [сайт]. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> (дата обращения 19.07.2023).
3. Гостева А.А. Автоматизация вычисления температуры поверхности по данным теплового диапазона Landsat 8–9 на территории Центральной Сибири / А. А. Гостева, Н. Е. Зайцев, А. К. Матузко // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3. С. 56–60.
4. Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс] // Официальный сайт ФГБУ Среднесибирское УГМС. URL: <http://meteo.krasnoyarsk.ru> (дата обращения 19.07.2023).

A. A. Gosteva¹, N. E. Zaytsev¹, A. K. Matuzko², K. E. Tanygin¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of computational modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, n.zaycev@rambler.ru, akmatuzko@icm.krasn.ru, kirilltanygin0@gmail.com

ANALYSIS OF SURFACE TEMPERATURE AND ITS SEASONAL CHANGES USING LANDSAT 8–9 C2L2 DATA

Abstract. The study of surface temperature in the city is an important task today. The work is focused on the analysis of surface temperature in the city of Krasnoyarsk and its suburbs. The application for automated calculation of surface temperature using Landsat 8–9 C2L2 satellite data has been tested, the comparison of the obtained data with the readings of

the city meteorological services has been made. The obtained results were analyzed for three observation points with different environment. A decrease in ground surface temperature is observed in spring and fall. The results can be applied to the development of urban environment infrastructure. Also the obtained results can be applied to other areas of Landsat 8–9 flyby.

Keywords: temperature, urban heat islands, satellite data, land surface temperature, Landsat

Е. В. Дмитриев^{1,2}, Т. В. Кондранин², П. Г. Мельник³, И. В. Слюсарева²

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

³ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,
e-mail: yegor@mail.ru, e-mail: tvk494@yandex.ru, e-mail: melnik_petr@bk.ru

МНОГОМАСШТАБНАЯ ТЕКСТУРНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Аннотация. Рассматривается задача текстурной сегментации местоположения и типов произрастания древостоев с использованием спутниковых изображений высокого пространственного разрешения. Для проведения расчетов использовались спутниковые изображения Bing и Worldview-2 тестового участка на территории Бронницкого лесничества (Московская обл.) приведенные к различным масштабам. Выделено две группы информативных текстурных признаков с различной чувствительностью к изменению масштаба обрабатываемых изображений. Показано, что задача сегментации местоположения древостоев может быть решена с приемлемой точностью по изображениям обоих типов при размере пикселя менее 2 м. Точность сегментации естественных и искусственных древостоев оказалась существенно ниже. Решение данной задачи с приемлемой точностью возможно только для изображений Worldview-2 при размере пикселя 0,5 м.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, текстурная сегментация, спутниковые изображения, лесистость, лесные культуры

Текстурная сегментация изображений высокого пространственного разрешения является важным компонентом современного инструментария тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и имеет широкий спектр приложений в различных секторах лесного хозяйства. В настоящее время существует ряд работ, в которых показано, что использование информации о пространственной структуре обследуемых объектов позволяет повысить точность стандартных методов обработки дистанционных данных, основанных на использовании спектральных характеристик. Так, например, результаты представленные в работе [1] демонстрируют информативность текстурных признаков при определении видового состава древостоев. В зависимости от района обследования использование текстурной информации позволило повысить точность классификации на величину от 5 до 15 %.

В качестве общей тенденции развития методов тематической обработки спутниковых данных можно выделить направленность на совместное использование изображений с различным пространственным разрешением. Как правило, изображения со средним разрешением (10–30 м) ис-

пользуются для расчета вегетационных индексов. Изображения сверхвысокого разрешения (< 1 м) позволяют извлекать текстурные признаки, которые в дальнейшем используются для классификации структурных особенностей растительного полога. Преимущества такого подхода показаны в работе [2], где были представлены результаты картирования структурных параметров и видового состава прибрежной растительности тропических саванн Австралии с использованием изображений Ikonos и Landsat-7 ETM+.

Методы текстурного анализа позволяют учитывать влияние базовых структурных параметров, таких как сомкнутость полога и плотности крон на отражательную способность древостоев. Использование текстурных характеристик позволяет повысить точность спектральной классификации древостоев с высокой плотностью полога. В работе [3] показано, что точность выявления видового состава на основе текстурной обработки панхроматических изображений WorldView-2 (разрешение 0,5 м) существенно превосходит результаты классификации с использованием как вегетационных индексов, так и непосредственно значений спектральной отражательной способности.

Характерной проблемой текстурной обработки является изменение структурных элементов, по которым проводится идентификация изображения при изменении масштаба. Для лесного полога, при разрешении лучше 1 м, характерная текстура формируется в основном за счет затененных и освещенных участков крон. При переходе к размерам пикселя более 2 м, отдельные деревья становятся неразличимыми и текстурные особенности в основном определяются смещением видового состава и крупномасштабными вариациями сомкнутости полога.

В данной работе мы рассматриваем задачи текстурной сегментации контуров древостоев, а также типов произрастания по спутниковым изображениям с различным пространственным разрешением. Для формирования куба текстурных данных мы используем ряд статистических методов извлечения текстурных признаков (GLM, GLCM, GLRLM и CDTM) и точную модель текстурной обработки [4].

Метод GLM (Gray-Level Matrix) основан на расчете функции вероятности появления уровней серого на обрабатываемом изображении. На основе данной функции рассчитываются статистические параметры (среднее, среднеквадратичное, дисперсия, энтропия и энергия), которые в дальнейшем рассматриваются в качестве спектральных признаков.

В методе GLCM (Gray-Level Co-Occurrence Matrix) в качестве структурных элементов рассматриваются соседние по заданному направлению пары пикселей. Элементы матрицы GLCM представляют собой частоты совместной встречаемости уровней серого. Нормированная матрица GLCM является двумерной функцией вероятности, на основе которой рассчитывается 19 статистических параметров, известных как текстурные признаки Харалика [5].

Для построения CDTM, на исходном изображении выделяются все возможные ячейки размером 3×3 , для которых производится сравнение яркости центрального и граничных пикселей. Эта матрица характеризует распределение сочетаний значений диагонального и крестового блоков. На основе CDTM производится расчет признаков Харалика.

Метод GLRLM (Gray-Level Run-Length Matrix) основан на оценке частоты появления линейных примитивов заданной длины с одинаковой яркостью вдоль данного направления. На основе GLRLM рассчитывается 11 статистических параметров [6], которые характеризуют преобладание определенных длин, уровней яркостей и однородности распределения линейных примитивов. Подробное описание указанных методов, а также наименования и расчетные формулы текстурных признаков представлены в работе [4].

Задача сегментации древостоев решается путем попиксельной классификации куба текстурных признаков с помощью квадратичного дискриминантного анализа (КДА). КДА является байесовским алгоритмом обучаемой классификации, который позволяет получать оптимальное решение в предположении нормальности распределения используемых признаков. Соответствующие дискриминантные поверхности представляются квадратичными полиномами. КДА имеет достаточно высокую вычислительную эффективность и нечувствителен к сбалансированности обучающей выборки. Для оптимизации признакового пространства используются регуляризованный метод последовательного отбора (РМПО) и анализ главных компонент (РСА – Principal component analysis) [7].

Для проведения численных расчетов использовались изображения тестового участка на территории Бронницкого лесничества (Раменский городской округ, Московская обл.). Участок содержит древостои с чистым и смешанным породным составом охватывающим основные лесобразующие виды, произрастающие в лесах европейской части России. Характерной особенностью выбранного участка является наличие значительных площадей искусственных лесных насаждений.

В качестве спутниковой информации использовались панхроматическое изображение Worldview-2 за 28 июля 2011 г. и спутниковые карты Bing с различным пространственным разрешением, полученные с помощью ПО SAS.Планета (<http://www.sasgis.org/>). Данные по используемым изображениям представлены в табл. 1. Рассматривается 5 различных масштабов от 14 до 18 по классификации SAS.Планета, которые охватывают диапазоны пространственного разрешения от среднего до сверхвысокого. Размер ячеек сетки для которых измеряются текстуры составляют примерно 35 м, что позволяет набрать необходимую статистику для всех рассматриваемых масштабов.

Таблица 1

Пространственные характеристики обрабатываемых изображений

	Масштаб	Ширина, px	Высота, px	Размер пикселя, м	Шаг сетки, px
Worldview2	14	605	610	8	5
	15	1 210	1 220	4	9
	16	2 419	2 439	2	17
	17	4 838	4 878	1	35
	18	9 675	9 755	0,5	71
Bing	14	445	449	10,9	5
	15	890	897	5,4	7
	16	1 780	1 794	2,7	15
	17	3 559	3 588	1,4	27
	18	7 118	7 177	0,7	51

Пространственное разрешение исходного изображения Worldview-2 составляет 0,5 м. Для изменения масштаба строились Гауссовские пирамиды [8]. Для оценки качества сегментации использовались векторные карты границ древостоев участков искусственных лесных насаждений. Результаты классификации приводились к бинарному формату, а именно: лес – прочие объекты и лесные культуры – естественные насаждения. Далее производилось сравнение с соответствующей векторной картой, а также расчет матрицы ошибок и прочих характеристик.

Для каждого из рассмотренных методов были выделены «низкочастотные» текстурные признаки, т. е. такие значения которых определяется низкочастотной изменчивостью яркости пикселей изображения. Для GLM это «среднее» и «средний квадрат», для GLCM – «автокорреляция» и «среднее суммы», а для GLRLM – HGRE и SRHGE. Поскольку данные признаки имеют высокие значения взаимной корреляции, их совместное использование затруднительно. Наилучшее решение заключается в применении метода главных компонент. Для рассматриваемой сцены, информация о контурах древостоев содержится в первых 2-х главных компонентах.

Оценки ошибок текстурной сегментации древостоев для изображений Worldview-2 и Bing представлены в табл. 2. Параметр TE означает полную вероятность ошибки, TOE – среднюю ошибку пропуска цели, а TCE – среднюю ошибку ложной тревоги. Поскольку в окрестности границ древостоев изображение внутри ячейки сетки окна содержит значительные фрагменты как целевого, так и прочих объектов, то можно полагать, что граничные пиксели классифицируются случайным образом. Таким образом, в нашем случае для задачи сегментации древостоев, естественный уровень ошибок составляет 0,007.

Таблица 2

Ошибки сегментации древостоев по низкочастотным текстурным признакам на различных масштабах

	Масштаб	TE	TOE	TSE
Worldview2	14	0,224	0,276	0,217
	15	0,189	0,236	0,173
	16	0,121	0,151	0,110
	17	0,107	0,131	0,1
	18	0,069	0,087	0,059
Bing	14	0,069	0,091	0,054
	15	0,07	0,095	0,052
	16	0,066	0,089	0,049
	17	0,051	0,067	0,041
	18	0,048	0,061	0,041

По данным табл. 2 можно видеть, что точность сегментации увеличивается с повышением пространственного разрешения. При обработке изображений Bing не происходит значительного изменения ошибок, а для масштабов 14–16 ошибки практически совпадают. Изображениям Worldview2 в целом соответствует существенно больший уровень ошибок. Это в большей части объясняется наличием ряби на поверхности водного объекта. На масштабе 18 ошибка сегментации достигает уровня ошибок для изображений Bing.

Далее были выделены текстурные признаки, характеризующие высокочастотную изменчивость яркости пикселей исходного изображения: энергия (GLM), энтропия (GLCM), максимум вероятности (GGCM), однородность (GGCM), SRLGE (GLRLM) и корреляция (CDTM). Ошибки сегментации древостоев по высокочастотным признакам указаны в табл. 3. Для изображений Bing можно видеть, что на масштабах 14–16 данные признаки не несут полезной информации.

При переходе к масштабу 17 происходит уменьшение TE до 14 %, и на масштабе 18 ошибка сегментации становится меньше, чем в случае использования низкочастотных признаков. Данный эффект связан с тем, что при уменьшении пространственного разрешения текстура лесного полога существенно сглаживается и характеризуется средними значениями яркости, которая определяется породным составом и состоянием древостоя. Начиная с масштаба 17, существенное влияние на текстуру начинают оказывать межкрупные промежутки, освещенность отдельных частей крон и форма крон.

Для изображений Worldview-2 высокочастотные признаки становятся неинформативными только на масштабе 14. Это связано тем, что на данных изображениях отсутствуют характерные шумы упаковки и, при построении пирамид, нет необходимости применять дополнительную фильтрацию. Увеличение ошибки сегментации на масштабе 17

связано с тем, что в этом случае начинают классифицироваться отсутствующие на экспертной карте группы из нескольких деревьев, расположенные в зонах застройки и вдоль дорог.

Таблица 3

Ошибки сегментации древостоев
по высокочастотным текстурным признакам на различных масштабах

	Масштаб	TE	TOE	TCE
Worldview2	14	0,287	0,250	0,263
	15	0,096	0,096	0,107
	16	0,043	0,053	0,040
	17	0,063	0,056	0,072
	18	0,039	0,049	0,034
Bing	14	0,294	0,341	0,317
	15	0,374	0,390	0,394
	16	0,441	0,428	0,433
	17	0,138	0,168	0,131
	18	0,039	0,039	0,045

Результаты сегментации древостоев тестовой территории представлены на рис. 1. Красным цветом выделены ошибки пропуска цели, которые возникают, когда алгоритм классифицирует участки лесного полога как прочие объекты. Синим цветом обозначены ошибки ложной тревоги, которые возникают в обратной ситуации. Можно видеть, что полученные результаты не имеют существенных различий по точности. Полная вероятность ошибки при сегментации изображения Bing (масштаб 18) составляет 0,038, при сегментации изображения Worldview-2 (масштаб 18) – 0,033 и при совместной сегментации – 0,034. Различие между ошибками представленных сегментаций не превышает величину естественного уровня ошибок.

Ошибки оmissии и комиссии только для древостоев (исключая прочие объекты) составляют соответственно 0,078 и 0,026 для изображения Bing, и 0,055 и 0,034 для изображения Worldview-2. Таким образом, при обработке изображения Bing мы имеем несколько более высокий уровень и дисбаланс ошибок. Следует также отметить, что основная часть ошибок сосредоточена на границах древостоев тестовой территории.

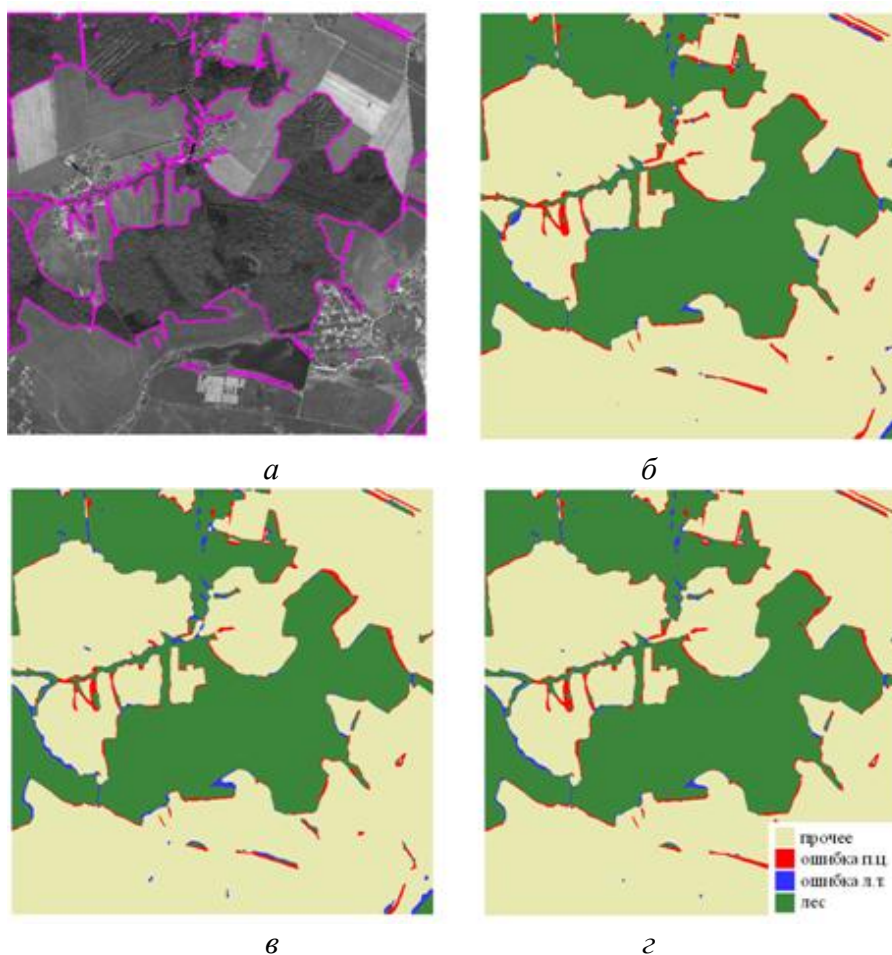


Рис. 1. Текстуальная сегментация древостоев на тестовом участке:
а) панхроматическое изображение тестового участка и контуры древостоев;
б) сегментация изображения Bing; *в)* сегментация изображения Worldview-2;
г) совместная сегментация с использованием текстурных признаков рассчитанных по изображениям Bing и Worldview-2

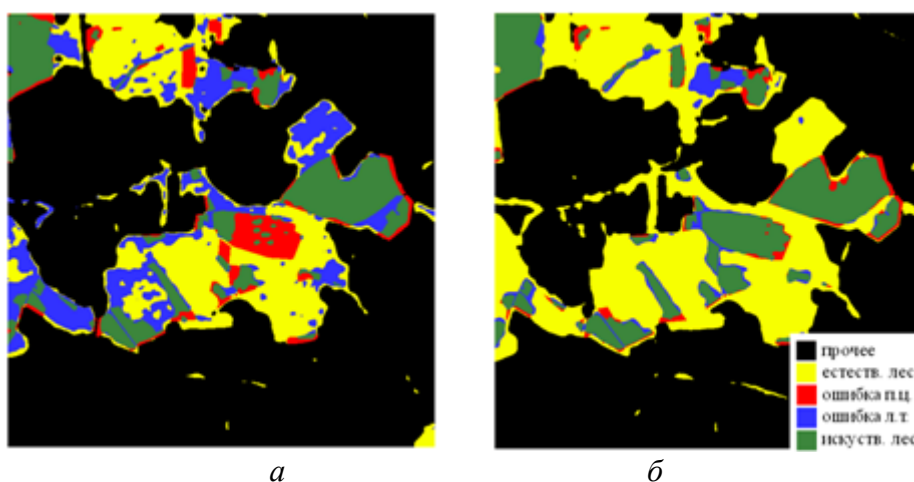


Рис. 2. Текстуальная сегментация естественных и искусственных древостоев:
а) сегментация изображения Bing; *б)* сегментация изображения Worldview-2

Результаты сегментации естественных и искусственных древостоев представлены на рис. 2. При обработке изображения Bing точность сегментации становится неприемлемо низкой. Для изображения Worldview-2

ошибка сегментации искусственных древостоев составляет величину порядка 15 %. В целом на рис. 2б можно видеть, что общая структура расположения естественных и искусственных древостоев восстанавливается и значительная часть ошибок соответствует граничным областям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-29-00128 «Методы машинного обучения в задаче автоматизации обработки данных космических систем высокодетального мониторинга растительного покрова».

Список источников

1. Franklin S. E., Hall R. J., Moskal L. M., Maudie A. J., Lavigne M. B. Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images // International journal of remote sensing, 2000. V. 21(1). P. 61–79.
2. Johansen K., Phinn S. Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using IKONOS and Landsat ETM+ data in Australian tropical savannahs. Photogramm // Eng. Remote. Sens., 2006. V. 72 (1). P. 71–80.
3. Sibiya B., Lottering R., Odindi J. Discriminating commercial forest species using image texture computed from a worldview-2 pan-sharpened image and partial least squares discriminant analysis // Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, no. 23, 100605.
4. Дмитриев Е. В., Кондранин Т. В., Зотов С. А. Сегментация природных и антропогенных объектов по панхроматическим спутниковым изображениям с использованием статистических текстурных признаков // Автометрия, 2022. № 58(2). С. 69–84.
5. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1973. № 6. P. 610–621.
6. Galloway M. M. Texture analysis using gray level run lengths // Computer graphics and image processing. 1975. V. 4(2). P. 172–179.
7. Дмитриев Е. В. Классификация лесного покрова тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 22–32.
8. Burt P. J., Adelson E. H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code // IEEE Transactions on Communications, 1983. V. COM-31(4). P. 532–540.

E. V. Dmitriev^{1,2}, T. V. Kondranin², P. G. Melnik³, I. V. Slusareva²

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia

³ Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: yegor@mail.ru , e-mail: tvk494@yandex.ru , e-mail: melnik_petr@bk.ru

MULTI-SCALE TEXTURAL SEGMENTATION OF SATELLITE IMAGES OF FOREST AREAS

Abstract. The problem of textural segmentation of the location and growth types of forest stands is considered using satellite images of high spatial resolution. The Bing and Worldview-2 satellite images of the test site located on the territory of the Bronnitsky forestry (Moscow region) reduced to different scales were used for the calculations. Two groups of informative textural features with different sensitivity to changes in the scale of the processed images are distinguished. It is shown that the problem of forest stand location segmentation can be solved with acceptable accuracy using both types of images with a pixel size of less

than 2 m. The segmentation accuracy of natural and artificial forest stands turned out to be significantly lower. The solution of this problem with acceptable accuracy is possible only for Worldview-2 images with a pixel size of 0.5 m.

Keywords: Remote sensing, pattern recognition, texture segmentation, satellite images, forest cover, forest plantations

Л. Г. Евстратова, О. Е. Степанченко

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
e-mail: lge_21@mail.ru, okapelika@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Аннотация. Совершенствование подходов информационного обеспечения экологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым данным является актуальной задачей, направленной на рациональное использование земельных ресурсов и обеспечение продовольственной безопасности государства. В работе приведены результаты исследования совместной обработки и интерпретации разновременных многоспектральных и радарных спутниковых данных для решения задач по выявлению земель вышедших из оборота и геоморфологического анализа территории с использованием цифровой модели рельефа построенной по спутниковым разновременным радарным данным Sentinel-1. Приведены результаты вычисления топографического индекса влажности и индекса мощности потока для мелиорируемых земель, что позволило выполнить совместный анализ полученных показателей и установить преобладающее направление стока на исследуемую территорию, и использовать эту информацию для прогнозирования процессов эрозии и риск деградации земель.

Ключевые слова: экологический мониторинг, спутниковые многоспектральные и радиолокационные данные, мелиорируемые земли, цифровая модель рельефа, морфометрические индексы

Введение. Значительную роль в информационном обеспечении экологического мониторинга земель занимают современные технологии тематической обработки спутниковых данных с целью получения достоверной информации о состоянии и об использовании земель сельскохозяйственного назначения.

Необходимость исследования по разработке методик применения материалов спутниковых многоспектральных и радиолокационных съемок для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, связана с тем, что для выработки государственной политики и нормативно-правового регулирования в сфере агропромышленного комплекса (АПК) важно иметь актуальные сведения (пространственные данные, качественные и количественные характеристики) как о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения, так и о состоянии растительности, почв и водных ресурсов [1].

Совершенствование методик тематической обработки спутниковых данных является актуальной задачей, направленной на рациональное использование земельных ресурсов и обеспечение продовольственной безо-

пасности государства. Методики тематической обработки спутниковых данных с применением геоинформационных технологий занимают особое место в вопросах информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли актуальными и достоверными сведениями.

Таким образом, актуальной является задача разработки новых и усовершенствования существующих подходов к распознаванию объектов местности и определению количественных характеристик рельефа по спутниковым данным, которые бы эффективно использовали широкий набор данных дистанционного зондирования Земли.

Спутниковые данные, методики их обработки и результаты. В работе предлагается один из возможных подходов совместной обработки и интерпретации разновременных многоспектральных и радарных спутниковых данных, который повышает достоверность результата их дешифрирования при проведении оперативного мониторинга о состоянии и об использовании сельскохозяйственных угодий и определения количественных показателей эрозионного потенциала рельефа и гидроморфности почвы.

Для выявления земель, выбывших из оборота, были разработаны методики автоматизированного определения контуров зарастания залежных земель древесно-кустарниковой растительность по многоспектральными космическим снимкам (QuikBird, WorldView, SPOT 5, Sentinel-2). Первая методика реализована на применении вейвлет-анализа, которая показала высокую достоверность (от 89 % до 97 %) [2]. Вторая методика, основана на применении алгоритма сегментации методом водоразделов и последующей неконтролируемой классификации K-means [3]. Достоверность выявления изменений для данных высокого пространственного разрешения составила 93,1 %, а для данных среднего пространственного разрешения – 85,6 %.

Апробация представленных методик проводилась на сельскохозяйственных угодьях с разным уровнем зарастаний Ступинского и Озёрского районов Московской области, Городовиковского района Республики Калмыкия и Юхновского района Калужской области. Полученный уровень достоверности определения зарастаний для данных территорий показывает эффективность применения данных методик.

Одной из причин деградации земель является эродированность. Эрозия может быть вызвана как природными силами, так и человеческой деятельностью (например, нерациональным использованием земель). Важнейшими факторами, влияющими на эрозию, являются климатические условия (например, поверхностный сток талых вод), свойства почвы (например, ее плотность), рельеф местности (например, уклон склона) и растительный покров. Известно, что на мелиорируемых землях часто проявляется ирригационная эрозия почв, что является следствием несоблюдения правил и норм полива в орошаемом земледелии.

Были проведены исследования методики обработки спутниковых разновременных радарных данных Sentinel-1 для геоморфологического

анализа мелиорируемых земель на территории Озёрского районов Московской области.

Прежде всего, производилась обработка одиннадцати разновременных радарных данных Sentinel-1 (режим съемки IW – интерферометрический; поляризация снимков – VV; откалиброванные комплексные файлы одиночного типа для каждой траектории полета – SLC) полученных с 94 нисходящей орбиты спутника Sentinel-1A на период с 3 мая по 6 октября 2022 г. с целью получения цифровой модели рельефа (ЦМР) методом малых базовых линий (Small Baseline Subset), что позволила построить ЦМР, имеющую высокую плотность данных (размер пикселя на местности составляет 20×20 метров) и погрешность определения высот не хуже 2,5 м.

Далее на основе полученной ЦМР проводились исследования преобладающих направлений развития водноэрозионных процессов, для этого выполнялись построения карт уклонов и направления стоков. Также в текущем исследовании выполнялся морфологический анализ (рис. 1) с применением индексов SPI (Stream Power Index) и TWI (Topographic Wetness Index), определяемые по формулам [4]:

$$SPI=A \cdot \tan(\beta),$$

где A – удельная водосборная площадь; β – угол наклона земной поверхности.

$$TWI=\ln\left[\frac{A}{\tan(\beta)}\right],$$

где A – удельная водосборная площадь; β – топографический градиент.

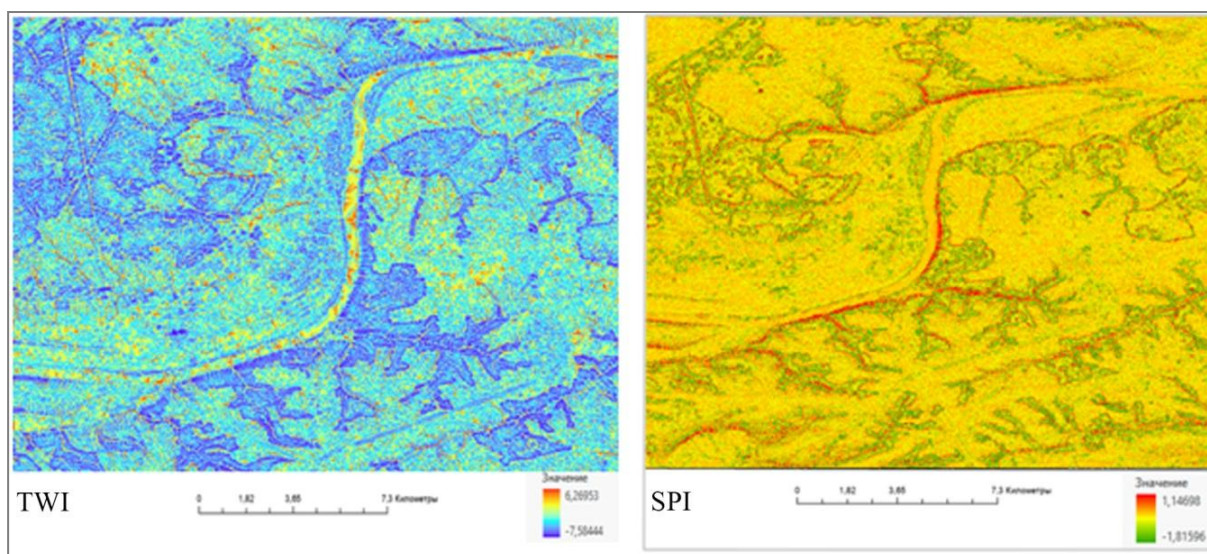


Рис. 1. Количественные показатели эрозионного потенциала рельефа и гидроморфности почвенного покрова Озёрского района, рассчитанные по данным Sentinel-1

Данные индексы позволяют оценить геоморфологические предпосылки по развитию процесса переувлажнения земель, для описания потенциальной эрозии водного потока в данной точке топографической поверхности. Таким образом, их совместный анализ позволит учесть данные факторы при планировании агромелиоративных мероприятий и размещении сельскохозяйственных культур на полугидроморфных и гидроморфных почвах.

В заключение исследований были совместно проанализированы индексы NDVI вычисленные по многоспектральным снимкам Sentinel-2, ЦМР и вышеперечисленные тематические слои, полученные по ЦМР для выявления состояния посевов сельскохозяйственных культур в разный период вегетации.

Заключение. Информация о количественных характеристиках рельефа, выраженных через его морфометрию, является необходимым условием для решения широкого круга научных и прикладных задач в сельском хозяйстве, например, прогнозирование преобладающих направлений развития водноэрозионных процессов.

Установлено, что предложенный подход совместной обработки и интерпретации разновременных многоспектральных и радарных спутниковых данных позволяет повысить достоверность выявления причин плохой всхожести посевов, переувлажнения почв, изучать динамику эрозионных процессов.

Предложенные методики имеют практическое значение не только для получения геопространственной информации о расположении, площади и проценте зарастания угодий, но так и для понимания пространственного распределения влажности почв, оценки критических свойств рельефа. Таким образом, выполненные исследования позволяют получить актуальные сведения для информационного обеспечения экологического мониторинга земель, и собранная информация может быть использована для выполнения мероприятий в рамках межхозяйственного землеустройства, а также при проектировании новых и реконструкции существующих осушительно-увлажнительных мелиоративных систем.

Список источников

1. Ведешин Л. А., Шаповалов Д. А. Первые научно-технические эксперименты по космическому землеведению (К 60-летию начала работ по космической съемке Земли с пилотируемых космических кораблей) // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 99–102.

2. Евстратова Л. Г., Антошкин А. А. Выявление зарастания пахотных земель по космическим снимкам на основе структурных признаков [Электронный ресурс]: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание. Науч. ред. Е. А. Ваганов, отв. ред. Г. М. Цибульский. Красноярск, 2021. С. 73–76.

3. Калитка Л. С., Евстратова Л. Г. Мониторинг зарастания земель сельскохозяйственного назначения по космическим снимкам высокого и среднего пространственного разрешения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 4 (382). С. 7–9. DOI: 10.24412/2587-6740-2021-4-7-9.

4. Дуброва Ю. Н., Мыслыва Т. Н. Ткачева Т. Н. Геоморфометрический анализ рельефа территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1. С. 209–216.

L. G. Evstratova, O. E. Stepanchenko
State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
e-mail: lge_21@mail.ru, okapelika@gmail.com

AGRICULTURAL LANDS ECOLOGICAL MONITORING INFORMATION SUPPORT BASED ON SATELLITE DATA

Abstract. Improving approaches to agricultural lands ecological monitoring information support based on satellite data is an urgent task aimed at the land resources rational use and ensuring food security of the State. The paper presents the results of a study of the multi – time and multispectral radar satellite data joint processing and interpretation to solve the problems of identification lands that have fallen out of circulation and geomorphological analysis of the territory using a digital terrain model built on Sentinel-1 satellite multispectral radar data. Calculating the topographic humidity index and the flow power index results for reclaimed lands are presented, which made it possible to perform a joint analysis of the obtained indicators and establish the predominant flow direction to the studied territory, and use this information to predict the erosion processes and the land degradation risk.

Keywords: ecological monitoring, satellite multispectral and radar data, reclaimed lands, digital terrain model, morphometric indexes

А. А. Жуков¹, А. В. Клещ¹, Е. Ю. Жукова¹, И. Ю. Ботвич²

¹ ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», Абакан, Россия

² Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия
e-mail.ru: zhukov_aa@khsu.ru

КОНЦЕПТ БАЗЫ ДАННЫХ «ОЦЕНКА СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ»

Аннотация. Предметом работы является методические основы проектирования реляционной базы наземных и спутниковых данных по секвестрации углерода растительностью на примере техногенно нарушенных территорий. Целью работы является разработка концепта для базы данных в SQLite. Для получения информации о накоплении углерода растительностью используются наземные методы прямого и конверсионного учета, а также расчеты по спутниковым данным на основе регрессионных уравнений. Результатом работы является разработка концепта базы данных, содержащей 5 элементов – данные о секвестрации углерода растительностью, спутниковые данные Sentinel 2, наземные данные (лесотаксационные, фитоценологические, спектральные и микроклиматические параметры), регионы интереса и список клиентов. Область применения результатов – рациональное природопользование, экологическая экспертиза, исследование круговорота углерода и функций экосистем в регионе.

Ключевые слова: секвестрация углерода, техногенно нарушенные экосистемы, база данных, дистанционное зондирование

Секвестрация углерода (carbon sequestration) – поглощение (абсорбция, сток) CO₂ лесами или другими наземными или морскими экосистемами [1].

Точная оценка запасов углерода в экосистемах важна, поскольку позволяет достичь углеродной нейтральности территории. Для оценки углерода в растительности в региональном масштабе применяются спутниковые данные (Sentinel-2, ALOS-2, Sentinel-1 и др.). Для вычислений часто используются нейросети, регрессионное моделирование. Результаты оценки углерода в лесах подтвердили повышения точности моделирования путем объединения оптических и радиолокационных данных. По сравнению с регрессионными методами машинное обучение обладает высоким потенциалом для точной оценки запасов углерода в лесах с использованием нескольких типов данных дистанционного зондирования [2; 3]. По сравнению с Sentinel-1, Sentinel-2 продемонстрировал лучшую точность прогноза, хотя их комбинация в зависимости от сезонности дала наилучшие результаты прогнозирования наземной фитомассы. Изображения, полученные в сухой сезон, более полезны для прогнозирования, чем в сезон дождей. Вегетационные индексы показали более высокую степень корреляции с фитомассой, в сравнение с выборочными спектральными каналами. Разработка показате-

лей аллометрических уравнений для конкретных пород с целью улучшения оценок надземной фитомассы продолжается [3].

Добыча полезных ископаемых привела к деградации значительных площадей естественных экосистем, в то числе и лесных массивов. Эта деградация безусловно снижает уровень связывания углерода в техногенно нарушенном районе, влияя на устойчивость экосистем. Создание моделей распределения углерода позволит определить леса, которые необходимо охранять, и земли, которые можно осваивать. Леса функционируют как хранилища углерода, среда для сохранения биоразнообразия и обеспечения местных жителей [4].

В Хакасии основные территории активно развивающейся горнодобывающей отрасли находятся в аридной степной зоне.

Аридные территории в России составляют 15 % и глобальное потепление климата повысило вероятность засух на них. Одновременно с этой тенденцией повысился интерес к лесоклиматическим проектам по поглощению углерода с использованием механизмов углеродного рынка. При реализации программы лесозащитного адаптационного разведения в аридной зоне России за 30 лет созданные защитные лесные насаждения накопят в зависимости от сценария 376 или 639 млн т С [5].

Депонирование С на рекультивируемых участках горнодобывающей промышленности зависит от возраста рекультивации, породного состава, условий геологии и грунтов, а также климата. Максимальные запасы С сосредоточены в надземном компоненте фитомассы [6].

Для оценки бюджета углерода в наземных экосистемах используются различные базы данных (БД). Так, в Российской Федерации, при учете бюджета углерода в лесах (FCA) [7] применялась БД IIASA, включающая ГИС, содержащей характеристики наземных экосистем страны.

Учеными УГЛТУ под руководством В.А. Усольцева составлена наиболее представительная база данных продукционных характеристик лесов Северной Евразии. Определение и картирование депонируемого лесами углерода может быть осуществлено с помощью программы СУБД ADABAS и редактора приложений к ней Natural. Оценка бюджета углерода лесов данной информационной системой не предусматривается, так как рассчитывается только приходная часть бюджета – чистая первичная продукция [8; 9].

Для Иркутской области, Забайкальского края, Бурятии, Тывы и части Монголии разработана БД с оценками видовой секвестрации CO₂ хвойными лесами. Представлены таблицы и карта суммарной валовой продуктивности древостоев. Годичная секвестрация атмосферного углерода составляет 354,08 млн т С, из них 70 % ассимилируется хвойными лесами Иркутской области и Забайкальского края. Наиболее эффективно ассимилируют углерод лиственные леса (63,8 %). Материалы базы данных могут быть использованы в прогнозных исследованиях влияния глобальных климатических изменений на CO₂-поглотительную функцию хвойных бореального пояса, а также при исследовании возможных факторов риска,

снижающих эффективность секвестрации атмосферного углерода лесными комплексами регионального масштаба [10].

Сравнительный анализ ряда информационных систем оценки запасов и потоков углерода в лесах представлена в статье Д. Г. Замолодчикова [11].

В Хакасии рекультивированы значительные площади отвалов добывающих предприятий, но недостаточно данных для оценки секвестрации углерода восстановленной растительностью (как потенциала, так фактических значений).

Целью работы являлась разработка концепта реляционной базы данных, содержащей количественные оценки секвестрации углерода растительностью на примере модельных техногенно нарушенных участков Республики Хакасия с использованием спутниковой информации.

В работе использована официально рекомендованная методика [12], с учетом руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов [13]. Содержание углерода в травянистой растительности оценивают по методике [12].

Для оценки секвестрации С в древесно-кустарниковой растительности используется метод конверсии объемных запасов насаждений в фитомассу и затем в углерод. Данные по конверсионным коэффициентам обновляются для разных пород и возраста [14; 15].

Концептуальная схема содержит сущности и их атрибуты, связи между сущностями, ограничения, накладываемые на данные, семантическую информацию о данных, обеспечение безопасности и целостности данных. Концептуальная схема – это единое логическое описание всех элементов данных и отношений между ними. В качестве основной идеи для концепта использовалась схема, описанная в работе [16].

Для хранения данных исследования использована открытая кросс-платформенная СУБД SQLite. Благодаря тому, что система базируется на файлах, предоставляется наиболее полный набор инструментов для работы с ней, в сравнении с сетевыми системами, так как в коде реализованы прямые обращения к файлам. Все базы хранятся в файлах. Максимальный объем одной базы не может превышать 2ТБ.

В БД пять основных сущностей (блоков). Блок «**Satellite**» использует спектральные индексы, полученные из свободно распространяемых спутниковых данных Sentinel 2 (архив с 2016) и Landsat-8 (архив с 2000). Сущность предполагает возможность расширения типа используемых спутниковых данных, спектральных индексов, биофизических параметров. Здесь содержатся следующие атрибуты – дата в формате (YYYY.MM.DD), рассчитанные параметры, тип спутника.

В блоке «**Region**» содержится информация о регионе интереса (region of interest, ROI) в векторном формате (*.shp в архиве zip) с уникальным кодом (первичный ключ). Внутри этого региона, есть тестовые участки с собственным уникальным кодом и точки сбора данных.

Блок «**Field data**» включает 3 части. В первой части «**Field data collection**» находятся параметры продукционных характеристик наземных

экосистем: коды региона интереса и тестового участка; площадь земель, га; период времени между экспериментальными измерениями запаса углерода в пуле биомассе на землях, лет; аллометрические коэффициенты из справочной таблицы; категория земель; лесотаксационные параметры (диаметр ствола на высоте 1,3 м, см; высота дерева, м, возраст, года); доминантные растения; показатели сухой фитомассы. Основным атрибутом является фитомасса.

Во второй части «**Greenhouse gases**» содержатся наземные данные по динамике парниковых газов и O_2 , измеренные с помощью газоанализатора. Основные атрибуты сущности: код точки сбора данных; дата и время измерения; высота расположения датчика прибора от поверхности почвы; температура и влажность воздуха; кол-во CO_2 , O_2 , CH_4 .

В третьей части «**Spectral data**» представлены данные по спектральным параметрам отражения солнечного спектра в зонах поглощения пигментами растений, измеренные с помощью спектрофотометра. Эти данные нужны для проверки сведений об функциональных способностях растительных сообществ к поглощению парниковых газов, оценке их состояния и дешифрирования снимков.

В блоке «**Carbon sequestration**» обрабатываются входные сигналы от спутниковых и наземных данных поступающих в БД, и в соответствии с математической моделью, учитывая видовой состав и площадь, вычисляется надземная фитомасса и по ней определяются показатели секвестрации углерода растительностью. Содержит суммарную оценку запасов углерода в надземной фитомассе и изменение в запасах углерода в пуле биомассы, мертвой древесины, подстилки, а также параметры описательной статистики для регионов интереса.

Сущность «**Clients**» содержит информацию о клиентах БД. Потенциальными клиентами базы данных выступают Правительство Республики Хакасия, Министерство природных ресурсов и экологии Республики Хакасии, администрации районов, организации, реализующие проведение независимой экологической экспертизы, хозяйствующие субъекты, осуществляющие свою деятельность на территории Республики Хакасии, организации, осуществляющие биологическую рекультивацию, агротехнические и уходные мероприятия, лесопосадки.

В результате работы проведено выделение сущностей и их атрибутов, определены связи между сущностями. Ключевым показателем для получения данных по секвестрации углерода является надземная фитомасса, все остальные показатели рассчитываются по аллометрическим уравнениям. Администратор может при необходимости создавать новые записи в блоке «**Field data collection**», корректировать аллометрические уравнения, изменять математические модели. Данные организуются в отчет пользователя в системе управления БД и предоставляется клиенту по запросу. Код ROI представляет собой первичный ключ. Оценить секвестрацию углерода растительностью можно по наземным и спутниковым данным отдельно. Вегетационные индексы и при необходимости другие биофизические па-

раметры объединяются с данными полевой инвентаризации для отображения надземной фитомассы. Данные нужны для экономических расчетов углеродных единиц и разработки стратегических решений по достижению регионом углеродной нейтральности.

Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 94 от 13.12.2022 г., научно-исследовательский проект «Оценка секвестрации углерода растительностью техногенно-нарушенных территорий Республики Хакасия», в рамках мероприятия Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь» «Региональная сеть карбоновых полигонов для долговременных наблюдений потоков парниковых газов, тепла и влаги»).

Список источников

1. Кокорин А. О., Липка О. Н., Суляндзига Р. В. Изменение климата Глоссарий терминов, используемых в работе Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). М.: Всемирный фонд природы, 2015 С. 61.
2. Zhang F., Tian X., Zhang H., Jiang M. Estimation of aboveground carbon density of forests using deep learning and multisource remote sensing. *Remote Sensing*. 2022; 14(13):3022. <https://doi.org/10.3390/rs14133022>.
3. Forkuor G., Benewinde Zoungrana J.-B., Dimobe K., Ouattara B., Prasad Vadrevu K., Ebagnerin Tondoh J. Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets – a case study // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 236. 111496, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111496>.
4. Larekeng S. H., Nursaputra M., Nasri, Hamzah A. S., Mustari A. S., Arif A. R., Ambodo A. P., Lawang Y., Ardiansyah A. An assessment of high carbon stock and high conservation value approaches in mining area // *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 807. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/2/022034>.
5. Замолодчиков Д. Г., Никитина А. Д. Потенциал лесоклиматических проектов в аридных регионах России // *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами», посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН (25–29 апреля 2022 г., Москва)*. С. 220–222.
6. Das R., Maiti S.K. Estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine degraded land dominated by *Albizia lebbeck*, *Dalbergia sissoo* and *Bambusa arundinacea* plantation: a case study from Jharia Coalfields, India // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2016. Vol. 3, PP. 246–266. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0131-4>.
7. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia / ИААА Interim Report. 2000. https://www.researchgate.net/publication/23738130_Full_Carbon_Account_for_Russia.
8. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УРО РАН, 2002. 761 с.
9. Усольцев В. А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УРО РАН, 2010. 570 с.
10. Суворова Г. Г. Секвестрация атмосферного углерода хвойными лесами Байкальского природного региона /регистрация базы данных. № RU 2021620963. Россия. Дата регистрации: 04.02.2021.
11. Замолодчиков Д. Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // *Устойчивое лесопользование*. 2012. № 1 (30). С. 41–49.
12. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. М.: Минприроды России, 2017. 115 с.

13. Постиан К., Равиндранат Н. Х., ван Амстел А., Гитарский М., Курц В. А., Огли С., Ричардс Г., Шомоди З. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов // МГЭИК, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>.

14. Усольцев В. А., Часовских В. П., Норицина Ю. В., Норицин Д. В. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ // Сибирский лесной журнал. 2016. №4. С. 68–76.

15. Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Коровин Г. Н. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // Лесоведение, 2005, № 6. С. 73–81.

16. Khan K., Iqbal J., Ali A., Shahid N. Assessment of Sentinel-2-derived vegetation indices for the estimation of above-ground biomass/carbon stock, temporal deforestation and carbon emissions estimation in the moist temperate forests of Pakistan // Applied Ecology and Environmental Research. 2020. № 18. PP. 783-815. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_783815.

A. A. Zhukov¹, A. V. Kleshch¹, E. Yu. Zhukova¹, I. Yu. Botvich²

¹ Katanov State University, Abakan, Russia

² Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoyarsk, Russia

e-mail.ru: zhukov_aa@mail.ru

THE CONCEPT OF THE DATABASE “ESTIMATION OF CARBON SEQUESTRATION BY VEGETATION IN TECHNOGENEOUSLY DISTURBED TERRITORIES OF THE REPUBLIC OF KHAKASIA”

Abstract. The subject of the work is the methodological basis for designing a relational database of ground and satellite data on carbon sequestration by vegetation on the example of technogenically disturbed territories. The aim of the work is to develop a concept for a database in SQLite. To obtain information on carbon accumulation by vegetation, ground methods of direct and conversion accounting are used, as well as calculations based on satellite data based on regression equations. The result of the work is the development of a database concept containing 5 elements – data on carbon sequestration by vegetation, Sentinel 2 satellite data, ground data (forest inventory, phytocenological, spectral and microclimatic parameters), regions of interest and a list of clients. The scope of the results is rational nature management, environmental expertise, the study of the carbon cycle and ecosystem functions in the region.

Keywords: carbon sequestration, technogenically disturbed ecosystems, database, remote sensing

Н. Б. Захарова¹, Б. С. Шевченко^{1,2}

¹ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук,
Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

КОНТРОЛЬ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ О ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ

Аннотация. Проверка и валидация данных спутниковых наблюдений, их дополнительная обработка является актуальной проблемой в задачах мониторинга состояния океанов и морей. В работе исследуются данные о температуре поверхности моря со спутников Aqua, Terra, Sentinel и Suomi NPP с целью выявления случайных и систематических ошибок. Для анализа выделена репрезентативная выборка данных, построены диаграммы рассеяния и линии регрессии. В ходе исследования отмечена сильная корреляция между значениями большинства спутников, однако выявлены ошибки в данных спутников Suomi NPP и Terra и систематические отклонения в данных спутника Sentinel. Исключение случайных и коррекция систематических ошибок позволит получить более точные и согласованные между собой поля данных, и избежать переноса ошибок в наблюдениях на результаты дальнейших исследований.

Ключевые слова: температура поверхности моря, верификация данных, обработка данных, данные наблюдений со спутников, дистанционное зондирование

Введение. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса за состоянием морских акваторий играют важную роль в изучении климата, океанографии и морской экологии. С помощью них можно наблюдать долгосрочные тенденции изменения температуры, выявлять изменения в океанических течениях, а также исследовать причины изменения климата. В настоящее время существует относительно плотные сети наблюдений, позволяющие получать актуальную и полную картину состояния морских акваторий и эффективно решать задачи мониторинга и анализа состояния океанов и морей. Данные наблюдений подвергаются тщательной проверке, но несмотря на четкую организацию процесса наблюдения, возникают погрешности и ошибки, которые требуют исправления. Целью настоящей работы является обработка и верификация данных о температуре поверхности моря, получаемых методом дистанционного зондирования Земли из космоса. Контроль данных позволяет исключить аномальные значения и технические ошибки, чтобы не переносить их на дальнейшие исследования, такие как анализ, прогноз или моделирование состояния морской среды.

В работе используются спутниковые данные о температуре поверхности Черного и Азовского морей за 2015–2021 гг. Данные со спутников

Aqua, Terra, Sentinel и Suomi NPP получены из Центра коллективного пользования «ИКИ – Мониторинг» [1].

Алгоритмы и методы. Для контроля данных дистанционного зондирования строятся диаграммы рассеяния и линейные уравнения регрессии, позволяющие оценить корреляционную зависимость между наблюдениями с различных источников. Сначала строится выборка, обеспечивающая необходимое количество данных для анализа, с учетом частоты наблюдений в разных частях акватории. Данные наблюдений о температуре поверхности моря (ТПМ) предоставлены на расчетной сетке размера $1\,600 \times 800$ узлов (шаг сетки по долготе и широте составляет 0,01 градуса). Среди всех элементов поля со значениями в акватории лежат только 523 281 элемент (остальные элементы – суша). Для проведения анализа определена прямоугольная область D (рис. 1) площадью 52 400 узлов, в которой находится наибольшее количество данных наблюдений со спутников за 2015–2021 гг. Выделенная область позволяет создать репрезентативную выборку по данным о ТПМ Черного и Азовского морей.

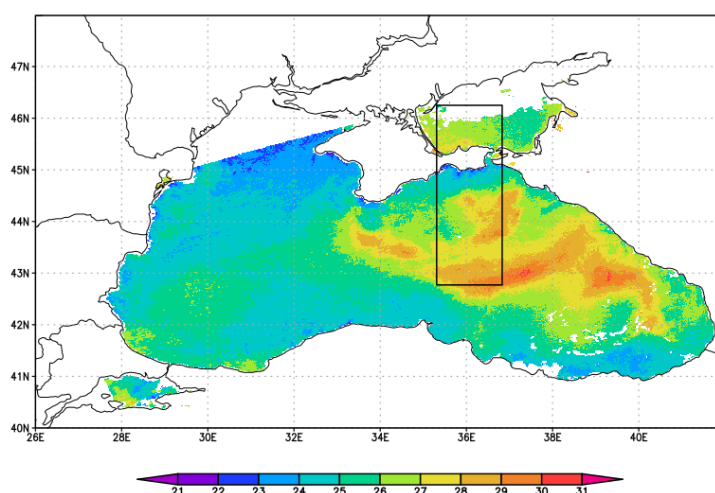


Рис. 1. Выборка узлов сетки в акватории Черного и Азовского морей с наибольшим количеством наблюдений за 2015–2021 гг.

Далее по данным со спутников в выделенной области строится диаграмма рассеяния и модель регрессии. Предполагается, что значения ТПМ с различных источников коррелируют между собой и зависят друг от друга линейно, поэтому в работе строится линейная модель регрессии с использованием метода наименьших квадратов.

Результаты. В работе построены линейные уравнения регрессии для спутников Aqua, Terra, Sentinel и Suomi NPP, чтобы оценить связь между данными. Расчеты показали, что значения температуры, полученные со спутников Suomi NPP, Aqua и Terra сильно коррелируют между собой (коэффициенты корреляции Пирсона $r_{Aqua,SNPP} = 0,998$, $r_{Aqua,Terra} = 0,997$, $r_{SNPP,Terra} = 0,995$), однако встречаются случайные ошибки.

Продемонстрируем некоторые из полученных результатов. На рис. 2, а изображена диаграмма рассеяния, построенная по данным спутников Terra

и Suomi NPP. Из рисунка видно наличие выбросов в данных ТПМ, которые сильно влияют на линию регрессии, и соответственно на выводы относительно корреляции данных. После исключения ошибок в данных Terra (4 из 816 полей) и Suomi NPP (25 из 1 017 полей), можно отметить (см. рис. 2, б), что данные с указанных спутников сильнее коррелируют между собой, зависимость выражается уравнением $y = 0,991x + 0,286$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$.

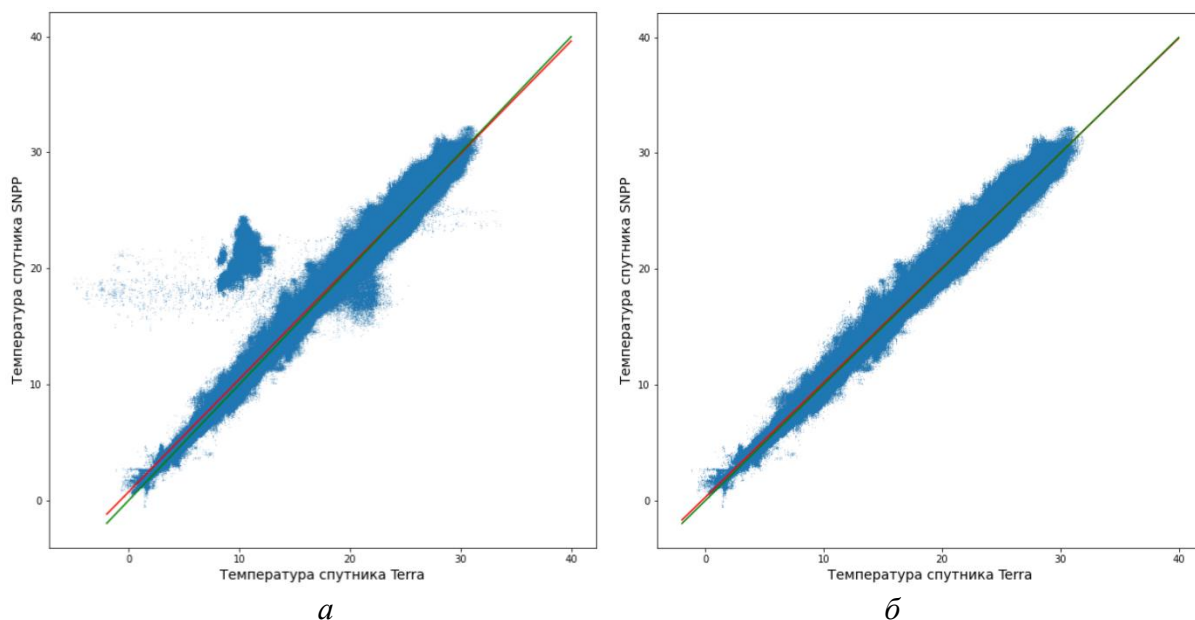


Рис. 2. Диаграмма рассеяния и линия регрессии по данным о ТПМ за 2015–2021 гг. по спутникам Terra и Suomi NPP (а) до и (б) после удаления случайных ошибок

В работе также проанализирована взаимосвязь между данными со спутника Sentinel и остальными спутниками.

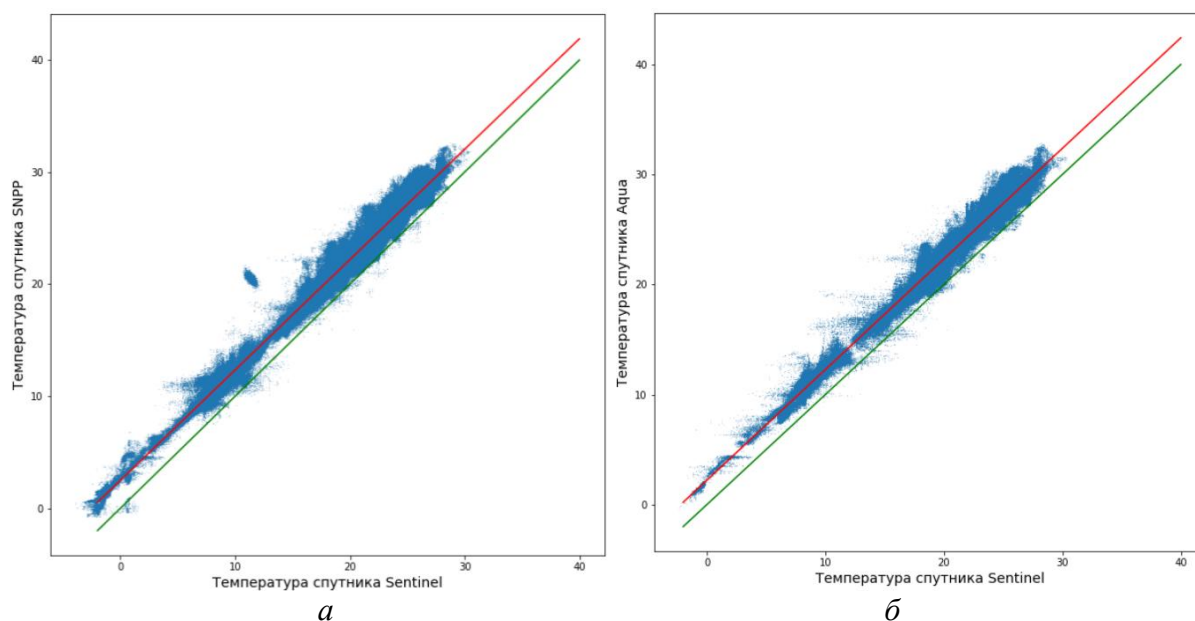


Рис. 3. Диаграмма рассеяния и линия регрессии по данным о ТПМ со спутников за 2015–2021 гг.: а) спутники Suomi NPP и Sentinel; б) спутники Aqua и Sentinel

На рис. 3 видно, что линия регрессии в данном случае смещена по оси y относительно прямой $y = x$, из чего можно сделать вывод, что данные со спутника Sentinel отличаются на константу от данных с других спутников, т. е. имеют систематическую ошибку. Свободный член a в уравнении регрессии определяет сдвиг линии регрессии $a_{Aqua, Sentinel} = 2,22$, $a_{Terra, Sentinel} = 1,65$, $a_{SNPP, Sentinel} = 2,49$.

Определение коэффициентов уравнения регрессии позволяет проводить корректировку данных и получать более согласованные между собой значения ТПМ. Так, чтобы скорректировать данные с ошибкой такого рода, можно внести поправку к значениям ТПМ со спутника Sentinel, с учетом значения свободного члена a в уравнении регрессии.

Заключение. Таким образом, проведен анализ данных о ТПМ, построены диаграммы рассеяния и уравнения регрессии, позволяющие оценить зависимость между данными с различных спутников. Значения со спутников Suomi NPP, Aqua и Terra сильно коррелируют между собой. Удалось выявить и исключить случайные ошибки в данных Suomi NPP и Terra. Данные со спутника Sentinel имеют систематические отклонения от значений других спутников на константу.

Качество исходных данных влияет на дальнейшие исследования, в том числе на точность расчетов при ассимиляции данных наблюдений в численных моделях термодинамики океанов и морей [2]. Коррекция данных дистанционного зондирования может существенно повысить согласованность получаемой информации и, соответственно, увеличить точность расчетов и качество прогнозов модели [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035).

Список источников

1. Лупян Е. А. и др. 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, 263–284.
2. Agoshkov V. I. et al. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics // Physical Oceanography. 2019. V. 26, No. 6, 515–527.
3. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27, No. 1, 95–111.
4. Zakharova N. B., Parmuzin E. I. Data analysis for variational assimilation of the surface temperature of the Black and Azov Seas // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. V. 21, ES6002.

N. B. Zakharova¹, B. S. Shevchenko^{1,2}

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

MONITORING OF EARTH REMOTE SENSING DATA ON THE SURFACE TEMPERATURE OF THE BLACK AND AZOV SEAS

Abstract. Verification of satellite observation data is an urgent problem in the tasks of monitoring the state of the oceans and seas. The paper examines data on sea surface temperature from the Aqua, Terra, Sentinel and Suomi NPP satellites in order to identify random and systematic errors. A representative sample of data is selected for analysis, scattering diagrams are constructed. A strong correlation was noted between the values of most satellites, but errors in the Suomi NPP and Terra satellite data and systematic deviations in the Sentinel satellite data were revealed. The elimination of random and correction of systematic errors will allow to obtain more accurate and consistent observational data, and avoid transferring errors in observations to the results of further studies.

Keywords: sea surface temperature, data verification, data processing, satellite data

The work is supported by the Russian Science Foundation (project №19-71-20035).

С. Т. Им^{1,2,3,4}

¹ Хакасский государственный университет, Абакан, Россия

² Институт леса (подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск, Россия

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: stim@ksc.krasn.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ХАКАСИИ

Аннотация. Проведен ГИС-анализ зависимости динамики состояния растительного покрова Хакасии с климатическими факторами на основе временной серии вегетационного индекса NDVI (MODIS MCD13Q1). Для оценки вклада климатических переменных в анализе использованы попиксельные расчеты множественных линейных регрессий и иерархические регрессии. В целом, для 54 % анализируемой территории наблюдались значимые множественные линейные регрессионные уравнения ($p < 0,05$) зависимости динамики NDVI (2000–2021 гг.) от климатических факторов. Горям соответствовало ~13 % значимых регрессий. Наибольшая доля объясненной дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение 27,1 %), влажности (29,8 %) и температуре (27,3 %) почвогрунтов.

Ключевые слова: южная Сибирь, растительный покров, NDVI, климат

Современные климатические изменения оказывают значимое влияние на состояния растительного покрова Сибири [1]. Отмечается как положительное воздействие температур на растительный покров севера Сибири [2, 3], так и отрицательное – на юге [4]. Для изучения пространственно-временной реакции растительного покрова на динамику климата необходимо использовать данные дистанционного зондирования Земли и методы ГИС. Цель исследования заключалась в анализе реакции растительного покрова Хакасии на динамику климата.

Объект исследования. Анализировался растительный покров республики Хакасии (51.5°–55° с.ш.; 88°–92° в.д.; площадь ~61,5 тыс. кв. км). Территория исследования расположена в Алтае-Саянской стране и относится к трем крупным геоморфологическим регионам (Западному Саяну, Кузнецкому нагорью и Минусинской котловине). В год выпадает 792±30мм осадков. Средняя годовая температура –0,2±0,4°С. Выделяют несколько природных поясов: степной (250–400 м над у.м.), лесостепной (600–800 м), подтаежный (800–1 000 м), горно-таежный (1 000–1 600 м), высокогорный (более 1 600 м).

Материалы. Состояние растительного покрова оценивалось на основе временных серий вегетационных индексов NDVI, излеченных из продукта MOD13Q1 версии 6.1 за 2000–2021 гг. с пространственным разреше-

нием ~250 м (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061>). Климатические данные извлечены из базы данных ERA5-Land за 2000–2021 гг. (<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>; пространственное разрешение ~9 km).

Методика. Из данных MOD13Q1 сгенерированы композитные изображения максимальных годовых значений вегетационных индексов NDVI за 2000–2021 гг. По данным ERA5Land сформированы временные серии климатических данных (температура воздуха, температура и влажность почвы, количество осадков, скорость ветра) за зимний (с декабря предыдущего года по февраль текущего), весенний (март-апрель текущего года), летний (июнь-июль текущего года) и осенний (сентябрь-октябрь предыдущего года) периоды 2000–2021 гг. К композитным изображениям применен корреляционный и регрессионный анализ. Корреляционный анализ позволил отобрать климатические переменные, оказывающие наиболее существенный вклад. Далее, используя выделенные климатические переменные рассчитаны карты множественных линейных регрессий с отбором наилучших уравнений по критерию Акаике. При этом, в каждое уравнение регрессии включалось не более трех независимых переменных. Таким образом, для каждого пикселя на картах получены оценки коэффициентов регрессий, коэффициенты детерминации, и оценен вклад каждой переменной в объясненную дисперсию по методу иерархических регрессий. Использовались только статистически значимые уравнения ($p < 0,05$). Все уравнения тестировались на нормальность остатков (тесты Шапиро-Уилка, Колмогорова-Смирнова; $p > 0,05$) и допущения Гаусса-Маркова ($p > 0,05$). Для расчета регрессионных уравнений созданы скрипты на языке R (<https://www.r-project.org>) в среде R-Studio (<https://www.r-studio.com>). Геообработка производилась средствами ESRI ArcGIS Desktop (<https://www.esri.com>). Для дополнительных расчетов использовался Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Корреляционный анализ показал, что наиболее существенное влияние на динамику растительного покрова оказали летние осадки (su_pre), температуры воздуха (su_tmp), индекс сухости (su_spei), влажность почвогрунтов (su_soil_m), скорость ветра (su_wind); весенние температуры воздуха (sp_tmp) и почвогрунтов (sp_soil_t); осенние влажность почвогрунтов (a_soil_m), количество осадков (a_pre) и температура воздуха (a_tmp); содержание влаги в почвах зимой (w_soil_m).

В целом, только для 54 % анализируемой территории выявлены значимые множественные линейные регрессионные уравнения (ЗМЛРУ; $p < 0,05$; рис. 1, а). За период наблюдений (2000–2021 гг.) пожары происходили преимущественно на непокрытых лесом территориях (~80 %), ~17 % в лиственных и ~2 % в березовых древостоях. Горям соответствовало ~13 % значимых регрессий. После удаления гарей, только 46% анализируемой территории соответствовали ЗМЛРУ, из которых 46 % включали одну независимую климатическую переменную, 28 % – две переменных и 26 % – три переменных (рис. 1, б). Медианное значение коэффици-

ента детерминации по всем ЗМЛРУ составило $R^2 = 0,43$ (в среднем 0,20; после удаления гарей количество ЗМЛРУ = 538 401 штука).

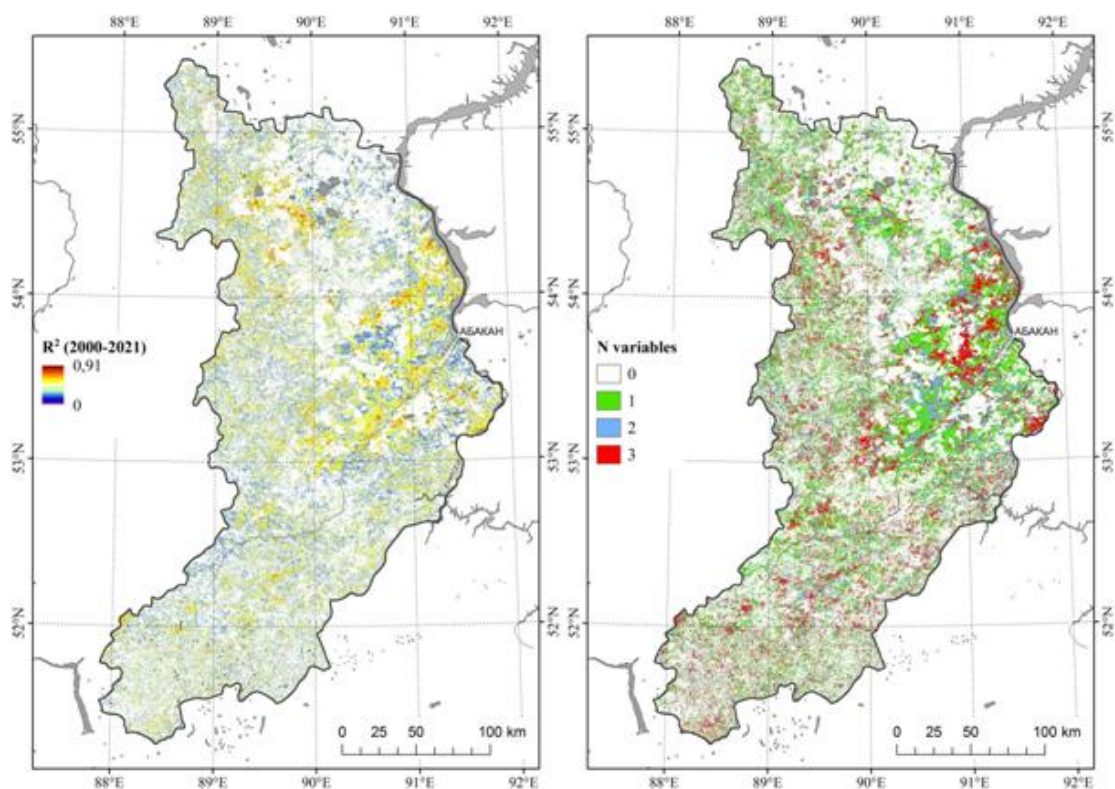


Рис. 1. Картограммы коэффициентов детерминации (а; R^2) и количества независимых переменных (б; N) для наилучших уравнений множественных линейных регрессий ($p < 0.05$), отобранных по информационному критерию Акаике. Уравнения показывают зависимости динамики индекса NDVI за 2000–2021 гг. на территории Хакасии

Наибольшая доля объясненной дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение 27,1 %), влажности (29,8 %) и температуре (27,3 %) почвогрунтов (рис. 2).

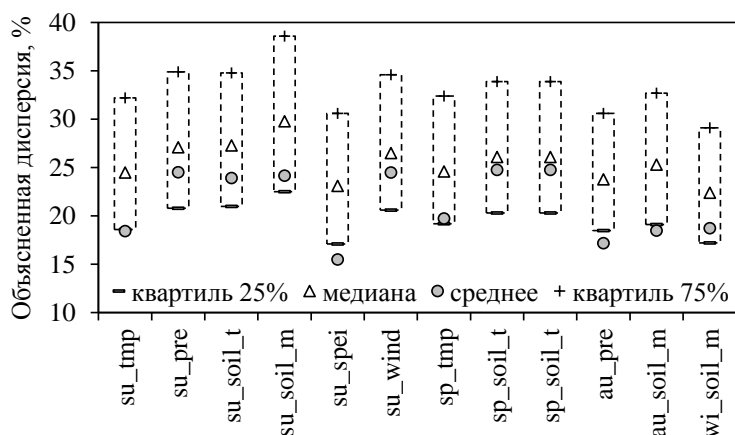


Рис. 2. Доли объясненной дисперсии вариаций NDVI (2000–2021 гг.), приходящиеся на климатические переменные, оцененные по алгоритму иерархических регрессий на основе значимых множественных линейных регрессий ($p < 0.05$) на территорию Хакасии (гари удалены)

Заклучение. В целом, для периода 2000–2021 гг. значимые множественные линейные регрессионные уравнения выявлены для 54 % анализируемой территории. Горям соответствовало ~13 % значимых регрессий. Наибольшая доля объясненной дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение 27,1 %), влажности (29,8 %) и температуре (27,3 %) почвогрунтов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012>) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Список источников

1. Shi S., Wang P., Zhang Y., Yu J. Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia // *Ecological Indicators*. 2021. V. 133. ID 108446. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0688-1>.
2. Myers-Smith I. H., Kerby J. T., Phoenix G. K., et al. Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nature Climate Change*. 2020. V. 10. P. 106–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108446>.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming // *Journal of Mountain Sciences*. 2021. V. 18. P. 3 099–3 108. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2>.
4. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. V. 30, Issue 2. P. 543–556. URL: <https://doi.org/10.1111/geb.13243>.

S. T. Im^{1,2,3,4}

¹ Khakassian State University, Abakan, Russia

² V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

³ Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: stim@ksc.krasn.ru

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC VARIABLES ON THE DYNAMICS OF THE VEGETATION COVER OF KHAKASIA

Abstract. A GIS analysis of the dependence of the vegetation cover dynamics of Khakassia on climatic factors was carried out based on the time series of the NDVI vegetation index (MODIS MCD13Q1). To assess the impact of climatic variables, per-pixel multiple linear regressions and hierarchical regressions were calculated and analyzed. In general, for 54 % of the analyzed territory, significant multiple linear regression equations ($p < 0.05$) were observed for the dependence of NDVI dynamics (2000–2021) on climatic factors. The burned area included only ~13 % of statistically significant regressions. The largest proportion of the explained dispersion corresponded to summer precipitation (median is 27,1 %), soil moisture (29,8 %), and soil temperature (27,3 %).

Keywords: southern Siberia, vegetation cover, NDVI, climate

А. В. Картушинский^{1,2}, И. Ю. Ботвич^{1,2}, С. А. Картушинский¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail:kartalvas@rambler.ru; kartushka@mail.ru

О ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАЗРЫВАХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. В работе обсуждается проблема обработки долговременных рядов наблюдений биологических, метеорологических и гидрологических параметров с различными пространственно-временными масштабами дистанционного зондирования Земли. Рассматривается возможность определения состояния биологических и физических систем по пространственно-временному признаку формы существования процессов квазистатического и интенсивного динамического уровня в условиях микроклиматических и региональных погодных флуктуаций. Факторы, регулирующие последовательное преобразование экологических процессов, могут оцениваться по начальным входным данным математических моделей и соответствующих граничных условий моделирования. Параметры, характеризующие термодинамическое состояние воздушной среды, изучаются как факторы прямой и обратной связи функционирования экологических систем для формулировки биофизических моделей. Обсуждаются функциональные статистические связи между параметрами контактных краткосрочных измерений и данными спутниковых измерений, дистанционных измерений беспилотных летательных аппаратов самолетного типа и дронов (квадрокоптеров).

Ключевые слова: микроклимат и погода, хлорофилл, почвенная растительность, урожайность, температура и влажность воздуха, сила ветра, БПЛА, дроны, спектральные измерения

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в настоящее время считается наиболее распространенным методом исследования земной поверхности, в особенности для реализации технологий для точного земледелия [1; 2]. В основном, используется для мониторинга состояния полей в течение вегетационного периода и обеспечивает эффективность технологий точного земледелия. Дистанционные методы измерения параметров поверхности позволяют контролировать состояние экологических систем как в региональном, так и в глобальном масштабах с использованием спектрофотометрической аппаратуры при помощи аэрокосмических средств [3; 4]. Однако спутниковые данные зачастую дают неточные данные из-за низкого пространственного разрешения получаемых изображений и ограничений по времени съемки. Кроме того, между датой съемки и получением изображений часто требуется длительное время для обработки и совмещения данных по координатной сетке. Также, препятствием

являются условия окружающей среды: облачность, дымка, аэрозоли различного происхождения и т. п.

Развитие систем ДЗЗ на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) существенно продвинуло технологии применения дистанционного зондирования для целей. Использование БПЛА для наблюдения за посевами дает большие возможности для сбора полевых данных простым, быстрым и экономичным способом, по сравнению с другими методами измерений.

Способность БПЛА летать на малой высоте позволяет получать изображения площадей растительности и других экологических систем со сверхвысоким пространственным разрешением (до нескольких сантиметров). Это значительно улучшает возможности систем мониторинга динамики экосистем. Кроме того, системы мониторинга на базе БПЛА имеют высокое временное разрешение, так как их можно использовать с частотой, соответствующей потребности пользователя.

В рамках длительного наблюдения за состоянием земной поверхности, а также за водной поверхностью гидрологических систем, таких как реки, водохранилища, моря возникает насущная потребность структурирования накопленных данных. При этом долговременные ряды наблюдений формируются в соответствующие базы данных и банки данных.

Сформированные факторами атмосферы погодные процессы существенным образом влияют на гидробиологическую структуру отдельных акваторий водных экосистем. Основным биологическим показателем, определяемым на большой площади при помощи дистанционных средств, является концентрация хлорофилла, в том числе и для наземных экосистем. Другие характеристики, которые представляют собой дифференцированные показатели скорости изменения параметров исследуемого объекта (поля), применяются зачастую не в полной мере, особенно для квазистатичных объектов суши. При этом расчеты динамики исследуемых полей основываются на совмещении или композиции исходных изображений (снимков) сравниваемых в абсолютных количественных показателях и усредненных и интерполированных значениях. Проблемы, возникающие на пути познания динамики структурной организации экологических систем, обусловлены применением в математических моделях определенных по результатам измерений масштабов времени и пространства, на которых строится решение дифференциальных уравнений переноса массы и свойств отдельной экосистемы [5; 6].

Циркуляционные потоки в нижнем слое атмосферы, за счет трения о подстилающую поверхность образуют области устойчивого турбулентного перемешивания температуры, влаги и количества движения изменяющего силу ветра. Изучение взаимодействия поверхности почвы, воды и воздуха в совокупности с растительным покровом на уровне микродвижений шероховатости поверхности, является насущной проблемой современного научного знания о разномасштабных факторах влияния на природные системы погоды и климата.

Материалы и методы. Для оценки временных и пространственных масштабов функциональных разрывов данных на примере площади сельскохозяйственных посевов используются данные, полученные в ходе полевых измерений дистанционными и контактными методами. Предусмотрено применение автоматизированных методов измерений влажности и температуры воздуха, атмосферного давления и силы ветра, а также состояния почвы при помощи датчиков сантиметрового размера. Применяется программное обеспечение, выполняющее функции сбора, накопления и хранения данных. Предусмотрены измерения и обработка данных с необходимой калибровкой и привязкой к данным измерений содержания хлорофилла в листьях растений, что позволяет следить за динамикой азотного питания. Упрощенный вид контактного измерителя метеорологических параметров представлен на рис. 1.

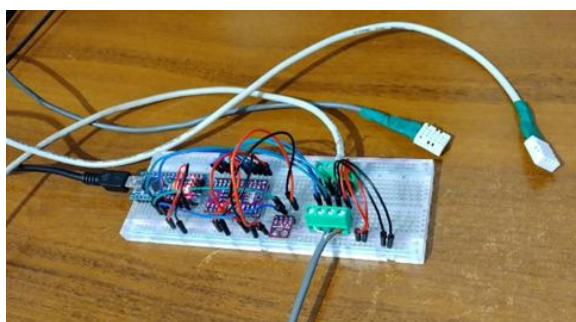


Рис. 1. Прототип платы измерителя («Гирлянда») – часть программно-измерительного устройства, состоящего из отдельных трех датчиков каждый из которых измеряет температуру и влажность воздуха, и на плате – атмосферное давление

В полевых условиях применяется экспериментальная технология проведения контактных измерений температуры воздуха, влажности воздуха и атмосферного давления, а также силы ветра. Для одновременного считывания данных с различной частотой используются три датчика разнесенные на расстояние 3 метра соединенные проводами в гирлянду с микроконтроллером на плате прототипирования. Таким образом, проводятся измерения в горизонтальной плоскости учитывая высоту шероховатости поверхности и, следовательно, высоту растения.

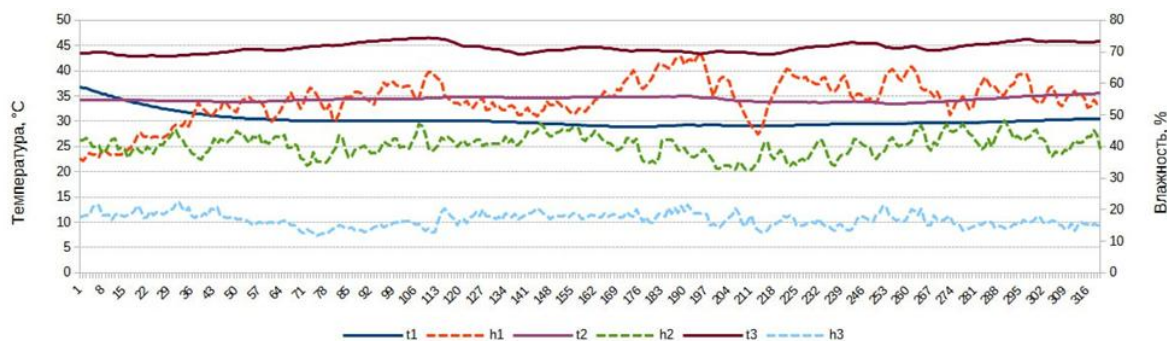


Рис. 2. Графики изменения температуры воздуха и влажности по датчикам в различных определяемых условиях задачи эксперимента в полевых условиях 22/06/23г.:
 $t1, t2, t3$ – датчики измерения температуры воздуха на поверхности земли;
 $h1, h2, h3$ – датчики влажности воздуха на поверхности

Данные с датчиков считываются в базу данных файловой структуры, с последующим форматированием таблиц в Excel для первичной обработки и построения графиков изменения параметров во времени. Пример построения графиков измерения контактными датчиками представлен на рис. 2.

Также в измерительном эксперименте применяется электронный анемометр на разно-уровневом штативе от 50 см до двух метров от поверхности, что соответствует стандартной высоте метеонаблюдений. Контроль содержания хлорофилла в листьях растений осуществляется с применением *N*-тестера (ССМ-200) в плановом режиме совмещения с временем измерения беспилотными летательными аппаратами – БПЛА самолетного типа и дрона.

Полученные данные измеряемых локальных метеопараметров и хлорофилла сравниваются с результатами беспилотных спектральных измерений радиационной температуры и вегетационных индексов (NDVI, CIGreen, NDRE) посевов с помощью DJI Matrice 210 (Zenmuse XT2) и Гео-скан-201 (мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge-MX) на различных интервалах вегетационного периода в 2023 г.

Результаты и выводы. В результате выполненных работ представлены возможности совместного применения контактных и дистанционных методов измерения и обработки данных с учетом функциональных разрывов по пространственно-временному признаку для оценки микроклиматических и погодных факторов на произрастание растительных культур (на примере сельхозпосевов). Показаны возможности совместного применения современных аппаратно-программных средств для обработки и анализа дистанционных и контактных данных. При помощи компьютерной обработки долговременных рядов наблюдений метеорологических и биологических параметров реализована информационная технология для анализа погодных и микроклиматических факторов влияния на мелкомасштабном уровне на опытной площади произрастания сельскохозяйственных культур. На основе методов математической статистики определены связи по изменчивости морфологической структуры растений под действием микромасштабных флуктуаций температуры и влажности воздуха, а также атмосферного давления на уровне шероховатости поверхности приземного слоя атмосферы. Функциональные разрывы долговременных данных наблюдений, полученных аппаратурой разного свойства, необходимо учитывать в моделях по природному показателю устойчивости динамического состояния процесса с соответствующим пространственно-временным масштабом существования – временем жизни.

Список источников

1. Tsouros D. C. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture/ D. C. Tsouros, S. Bibi, P. G. Sarigiannidis // Information – 2019. No. 10. P. 349.
2. Mulla D. J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems engineering – 2013. No. 114. P. 358–371.

3. Bauer M. E., Identification of Agricultural Crops by Computer Processing of ERTS MSS Data/ M. E. Bauer, J. E. Cipra // LARS Technical Reports – 1973. P. 20.

4. Mora A. Land cover classification from multispectral data using computational intelligence tools: A comparative study/ A. Mora, T. Santos, S. Lukasik, J. Silva, A. Falcao, J. Fonseca, R. Ribeiro // Information – 2017. No. 8. P. 147.

5. Картушинский А. В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона / Математическая биология и биоинформатика, Т7, № 1, 2012. С. 112–124.

6. Картушинский А. В., Кукоба Н. А. Градиентные поля поверхности Земли по спутниковым данным // Вестник СибГАУ. 2015. № 3 (16). С. 587–596.

A. V. Kartushinsky^{1,2}, I. Yu. Botvich², S. A. Kartushinsky¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: kartalvas@rambler.ru; kartushka@mail.ru

ON FUNCTIONAL DISCONTINUITIES OF AEROSPACE DATA ON THE EARTH'S SURFACE FOR MODELING ECOLOGICAL PROCESSES

Abstract. The paper discusses the problem of processing long-term series of observations of biological, meteorological and hydrological parameters with different time-space scales of remote sensing of the Earth. The possibility of determining the state of biological and physical systems by the spatiotemporal sign of the form of existence of processes of the quasi-static and intense dynamic level under the conditions of microclimatic and regional weather fluctuations is considered. The factors regulating the consistent transformation of ecological processes can be estimated from the initial input data of mathematical models and the corresponding boundary conditions of modeling. The parameters characterizing the thermodynamic state of the air environment are studied as direct and feedback factors of the functioning of ecological systems for the formulation of biophysical models. The functional statistical relationships between the parameters of ground-based measurements and measurements from satellites, aircraft-type unmanned aerial vehicles and drones (quadcopters) are discussed.

Keywords: microclimate and weather, chlorophyll, soil vegetation, productivity, air temperature and humidity, wind strength, UAVs, drones, spectral measurements

**А. В. Кашницкий, А. А. Антошкин,
П. В. Денисов, В. А. Толпин, К. А. Трошко**
Институт космических исследований РАН
e-mail: kashnizky@gmail.com

ВЕРИФИКАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ О МЕСТАХ ПРОИЗРАСТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ИНДЕКСА NDVI НА ПОЛЕ

Аннотация. При проведении дистанционного мониторинга в области сельского хозяйства часто возникают различные прикладные задачи, в которых без масштабных наземных обследований нужно получить независимую информацию о местах произрастания сельскохозяйственных культур на полях. В данной работе описываются разработанные в ИКИ РАН методы верификации и классификации информации о сельскохозяйственных культурах на полях, основанные на анализе хода среднего значения индекса NDVI на поле в течение сезона. В качестве входной информации выступают контура полей, ряды ежедневных или семидневных композитных изображений на основе спутниковых данных, а также наземная или экспертная информация о культурах на полях. Разработанные методы позволяют только на основе спутниковых данных определить степень достоверности полученной наземной или экспертной информации, найти возможные ошибки и провести классификацию культур на других полях.

Ключевые слова: NDVI, ДЗЗ, классификация сельскохозяйственных культур, верификация наземной информации, сельскохозяйственный мониторинг

Возникающие при сельскохозяйственном мониторинге прикладные задачи, описанные в аннотации, достаточно разнообразны. В независимом получении информации о сельскохозяйственных культурах на полях заинтересованы органы исполнительной власти, сельхозпроизводители, научные организации. В каждом случае набор, полнота и качество имеющейся наземной информации сильно различается, она может быть недостоверна и неполна. Например, имеющаяся у органов исполнительной власти информация о типах культур в отдельных районах может содержать в рамках одного класса ошибки, превышающие половину всей выборки. Кроме того, получение информации о сельскохозяйственных культурах на полях может потребоваться как на достаточно ограниченной территории, так и в масштабах нескольких регионов или страны. В настоящей работе описаны методы верификации и классификации сельскохозяйственных культур на полях на основе дистанционных данных и имеющейся наземной информации. В основе подхода лежат две гипотезы:

1. Полученный по спутниковым данным ход индекса NDVI различен у разных культур. В случае одинакового хода для разных культур они считаются неразделимыми и учитываются как одна.

2. Все поля с одной сельскохозяйственной культурой ведут себя одинаково в пределах локальной территории.

Вне зависимости от особенностей имеющейся наземной информации, разработанный подход предполагает следующие основные операции:

1. Расчет для каждого поля средних значений и формирование рядов хода NDVI в течение сезона по спутниковым данным.

2. Выделение основных трендов на основе кластеризации.

3. Сопоставление трендов и культур по входной информации или с помощью эксперта.

4. Поиск ошибок во входных данных.

5. Классификация культур на неразмеченных полях (с отсутствующей информацией о культурах).

Ряды NDVI на полях формируются в базовом варианте по данным прибора MODIS (спутники AQUA и TERRA). Используются сглаженные интерполированные ежедневные или семидневные ряды композитных изображений индекса NDVI. Несмотря на низкое пространственное разрешение, эти данные обладают высоким временным разрешением. Возможность использования данных с низким пространственным разрешением для полей субпиксельного размера была оценена нами в работе [1]. Также в отдельных случаях возможно формирование рядов по данным приборов MSI (спутники серии Sentinel-2), KMCC (спутники серии Метеор), VIIRS (спутники серии NOAA, Suomi NPP).

Кластеризация выполняется методом OPTICS [2], ее главная задача – найти в выборке все характерные тренды. Далее на основе расстояния между средним за каждую неделю для каждой культуры каждый выделенный тренд сопоставляется с одной или несколькими культурам. В качестве метрики используется евклидово расстояние. На последнем этапе для каждого поля оценивается его расстояние до каждого выделенного тренда. В случае расхождения поле не проходит проверку и ему приписывается культура ближайшего тренда. Пороги для сопоставления и настройки кластеризации подбираются в интерактивном режиме для каждого случая.

Примеры результатов верификации приведены на рис. 1. Выборка и тренды, приведенные на рисунке, получены для культур 2020 г. для одного из районов Воронежской области. Для краткости приведены не все культуры выборки. Зеленым приведен ход NDVI в сезоне для полей с подтвержденной культурой, красным – культура для которых не подтверждена, синим – для которых во входной информации была указана неверная культура.

Результаты работы могут использоваться для контроля достоверности получаемой информации о культурах, планирования наземных обследований и принятия управленческих решений.

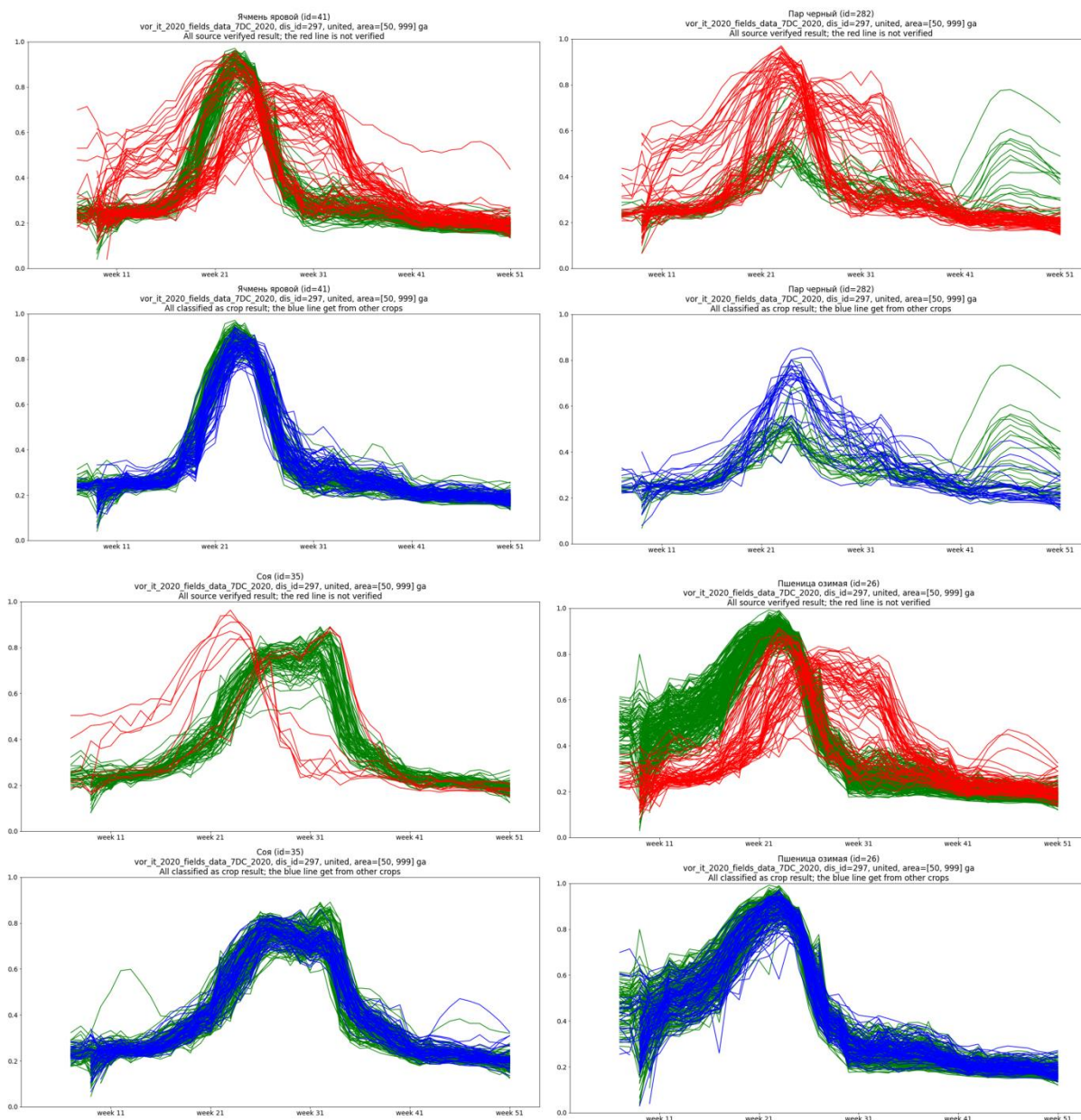


Рис. 1. Ход NDVI на полях с разными сельскохозяйственными культурами

Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг [3].

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122012400187-6.

Список источников

1. Кашницкий А. В., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 60-74. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74.

2. Ankerst, Mihael, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, and Jörg Sander. "OPTICS: ordering points to identify the clustering structure." ACM SIGMOD Record 28, no. 2 (1999): 49–60.

3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашницкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. No. 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

A. V. Kashnitskii, A. A. Antoshkin,
P. V Denisov, E. A. Loupian, V. A. Tolpin, K. A. Troshko
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
e-mail: kashnizky@gmail.com

VERIFICATION OF INFORMATION ON CROP LOCATIONS BASED ON THE AVERAGE NDVI INDEX VALUE IN THE FIELD

Abstract. When conducting remote agriculture monitoring, various applied tasks often arise in which it is necessary to obtain independent information about crop locations in the fields without large-scale ground surveys. This paper describes methods developed at IKI RAS for verification and classification of crop information in fields, based on the analysis of the progress of the mean NDVI index value in the field during the season. The input information is field contours, series of daily or seven-day composite images based on satellite data, as well as ground or expert information about crops in the fields. The developed methods allow to determine the degree of reliability of the received ground or expert information on the basis of satellite data only, to find possible errors and to classify crops in other fields.

Keywords: NDVI, remote sensing, crop classification, ground truth verification, agricultural monitoring

Д. С. Макаров^{1,2}, В. Г. Подопригора^{3,4}, М. Ю. Реушев¹, Д. В. Харламов¹

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН Красноярск, Россия

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: ikivt@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТОГО СНЕГОМ ЛЬДА МЕТОДОМ ГНСС РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Аннотация. Представлены результаты серии измерений амплитудно-временных зависимостей интерференционного поля сигналов навигационных спутников при отражении от слоистой среды снежно-ледового покрова пресноводного озера в зимне-весенний период. По результатам измерений выполнены: первичная выборка данных измерений с использованием облачного сервиса, последующая обработка данных путем быстрого Фурье преобразования и дальнейший анализ результатов с помощью методик, используемых в многолучевой ГНСС рефлектометрии. Результаты исследования могут быть использованы для мониторинга состояния ледового покрова от становления до таяния.

Ключевые слова: ГНСС рефлектометрия, слоистые среды, лед, сигналы навигационных спутников

Известно, что метод многолучевой ГНСС рефлектометрии является перспективным способом для мониторинга состояния ледовых покровов, позволяющий в реальном времени восстанавливать электрофизические параметры исследуемого объекта [1, 2].

Метод основан на регистрации приемником интерференционного поля сформированного в результате суперпозиции прямой электромагнитной волны, распространяющейся от навигационного спутника (НС) (диапазон $L1$, $L2$, длина волны $\lambda \approx 0,19$ м) к приёмной антенне, с волнами отраженными от слоистой структуры льда (снег, лед, вода) [3, 4].

Вследствие зависимости диэлектрической проницаемости структурных слоев ледовых покровов от температуры, влажности и качества поверхности, формирование интерференционного поля также зависит от этих параметров, что позволяет использовать данный метод для определения макрофизических характеристик ледяного покрова (толщина льда, его плотность и т.д.).

Проведена серия экспериментов по регистрации рефлектограмм ледового покрова пресноводного водоема в период от 7 декабря 2022 г. до 21 апреля 2023 г. Красноярск, покрытого снегом (координаты установки антенны – $56^{\circ}03'48.2''N$, $92^{\circ}43'37.7''E$). Съёмка производилась по классической схеме [4] с высотой приёмной антенной на уровне 3,13–3,18 м. Реги-

страция сигналов от НС производилось приемником НСРП-04 и антенной с правокруговой поляризацией. Обновление данных измерений во время каждого сеанса происходила с частотой 1Гц. Временной интервал сеанса записи составлял около 90 минут.

Предварительная обработка данных производилась облачным сервисом первичной обработки [5]. С помощью сервиса были отобраны наиболее информативные сеансы измерений с фильтрацией по следующим критериям: диапазон азимута движения НС от 20° до 180° , угол места восхождения НС над горизонтом в диапазоне от 10° до 40° .

Параллельно, во время каждого сеанса, производились измерения толщин и состояний структуры ледового покрова ручным способом. Результаты измерений структуры покрова приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ледовых покровов

Дата сеанса	Толщина льда, м	Толщина снега, см
7.12.2022	0,4	4–5
22.12.2022	0,51	5–15
05.04.2023	0,9	0–3
21.04.2023	0,68–0,78	1,5–4

Примеры амплитудно-временных зависимостей (АВЗ рефлектограмм), полученных во время сеансов измерений приведены на рис. 1.

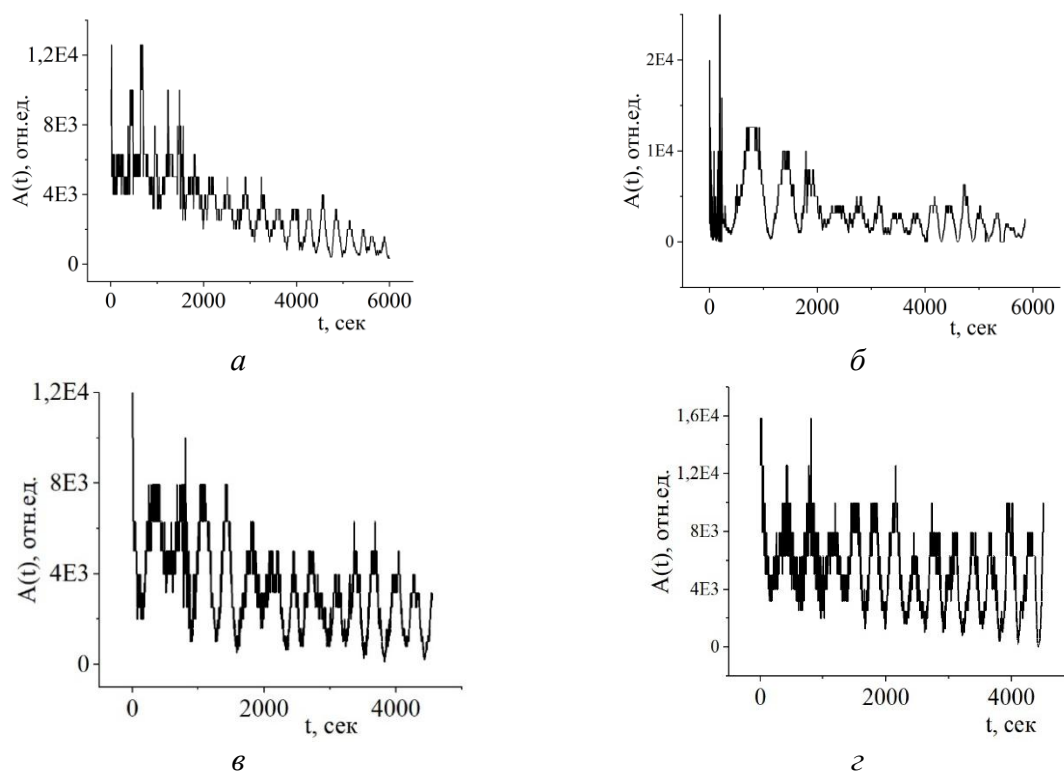


Рис. 1. Примеры АВЗ рефлектограмм, полученных во время сеансов:
 а) НС – GPS 25, 07.12.2022 г.; б) НС – GPS 25, 22.12.2022 г.;
 в) НС – GPS 21, 05.04.2023 г.; з) НС – GPS 21, 21.04.2023 г.

АВЗ, полученные во время сеансов рефлектометрии, были обработаны с помощью стандартного пакета программ Origin 9.6 с использованием быстрого Фурье преобразования (БФП) (). Для приведенных на рис. 1 примеров, спектры, приведены на рис. 2.

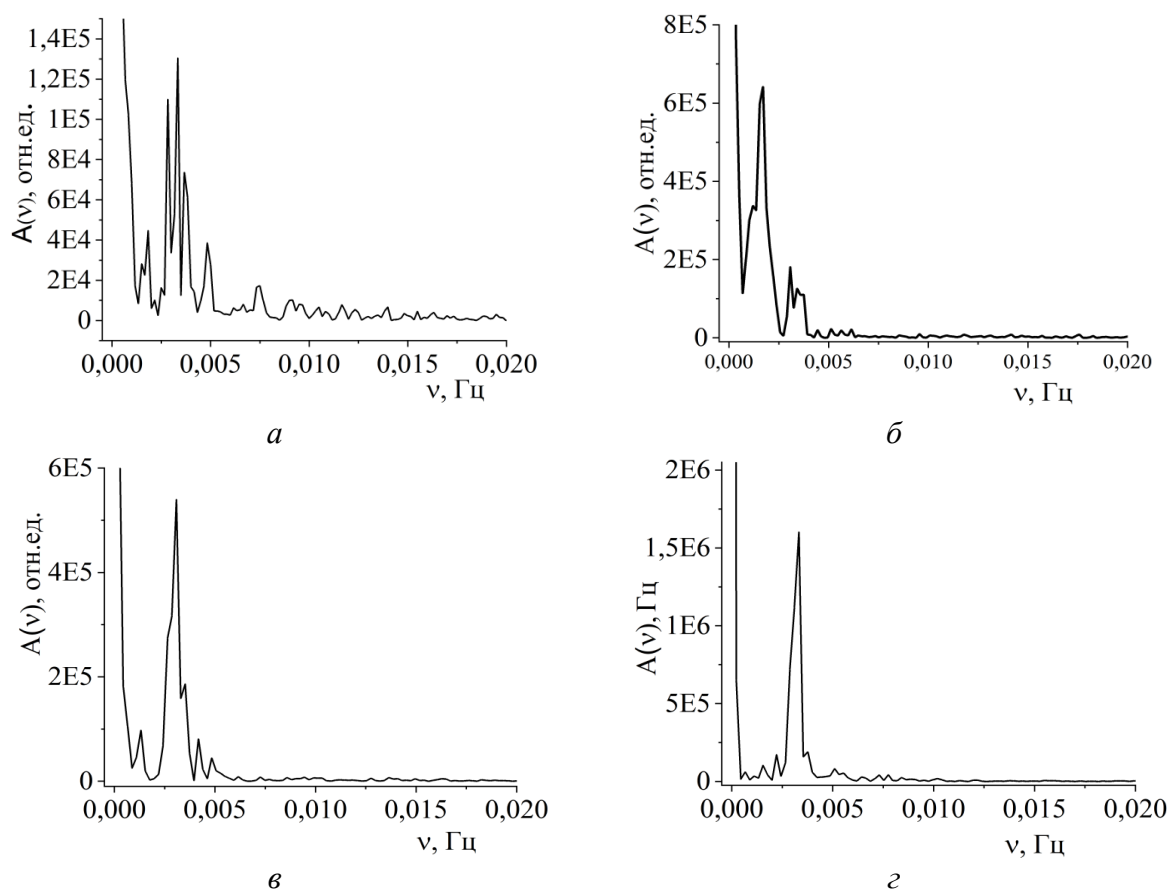


Рис. 2. Результаты обработки рефлектограмм, полученных с помощью БФП:
 а) НС – GPS 25, 07.12.2022 г.; б) НС – GPS 25, 22.12.2022 г.;
 в) НС – GPS 21, 05.04.2023 г.; г) НС – GPS 21, 21.04.2023 г.

Из рис. 2 видно, что при различной толщине льда и снега на его поверхности спектры рефлектограмм отличаются друг от друга.

Для описания результатов ГНСС рефлектометрии льда и леса и расчета параметров сигналов НС, прошедших сквозь слои и отраженных была использована модель многолучевого отражения в рамках геометрической оптики [6]. Численное моделирование на качественном уровне (совпадение порядка 30 %) подтвердило результаты экспериментальных исследований.

Основные выводы работы. Методы ГНСС рефлектометрии, включающие приборные измерения в сочетании с численным моделированием, позволяют оперативно получать информацию о макрофизических характеристиках слоистых структур ледовых покровов поверхностей водоемов. Подобная информация может быть с успехом использована для различных видов хозяйственной деятельности на территории РФ.

Список источников

1. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В. и др. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий: монография // Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. Красноярск: СФУ, 2023 (2023-03-01). 256 с. ISBN 978-5-7638-4704-8.
2. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing // New York, London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.
3. Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Сорокин А. В.. Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 2. С. 261–271.
4. Makarov D. S., Kharlamov D. V., Sorokin A. V. Using signals of navigation satellites in the monitoring of the earth covers // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Т. 20. № 1. С. 8–19.
5. Малимонов М. И., Макаров Д. С., Харламов Д. В. Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырёхканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667433 от 20 сентября 2022 г.
6. Ulaby F., Moore R., Fung A. Microwave remote sensing active and passive. 1990. I-III: Artech House, Inc.

D. S. Makarov^{1,2}, V. G. Podoprigora^{3,4}, M. Yu. Reushev¹, D. V. Kharlamov¹

¹Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

³Institute of Physics named after L.V. Kirensky FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

⁴Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: ikivt@yandex.ru

INVESTIGATION OF ICE COVERED WITH SNOW USING GNSS REFLECTOMETRY

Abstract. The results of a series of measurements of the amplitude-time dependences of the interference field of navigation satellite signals upon reflection from the layered medium of the snow-ice cover of a freshwater lake in the winter-spring period are presented. Based on the measurement results, the following was performed: primary sampling of measurement data using a cloud service, subsequent data processing by fast Fourier transforms and further analysis of the results using the techniques used in multibeam GNSS reflectometry. The results of the study can be used to monitor the state of the ice cover from formation to melting.

Keywords: GNSS reflectometry, layered media, ice, navigation satellite signals

К. Р. Мачука¹, И. А. Керчев², Н. Г. Марков¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
e-mail: kristianrodrigo1@tpu.ru, ivankerchev@gmail.com, markovng@tpu.ru

СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БПЛА

Аннотация. Приведены результаты семантической сегментации мультиспектральных изображений крон деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica*, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов. Исследованы три модели сверточных нейронных сетей, основанные на архитектуре полносверточной сети U-Net и использованные для классификации на таких изображениях деревьев, поврежденных союзным короедом *Ips amitinus*. При этом использованы пять спектральных каналов мультиспектральных изображений. Исследования показали, что результаты по качеству сегментации при применении мультиспектральных изображений лучше, чем в случае изображений RGB.

Ключевые слова: союзный короед, сосна сибирская кедровая *Pinus sibirica*, семантическая сегментация мультиспектральных изображений, полносверточная нейронная сеть U-Net, беспилотный летательный аппарат

Введение. Хвойные леса России, известные своей экологической и экономической ценностью, в последние годы подверглись нашествию различного рода короедов [1]. Оперативный мониторинг и оценка жизненного состояния таких лесов имеют решающее значение для их сохранения [1, 2]. При этом метод семантической сегментации изображений имеет большой потенциал для анализа и понимания состояния пораженных вредителями хвойных деревьев [3].

В данной работе исследуются три модели полносверточных нейронных сетей при решении задачи семантической сегментации деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом *Ips amitinus*, на мультиспектральных изображениях.

Получение и подготовка изображений для анализа. Съёмка деревьев ряда припоселковых кедровников в Томской области проводилась с 10 по 21 мая 2021 г. с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI P4 Multispectral. Для съёмки использовалась его штатная мультиспектральная камера (общее число пикселей: 2,12 млн; каналы: синий (англ. blue, B) – 450 нм, зелёный (green, G) – 560 нм, красный (red, R) – 650 нм, красный крайний (red edge, RE) – 730 нм, ближний инфракрасный (near-infrared, NIR) – 840 нм; угол обзора: 62,7°). Пространственное разрешение изображений, полученных с помощью БПЛА с высоты 150 м, состав-

вило 8 см/пиксель. Сборка ортофотомозаик проводилась с использованием программного пакета DJI Terra.

При визуальном анализе RGB-композиции изображений крон поврежденных короедом деревьев *Pinus sibirica* экспертами выделялось пять классов их жизненного состояния [4]: «Условно здоровое», «Свежезаселенное», «С усохшей вершиной», «Свежий сухостой» и «Старый сухостой». Шестым классом являлся «Фон» – деревья других пород и иные объекты земной поверхности. Разметка деревьев на изображениях по классам дополнялась оконтуриванием их крон, как показано на рис. 1. В итоге получены эталонные карты сегментации.

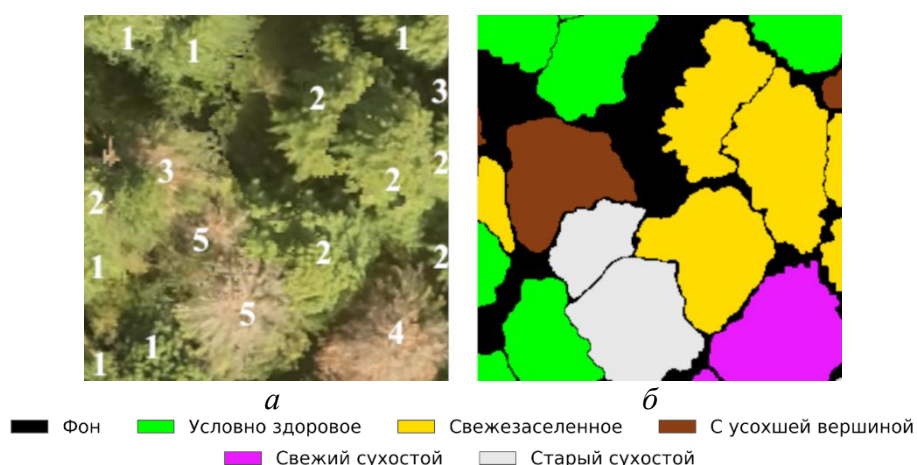


Рис. 1. Фрагмент исходного изображения деревьев *Pinus sibirica* с разметкой по классам (а) и соответствующей ему эталонной карты сегментации (б)

При формировании обучающей, валидационной и тестовой выборок исходные изображения деревьев *Pinus sibirica* и соответствующие карты сегментации были нарезаны на фрагменты размером 256 на 256 пикселей. Всего было получено 4 402 обучающих и 690 валидационных фрагментов изображений. Объем тестовой выборки составил 88 фрагментов.

Модели полносверточных сетей и их обучение. Для решения задачи мультиклассификации деревьев *Pinus sibirica* использовались три предложенные в [4] модели нейронных сетей, каждая из которых основана на модели полносверточной сети U-Net [5], позволяющей вести семантическую сегментацию изображений. В исходную модель U-Net авторами [4] внесен ряд изменений и получена ее модификация. Вторая модель – multihead-U-Net, сокращенно МН-U-Net, имеет существенные особенности по сравнению с модификацией: вместо одного используются три входа и три выхода разных масштабов (256x256x5, 128x128x5 и 64x64x5). Третья модель – multihead-residual-U-Net (МН-Res-U-Net), кроме особенностей модели МН-U-Net имеет также остаточные блоки.

При обучении этих моделей использовалась техника аугментации «на лету». Для оценки эффективности моделей применялись известные метрики *IoU* и *mIoU*. При поиске оптимальных весовых коэффициентов моделей использовался алгоритм оптимизации Adam.

Результаты исследования моделей. Из рис. 2 следует, что исследуемые на тестовой выборке модели способны воспроизводить границы между деревьями и успешно классифицировать значительную часть пикселей. Из табл. 1 видно, что эти модели продемонстрировали высокое качество классификации пикселей классов «Фон», «Условно здоровое», «С усохшей вершиной» и «Старый сухостой». Однако они дают невысокое качество классификации деревьев класса «Свежезаселенное» и «Свежий сухостой». Модели, обученные на мультиспектральных изображениях (5 каналов), дают более высокие результаты.

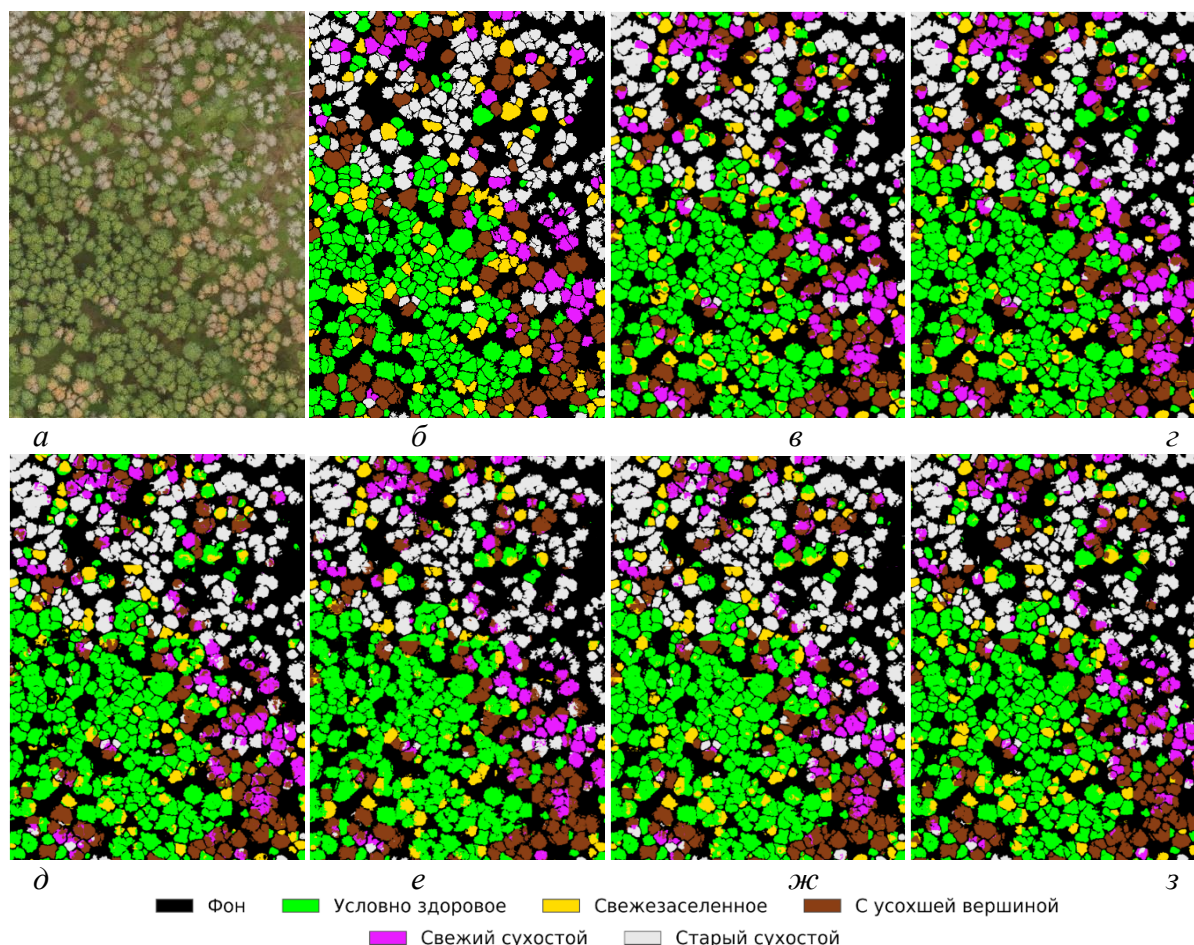


Рис. 2. Результаты сегментации деревьев *Pinus sibirica* на тестовом участке:
 а) изображение RGB; б) эталонная карта сегментации.
 Результаты при обучении на RGB-изображениях:
 в) U-Net; г) МН-U-Net; д) МН-Res-U-Net.
 Результаты при обучении на мультиспектральных изображениях:
 е) U-Net; ж) МН-U-Net; з) МН-Res-U-Net

Таблица 1

Значения метрик качества классификации изображений деревьев *Pinus sibirica*

Модель нейронной сети	Каналы	IoU						mIoU
		Фон	Условно здоровое	Свежезаселённое	С усохшей вершиной	Свежий сухостой	Старый сухостой	
U-Net	RGB	0,793	0,705	0,259	0,543	0,449	0,779	0,58
MH-U-Net		0,791	0,702	0,187	0,557	0,428	0,745	0,56
MH-Res-U-Net		0,789	0,695	0,263	0,539	0,432	0,754	0,57
U-Net	Мульти-спектрал,	0,776	0,702	0,297	0,582	0,467	0,727	0,59
MH-U-Net		0,800	0,716	0,325	0,571	0,415	0,731	0,59
MH-Res-U-Net		0,801	0,713	0,347	0,579	0,428	0,744	0,60

Заключение. Исследованы три модели полносверточных нейронных сетей для классификации изображений деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом. Показано, что эти модели позволяют успешно распознавать на изображениях с БПЛА деревья классов «Условно здоровое», «С усохшей вершиной», «Старый сухостой» и «Фон» (IoU>0.5). Модели, обученные на мультиспектральных изображениях, показывают более высокое качество классификации деревьев пяти из шести классов, чем обученные на изображениях RGB.

Список источников

1. Кривец С. А., Бисирова Э. М., Керчев И. А., Пац Е. Н., Чернова Н. А. Трансформация таежных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий. 2015. № 1. С. 41–62.
2. Kerchev I. A., Krivets S. A., Bisirova E. M., Smirnov N. A. Distribution of the Small Spruce Bark Beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) in Western Siberia // Russian Journal of Biological Invasions. 2022. Vol. 13, No 1. P. 58–63.
3. Керчев И. А., Маслов К. А., Марков Н. Г., Токарева О. С. Семантическая сегментация повреждённых деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 116–126.
4. Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С. Модели U-Net для семантической сегментации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 65–77.
5. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // arXiv preprint arXiv:1505.04597. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf> (дата обращения 10.06.2023).

C. R. Machuca¹, I. A. Kerchev², N. G. Markov¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
e-mail: kristianrodrigo1@tpu.ru, ivankerchev@gmail.com, markovng@tpu.ru

SEMANTIC SEGMENTATION OF UAV MULTISPECTRAL IMAGES OF CONIFEROUS TREES

Abstract. In this work, we provide the results of semantic segmentation of multispectral images of *Pinus sibirica* tree crowns collected with the help of unmanned aerial vehicles. We research three models of convolutional neural networks based on the architecture of the fully convolutional network U-Net for the classification of trees damaged by the small spruce bark beetle *Ips amitinus*. Five spectral channels are used to train networks. Studies show that the segmentation quality results with multispectral images are better than with RGB images.

Keywords: small spruce bark beetle, Siberian pine *Pinus sibirica*, semantic segmentation, semantic segmentation of multispectral images, fully convolutional neural network U-Net, unmanned aerial vehicle

А. Н. Нарыкова, А. С. Плотникова

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
e-mail: Narykovaanna@yandex.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ И КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

Аннотация. Представлены результаты геопространственного моделирования одной из климаторегулирующих услуг лесов – аккумуляция углерода в лесной подстилке и дана оценка точности полученной модели для республики Карелия и территории Карельского перешейка. Обучающая выборка основана на полевых измерениях содержания углерода и запаса подстилки, выполненных в рамках международной программы ICP-Forests. Согласно международной модели SCORPAN, характеризующей факторы почвообразования в цифровом почвенном картографировании, было подготовлено 18 предикторов в Google Earth Engine. Регрессионные модели были построены с использованием метода машинного обучения Random Forest. В качестве показателей оценки производительности модели использовались коэффициент детерминации ($R^2=0,564$) и корень из средней квадратичной ошибки (RMSE = 2,33). Представленные результаты моделирования являются удовлетворительными на данном этапе работы. Полученная модель распространения запасов углерода в лесной подстилке соответствует ранее опубликованным данным.

Ключевые слова: Google Earth Engine, пространственные данные, коэффициент детерминации, Random Forest, лесные экосистемы, климаторегулирующие экосистемные услуги лесов

В связи с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере, вызывающее глобальное потепление климата, у ученых возник интерес к исследованию климаторегулирующих функций лесов. Лесные экосистемы мультифункциональны – одновременно выполняют различные функции и предоставляют человечеству блага в виде экосистемных услуг. Спектр экосистемных услуг лесов очень широк: от заготовки древесины и продуктов питания (грибы, ягоды, лекарственные растения) до накопления углерода, защиты водосборных бассейнов, рекреации и др. К климаторегулирующим экосистемным услугам лесов относят депонирование углерода, регулирование теплового, гидрологического режимов, потоков парниковых газов [8; 11].

В настоящей работе подробно рассматривается одна из климаторегулирующих экосистемных услуг лесов – аккумуляция органического углерода. Целью настоящего исследования является моделирование запасов углерода лесной подстилки на территории республики Карелия и Карельского перешейка с помощью методов машинного обучения на основе геопространственных предикторов и наземных измерений.

В качестве обучающей выборки используются полевые данные, полученные в рамках международной программы ICP-Forests в 2008 г. [3; 9]. Для вычисления запасов углерода подстилки использовались измерения содержания органического углерода (г/кг) и запаса подстилки (кг/м³).

Подготовка предикторов и моделирование аккумуляции органического углерода в лесной подстилке выполняется на платформе для геопространственной обработки данных – Google Earth Engine (GEE) [12]. Для проведения моделирования подготовлено 18 пространственных переменных, характеризующих факторы почвообразования согласно модели SCORPAN, применяемой в цифровом почвенном картографировании [19] (табл. 1). В качестве метода машинного обучения используется Random Forest. Согласно алгоритму, из основной выборки формируются подвыборки с заменой, по которым строится своя модель дерева решений. Из-за большого количества моделей метод получил свое название «случайного леса», так как обобщается множество деревьев, полученных по случайным выборкам. Конечная модель представляет собой взвешенное среднее из всех построенных деревьев решений [6].

Таблица 1

Представление используемых предикторов и источников данных на основе модели SCORPAN

Предикторы в рамках модели SCORPAN	Пространственные предикторы	Источник данных
S	Содержание азота в почве; содержание глины; содержание песка; содержание ила; крупные фрагменты в почве	Почвенные характеристики SoilGrids [5]
	Типы почв	Почвенная карта РФСР, масштаб 1:2 500 000 [13]
C	Среднегодовая температура воздуха; среднегодовое количество осадков; сезонность осадков (коэффициент вариации); максимальная температура самого теплого месяца; минимальная температура самого холодного месяца; осадки самого засушливого квартала	Набор глобальных климатических данных WorldClim [7]
	Температура почв в слое 0–7 см	Атмосферный реанализ ERA5-Land [2]
O	Вегетационные индексы NDVI (нормализованный разностный индекс растительности) и LAI (индекс листовой поверхности)	NDVI получен из набора глобальных климатических данных NOAA Climate Data Record с помощью прибора AVHRR; LAI – набор данных от Global Change Observation Mission [10;17].

Предикторы в рамках модели SCORPAN	Пространственные предикторы	Источник данных
R	Высота над уровнем моря, уклон и экспозиция склонов	Цифровая модель рельефа ArcticDEM, дополненная Глобальной моделью рельефа ETOPO [14;15]
P	Типы почвообразующих пород	Почвенная карта РСФСР, масштаб 1:2 500 000 [13]
A	Возраст, время	–
N	Пространственное положение	Географические координаты (широта/долгота)

Примечание: модель SCORPAN, где S – почвы, C – климат, O – организмы/растительность, R – рельеф, P – материнская порода, A – возраст/время, N – пространственное положение.

В результате использования встроенного в GEE алгоритма *ee.Classifier.smileRandomForest* были получены предварительные результаты геопространственного моделирования запасов углерода в лесной подстилке. Наименьшие запасы углерода в подстилках отмечены на территории Карельского перешейка – от 1,77 до 3,88 кг/м², наибольшие зафиксированы в средней тайге Карелии между Ладожским и Онежским озерами – от 3,28 до 8,15 кг/м², а также вдоль речных долин на побережье Белого моря (от 3 до 5,29 кг/м²). Полученные закономерности соответствуют ранее опубликованным работам [1]. Самые низкие запасы углерода на Карельском перешейке авторы объясняют вдвое меньшей массой подстилки, чем в среднетаежной зоне Карелии. Также в ряде публикаций отмечено продолжительное антропогенное воздействие – ведение сельского хозяйства и внесение удобрений, что могло привести к накоплению гумуса в А/Е горизонте [1; 4]. Высокие запасы в озерном районе можно объяснить как благоприятными условиями образования лесной подстилки, так и составом преобладающих пород. В северной тайге Карелии доминируют сосновые леса с небольшой массой опада, а в средней тайге соотношение еловых и сосновых лесов практически сопоставимо (39 и 37 %).

Производительность полученной регрессионной модели оценена следующими метриками: коэффициент детерминации (R^2) и корень из средней квадратичной ошибки (RMSE, Root Mean Square Error). Коэффициент детерминации составляет 0,583, что является удовлетворительным для промежуточного результата. Такого же порядка значения R^2 были получены в аналогичных исследованиях по почвенному картографированию [16; 20]. На диаграмме рассеяния представлены выбивающиеся значения от непосредственно измеренных в рамках программы ICP-Forests (рис. 1). Корень из средней квадратичной ошибки составляет 2,33. Чем ниже RMSE, тем меньше разница между прогнозируемыми

и наблюдаемыми значениями, следовательно, модель регрессии лучше соответствует исходным данным [18].

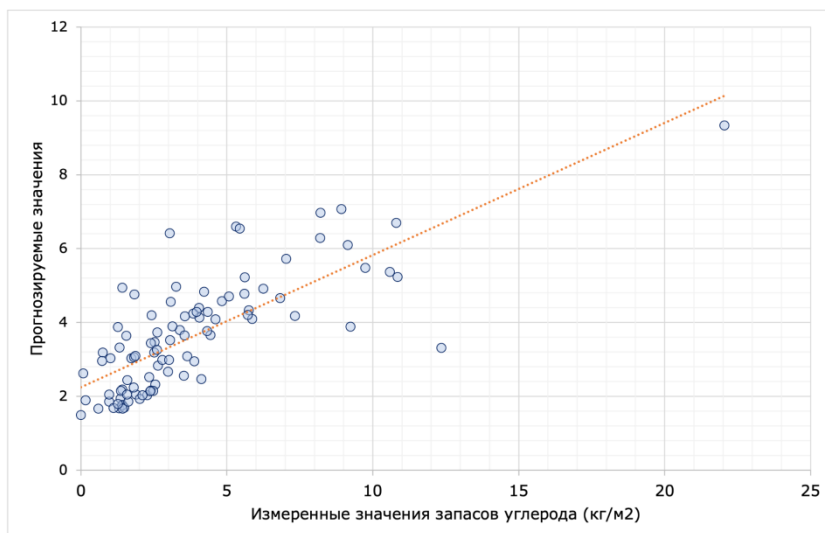


Рис. 1. Диаграмма рассеяния с линией регрессии

В результате исследования была получена первая геопространственная модель запасов углерода в лесной подстилке на территории республики Карелия и Карельского перешейка. Дана оценка эффективности модели с помощью коэффициента детерминации и RMSE. В дальнейшем авторы планируют повысить точность модели за счет использования мультиспектральной информации из разносезонных композитных изображений спутниковой системы Landsat.

Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Климаторегулирующие функции и биоразнообразие лесов» (регистрационный номер 122111500023-6).

Список источников

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н. В. Лукиной. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
2. Атмосферный реанализ ERA5-Land. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>.
3. Бахмет О. Н., Федорев Н. Г., Крышень А. М. Исследования по международной программе ICP-Forests в Карелии. Институт леса Карельского научного центра РАН // Тр. Карельского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 133–139.
4. Волков А. Д. Типы леса Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 192 с.
5. Глобальная почвенная база данных Global Gridded Soil Information (SoilGrids). URL: <https://www.isric.org/explore/soilgrid>
6. Гопп Н. В., Мешалкина Ю. В., Нарыкова А. Н., Плотникова А. С., Чернова О. В. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. № 1.
7. Климатическая база данных Worldclim. URL: <https://www.worldclim.org/>.
8. Лукина Н. В., Гераськина А. П., Кузнецова А. И., Смирнов В. Э., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Тихонова Е. В., Тебенькова Д. Н., Басова Е. В. Функциональная

классификация лесов: актуальность и подходы к разработке // Лесоведение. 2021. № 6. С. 566–580.

9. Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests. М., 2008. 46 с.

10. Набор глобальных климатических данных NOAA Climate Data Record. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01558>.

11. Нарыкова А. Н., Плотникова А. С. Картографирование экосистемных услуг на локальном уровне: обзор современного состояния исследований // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 3. С. 1–33.

12. Облачная платформа для обработки геопространственных данных Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com/>

13. Почвенная карта РСФСР. Под ред. В.М. Фридланда. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГУК, 1988 (Скорректированная цифровая версия, 2007).

14. Цифровая модель ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.

15. Цифровая модель ETOPO Global Relief Model. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.

16. Чинилин А. В., Савин И. Ю. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2018. Вып. 91. С. 46–62.

17. Global Change Observation Mission. URL: <https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM/index.html>

18. Keskin H., Grunwald S., Harris W. Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning // Geoderma. 2019. Vol. 339. P. 40–58.

19. McBratney A. B., Mendoca Santos M. L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. V. 117. Issues 1–2. P. 3–52.

20. Wang S., Xu L., Zhuang Q., He N. Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 758.

A. N. Narykova, A. S. Plotnikova

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: narykovaanna@yandex.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru

THE GEOSPATIAL MODELING RESULTS OF CARBON STOCKS IN THE FOREST LITTER OF THE REPUBLIC OF KARELIA AND THE KARELIAN ISTHMUS

Abstract. We presented results and an assessment of the accuracy of geospatial modeling for one of the climate-regulating forests services – carbon accumulation in forest litter for the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus. The training dataset is based on field measurements of carbon content and litter stock, obtained as part of the international program ICP-Forests. According to the international SCORPAN model, which characterizes soil-forming factors in digital soil mapping, 18 predictors were prepared in Google Earth Engine. Regression models were constructed using the Random Forest machine learning method. We evaluated the accuracy of the models using the coefficient of determination ($R^2=0,564$) and the Root Mean Square Error (RMSE = 2,33). The presented modeling results are satisfying at this stage of the research. The obtained model for carbon stock distribution in forest litter corresponds to previously published data.

Keywords: Google Earth Engine, spatial data, coefficient of determination, Random Forest, forest ecosystems, climate-regulating forest ecosystem services

А. Д. Никитина, А. Н. Нарыкова, А. С. Плотникова, М. А. Данилова
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
e-mail: nikitina.al.dm@gmail.com

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ И КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

Аннотация. В тезисах представлены результаты корреляционного анализа таких свойств почв, как содержание и запас почвенного органического углерода и соотношения C:N в лесной подстилке и минеральном слое 0–30 см, и тематических геопространственных переменных, характеризующих климатические условия, рельеф и растительность на территории республики Карелия и Карельского перешейка. Отмечена значимая корреляция для климатических факторов: среднегодовая температура воздуха, количество осадков в течение года и зимнего периода, высота снежного покрова. Рельеф (высота н.у.м.) имеет слабую корреляцию. Типы растительности значимо отличаются для соотношения C:N в лесной подстилке.

Ключевые слова: спутниковые данные, геопространственные данные, содержание почвенного органического углерода, запасы почвенного органического углерода, отношение C:N, корреляционный анализ

Цель работы – выявление корреляционной связи между геопространственными переменными, которые характеризуют факторы почвообразования, и свойствами почвы. В работе рассматривались следующие почвенные свойства: соотношение C:N (отношение содержания органического углерода в материале на содержание общего азота, содержание (COY) и запасы органического углерода (ЗОУ) в лесной подстилке (горизонт A₀) и слое 0–30 см минеральной толщи почв. Территорией исследования является республика Карелия и Карельский перешеек (КП), расположенный в Ленинградской области.

С 2007 по 2010 гг. на территории Карелии и Карельского перешейка были проведены полевые работы в рамках международной программы по оценке и мониторингу влияния загрязнения воздуха на леса – ICP-Forests. В Карелии было заложено 100 пунктов постоянного наблюдения (ППН) регулярной сети с шагом 32 км, на территории Карельского перешейка – с шагом 16 км [1; 2]. В настоящей работе используются данные 138 ППН [3; 4]. Описание методик отбора и анализа почвенных образцов представлено в Приложении методики ICP-Forests [3].

В работе рассматривались три фактора почвообразования – рельеф, климат и растительность, для выявления корреляционной связи со свойствами почв (табл. 1). Рельеф характеризуют высота н.у.м. и уклон; климат – среднегодовая температура, среднегодовое количество осадков, количе-

ство осадков за летний и зимний периоды, высота снежного покрова и заснеженность территории; растительность – преобладающие лесные породы по данным ICP-Forests (сосновые, еловые и березовые леса) и на основе Карты основных типов растительного покрова Северо-Западной России (светлохвойные, темнохвойные, лиственные и смешанные леса) [5]. Источники данных указаны в табл. 1.

Таблица 1

Источники данных геопространственных переменных

Факторы почвообразования	Геопространственные переменные	Источники данных
Рельеф	Высота рельефа, м	Цифровая модель рельефа Arctic DEM
	Уклон рельефа, °	
Климат	Среднегодовая температура, °С	Глобальная климатическая база данных WorldClim
	Среднегодовое количество осадков, мм	
	Осадки за летний период года, мм	
	Осадки за зимний период года, мм	
	Высота снежного покрова, м	Атмосферный реанализ ERA5-Land
	Заснеженность территории, %	MODIS Terra Snow Cover Daily Global
Растительность	Типы растительности по преобладающей породе	Карта основных типов растительности Северо-Запада России
		Геоботанические данные ICP-Forests

Для проведения корреляционного анализа между геопространственными переменными, характеризующими рельеф и климат, и свойствами почв использовался коэффициент корреляции Спирмена (ρ). Для исследования различий свойств почв в разных типах растительности использовалось множественное сравнение Краскелла-Уоллиса с последующим попарным сравнением. Анализ проводился с использованием ПО Statistica 12.

По результатам анализа содержание углерода в подстилке не показало значимой корреляции ни с одной из рассматриваемых переменных.

Высота н.у.м. имеет значимую, но слабую корреляцию в горизонте 0–30 см для всех исследуемых почвенных свойств, в лесной подстилке значимая корреляция есть только с ЗОУ. Стоит отметить, что в лесной подстилке корреляция ЗОУ с рельефом положительная ($\rho = 0,23$): чем выше положение в рельефе, тем больше значение ЗОУ; а в минеральной толще

обратная ($\rho = 0,19$): чем выше, тем меньше значение ЗОУ. Коэффициент корреляции для СОУ в горизонте 0-30 см составил $\rho = -0,29$. Уклон не показал значимой корреляции со свойствами почв.

Среднегодовая температура имеет значимую корреляцию, коэффициент корреляции варьирует от $\rho = -0,39$ до $\rho = -0,33$ в горизонте A_0 и от $\rho = -0,33$ для отношения C/N до $\rho = 0,35$ с ЗОУ и $\rho = 0,36$ с СОУ в минеральной толще почв. Отмечено, что в горизонте A_0 среднегодовая температура обратно коррелирует с ЗОУ – с увеличением температуры запасы органического углерода уменьшаются, а в горизонте 0–30 см корреляция положительная: чем выше температура, тем выше ЗОУ.

Количество осадков в работе представлено тремя переменными: среднегодовое количество осадков, количество осадков зимнего периода, количество осадков летнего периода. Значения осадков летнего периода имеют меньший коэффициент корреляции для всех переменных в сравнении с осадками зимними и среднегодовыми. Значения коэффициента корреляции осадков зимнего периода несколько выше, чем для среднегодового количества осадков с рассматриваемыми свойствами почв: в горизонте A_0 для ЗОУ $\rho = -0,36$, для соотношения C/N $\rho = -0,39$; в горизонте 0–30 см $\rho = -0,23$ для отношения C/N, для ЗОУ $\rho = 0,39$, для СОУ $\rho = 0,43$. Стоит отметить, что это максимальные значения коэффициента корреляции для всех данных - корреляция осадков зимнего периода и СОУ в горизонте 0-30 см. Для ЗОУ в лесной подстилке температура имеет обратную корреляцию, т.е. чем выше осадки, тем меньше ЗОУ, а для минеральной толщи почв – прямую: чем выше осадки, тем выше и ЗОУ.

Значения коэффициента корреляции свойств почв и характеристикам снежного покрова выше для показателя толщины снежного покрова на основе атмосферного реанализа ERA5-Land. В горизонте A_0 для ЗОУ коэффициент корреляции положительный ($\rho = 0,36$), для отношения C/N $\rho = 0,3$. В горизонте 0–30 см для ЗОУ наблюдается обратная корреляция ($\rho = -0,37$), т.е. чем больше снежного покрова, тем меньше ЗОУ в минеральной толще, но больше в лесной подстилке.

При сравнении классов растительности отмечено, что отношение C/N в подстилке имеет значимые различия хотя бы между парой классов растительности как для классов, полученных по данным ИСР, так и для классов полученных по Карте основных типов растительности Северо-Запада России. Чаще всего значимые отличия наблюдались для классов сосновых\светлохвойных лесов и классов березовых\лиственных лесов или еловых\темнохвойных лесов. В горизонте 0–30 см значимые различия наблюдались лишь для классов по полевым данным ИСР и ЗОУ (сосновые древостои значимо отличаются от других классов).

Полученные результаты корреляционного анализа, будут использоваться при построении пространственной модели распределения запасов почвенного органического углерода в верхних слоях почв исследуемой территории.

Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Климаторегулирующие функции и биоразнообразие лесов» (регистрационный номер 122111500023-6).

Список источников

1. Князева С. В., Эйдлина С. П. Картографическая оценка динамики показателей состояния древесных растений северо-западных регионов России // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. С. 1–33.
2. Лукина Н. В., Орлова М. А., Бахмет О. Н., Тихонова Е. В., Тебенькова Д. Н., Казакова А. И., Крышень А. М., Горнов А. В. Влияние растительности на характеристики лесных почв республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842.
3. Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests. М., 2008. 46 с.
4. Бахмет О. Н., Федорец Н. Г., Крышень А. М. Исследования по международной программе ICP-forests в карелии. Институт леса Карельского научного центра РАН // Тр. Карельского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 133–139.
5. Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга / Коллектив авторов. Под ред. Кобякова К. Н. СПб, 2011.

A. D. Nikitina, A. N. Narykova, A. S. Plotnikova, M. A. Danilova
Center of Forest Ecology and Productivity Problems, RAS, Moscow, Russia
e-mail: nikitina.al.dm@gmail.com

CORRELATION ANALYSIS OF SOIL CARBON DISTRIBUTION FACTORS IN THE REPUBLIC OF KARELIA AND THE KARELIAN ISTHMUS

Abstract. The paper present the results of a correlation analysis of such soil properties as the content and stock of soil organic carbon separately in the forest litter and the mineral soil layer of 0-30 cm, as well as the C:N ratio, and thematic spatial variables characterizing climatic conditions, relief and vegetation, in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus. Ground data is a part of field studies of the international program ICP-Forests (2007–2010). For correlation analysis, the Spearman correlation coefficient for climate variables and terrain information was used. To identify differences in soil properties among the classes of the map of the main types of vegetation in the North-West of Russia and the ICP-Forests geobotanical data, the Kruskal-Wallis multiple comparison method was used. A significant correlation was noted for the following climatic factors: average annual air temperature, average annual precipitation and winter precipitation, snow cover thickness. Terrain variables do not have a pronounced (relief slope) or have a weak (altitude above sea level) correlation. There are significant differences in the classes of vegetation in the North-West of Russia for the C:N ratio in the forest litter. The results obtained in the course of the work will be used to build a spatial model for the distribution of soil organic carbon reserves in the upper soil layers of the study area.

Keywords: satellite data, geospatial data, soil organic carbon content, soil organic carbon stocks, C:N ratio, correlation analysis

Е. В. Павлова

Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия
e-mail: eve21@yandex.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ПРИРОДНОГО КАРКАСА ЮЖНО-МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ

Аннотация. В работе рассматриваются элементы природного каркаса территории ЮМК и ее горного обрамления на локальном уровне. Путем анализа территории выявляются площадные и линейные объекты, способные сохранить биологическое разнообразие и предотвратить деградацию ландшафтов. В работе применяется комплексный подход, с помощью которого большой объем информации формируется в единый Гис-проект, наглядно отражающий территории входящие в природный каркас. Данная работа призвана рекомендовать объекты для расширения системы особо охраняемых территорий для Республики Хакасия и в большей степени для Красноярского края.

Ключевые слова: геоэкология, природный каркас, карта, районирование, Южно-Минусинская котловина, растительность

В соответствии с методическими рекомендациями по подготовке проектов схем территориального планирования субъектов Российской Федерации, необходимо формирование экологического каркаса [1]. Основой формирования экологического каркаса является природный каркас, включающий в себя уникальные природные территории.

Цель исследования – выявить элементы природного каркаса Южно-Минусинской котловины и ее горного обрамления на локальном уровне, для обеспечения экологического равновесия.

В настоящее время активно изучается система особо охраняемых территорий как основа формирования природного каркаса территории (ПКТ), способствующая сохранению биологического разнообразия [2, 3].

Рассмотрев различные иерархические уровни природного каркаса в границах Алтае-Саянской горной области, было выявлено, что в ее границах находятся 8 административных единиц. Далее мы выяснили, какую долю особо охраняемые природные территории (ООПТ) занимают от общей площади в каждой административной единице. Было определено, что наибольшую долю ООПТ занимают в Республике Алтай (24,91 %), достаточно высокие показатели (от 15–10 %) у Республики Хакасия (15,10 %), Кемеровской области (13,00 %) и Республике Тыва (12,05 %). Для регионов с наименьшими показателями в Алтайском (4,7 %) и Красноярском крае (1,28 %), а также Республике Бурятия (0,92 %), долю ООПТ рекомендуется увеличить. Таким образом, существует проблема нехватки таких территорий для поддержания экологического баланса.

Объектом нашего исследования стала территория Южно-Минусинской котловины и ее горное обрамление, расположенная в горах Южной Сибири. В административном плане эта территория находится в Республике Хакасии и на Юге Красноярского края. Для выявления элементов ПКТ нами проанализировано 10 административных районов, 25 утвержденных и планируемых ООПТ и ключевых ботанических и орнитологических территорий, рельеф, климатические условия, пути миграции животных, ключевые ботанические и орнитологические территории. Для сопоставления различных элементов ПКТ с административными территориями использовалась административная и физико-географическая карта. Для выявления элементов на региональном уровне иерархии природного каркаса использовалось геоморфологическое районирование С. С. Воскресенского, Н. И. Михайлова Физико-географическое районирование СССР, для субрегионального и локального уровня использовались схемы районирования Л. К. Зятьковой, О. А. Раковец, В. Б. Сочавы и Д. А. Тимофеева.

Элементами ПКТ являются площадные территории или узлы – массивы леса, а линейные элементы или транзитные коридоры – долины рек. Распределение элементов происходит по различным уровням иерархии, однако они могут меняться на более низких ступенях.

В работе применялся комплексный подход, статистический, картографический и геоинформационный методы исследования. Для верификации модели природного каркаса были проведены математические расчёты и статистический анализ в программе ArcMap 10.2.1. [4]. Для оцифровки элементов ПКТ были дешифрованы космические снимки из открытых источников (earthexplorer.usgs.gov).

Нами выделены элементы четырех иерархических уровней ПКТ – мегарегиональный, региональный, субрегиональный и локальный. Мегарегиональный уровень рассматривается для Алтае-Саянской горной области и включает все административные территории более низкого ранга [5].

В нашей работе мы предлагаем увеличить долю ООПТ для Красноярского края на основании выделенного природного каркаса территории для поддержания экологического равновесия.

Наиболее перспективными объектами для расширения сети ООПТ являются территории в границах Южно-Минусинской котловины и ее горного обрамления, так как в ее границах сосредоточены области с высоким уровнем биоразнообразия, которые расположены на локальном уровне ПКТ.

Узлы каркаса представлены: Лугавским, Инским (Минусинским), Верхне-Койским, Ермаковским борами, выполняющими средообразующую функцию (крупные массивы леса, расположенные на вершинах дюн, в логах и на водоразделах); крупными пресными и солеными озерами – Черным, Красным, Утичьем и Улуг-Коль (места стоянок и гнездования водоплавающих и околоводных птиц). **Линейными** элементами являются долины малых рек (рр. Она, Таштып, Аскиз, Уйбат) с сохранившимися ес-

тественными участками растительности по берегам, которые выполняют транзитную функцию (рис. 1).

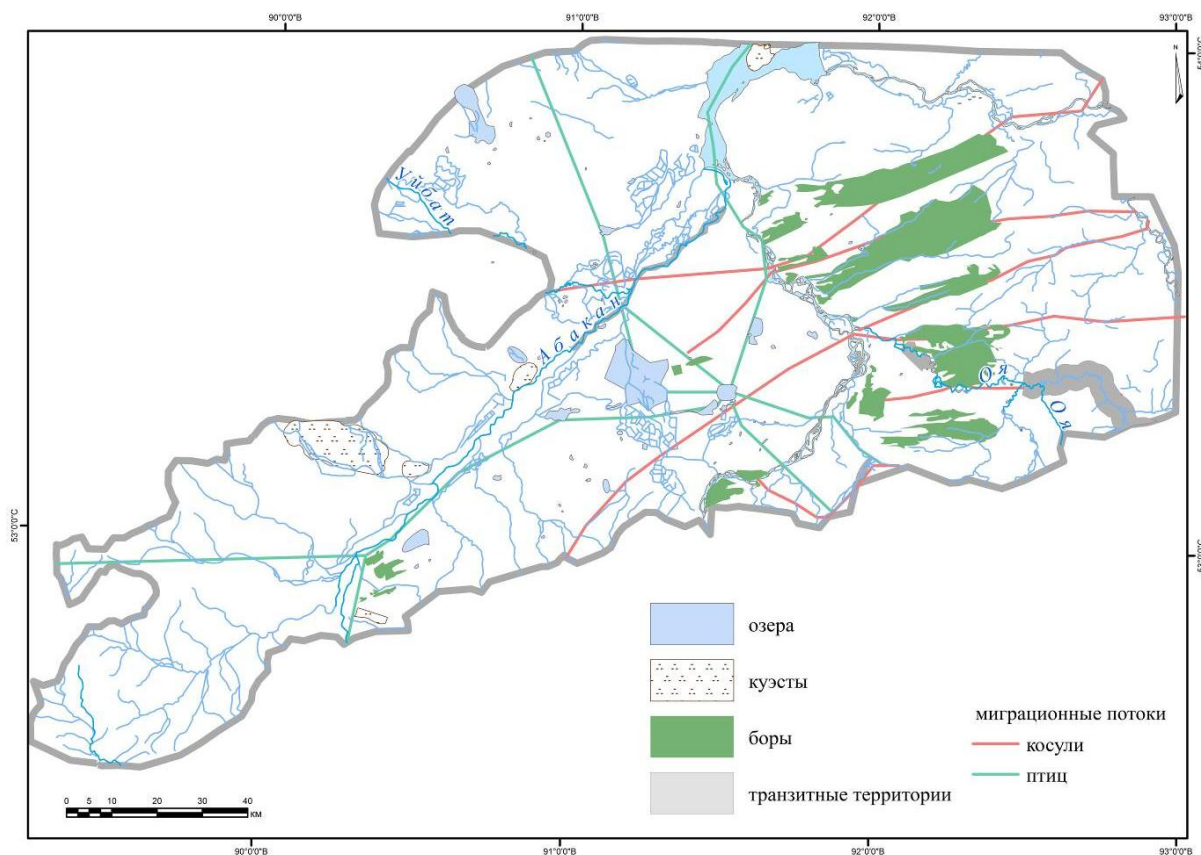


Рис. 1. Природный каркас локального уровня

В результате проведенных исследований были выявлены четыре уровня районирования природного каркаса Южно-Минусинской котловины: мегарегиональный, региональный, субрегиональный, локальный. С помощью программы ArcMap 10.2.1. составлены картографические схемы для каждого из уровней районирования. Проведен анализ миграционных путей косули и перелетных птиц, на основе выявленных направлений был составлен перечень особо ценных территорий в границах Южно-Минусинской котловины и ее горного обрамления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012/> при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасии.

Список источников

1. Приказ Минрегиона России «Об утверждении Методических рекомендаций по подготовке проектов схем территориального планирования субъектов Российской Федерации» от 19 апреля 2013 года N 169. // URL: <https://docs.cntd.ru/document/499017648?ysclid=ll895p2usl317229087>.

2. Щербакова Е. А. Краткий обзор ООПТ степной зоны Европейской России как основы природно-экологического каркаса сельскохозяйственных регионов // Университетский

комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург: ОГУ, 2020. С. 1 092–1 097.

3. Чибилёв А. А. (мл.), Мелешкин Д. С., Григорьевский Д. В. Роль особо охраняемых природных территорий регионов степного пояса Азиатской России в сохранении биоразнообразия // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 182–187. DOI: 10.17513/use.37383.

4. Павлова Е. В. Анализ устойчивости природоохранной системы и оптимизации конфигурации ядер экологического каркаса Южно-Минусинской котловины с использованием геоинформационных систем / Е. В. Павлова // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 4(54). С. 64–69. DOI 10.25714/MNT.2022.54.009.

5. Павлова Е. В. Структурные компоненты природного каркаса мегарегионального уровня Южно-Минусинской котловины // Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Вологда, 27 сентября 2017 года. Том Часть 2. Вологда: ООО «Маркер», 2017. С. 120–123.

E. V. Pavlova

Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

e-mail: eve21@yandex.ru

ELEMENTS OF THE NATURAL FRAMEWORK OF THE SOUTH MINUSINSK BASIN OF THE LOCAL LEVEL

Abstract. The paper considers the elements of the natural framework of the YMK territory and its mountain framing at the local level. By analyzing the territory, areal and linear objects are identified that can preserve biological diversity and prevent degradation of landscapes. The work uses an integrated approach, with the help of which a large amount of information is formed into a single Gis project that clearly reflects the territories included in the natural framework. This work is intended to recommend facilities for expanding the system of specially protected areas for the Republic of Khakassia and, to a greater extent, for the Krasnoyarsk Territory.

Keywords: geocology, natural framework, map, zoning, South Minusinsk basin, vegetation

Е. И. Пармузин^{1,2}, В. П. Шутяев^{1,3}

¹ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук,
Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
e-mail: e.parmuzin@inm.ras.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ К ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ВАРИАЦИОННОЙ АССИМИЛЯЦИИ

Аннотация. Рассмотрена задача вариационной ассимиляции данных для модели динамики Черного моря, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук. Подход основан на методе расщепления и минимизации функционала стоимости, связанного с данными наблюдений, путем решения системы оптимальности, которая включает прямые уравнения, сопряженные уравнения и условие на управление, а также наблюдения со спутников и ковариации фоновой ошибки и ошибки наблюдений. Исследована чувствительность функционала от решений задачи к данным наблюдений для рассматриваемой задачи вариационной ассимиляции данных. Представлены результаты численных экспериментов для рассматриваемых акваторий Черного, Азовского и Мраморного морей.

Ключевые слова: вариационная ассимиляция, оптимальное управление, сопряженные уравнения, чувствительность функционалов от решения, данные наблюдений со спутника

Введение. Методы исследования и численного решения вариационных задач усвоения данных, представляющих конкретные задачи оптимального управления, в последнее время получили широкое развитие в метеорологии и океанографии. Наблюдательные данные усваиваются в моделях атмосферы и океана с целью получения начальных и граничных условий или других параметров модели для последующего моделирования и прогнозирования. Наряду с изучением разрешимости, разработкой и обоснованием численных методов решения задач вариационного усвоения данных наблюдений, анализ чувствительности оптимальных решений и их функционалов к ошибкам данных наблюдений играет важную роль [1, 2]. В настоящей работе проведено исследование чувствительности функционалов от оптимального решения задачи вариационного усвоения данных с целью восстановления потоков тепла на поверхности моря. Сформулирован алгоритм вычисления градиента функционала и приведены результаты численных экспериментов для модели динамики Черного моря [3], разработанной в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук.

Источником данных в предлагаемом исследовании выступает спутник Aqua со спектрометром MODIS. Эти данные были предоставлены сервисом «See the Sea», входящим в состав ЦКП «ИКИ Мониторинг» [4].

Описание постановки задачи. Рассматривается трехмерная модель динамики моря, разработанная в ИВМ РАН [3]. Модель основана на системе уравнений, записанных в приближении Буссинеска и гидростатики. Система уравнений дополняется начальными и граничными условиями. Для аппроксимации модели по времени используется метод расщепления. В работе рассматривается функционал отклика, зависящий от температуры поверхности моря. Чувствительность функционала будет определяться градиентом этого функционала по данным наблюдений, который определяется производной Гато. В результате, используя систему оптимальности, которая выводится при решении задачи вариационной ассимиляции данных [1], алгоритм вычисления градиента функционала G по отношению к данным наблюдений может быть записан следующим образом:

$$1) \text{ решается сопряженная задача } -(\varphi^*)_t + L^* \varphi^* = \partial G / \partial T, \quad \varphi^* = 0 \text{ при } t = \bar{t};$$

$$2) \text{ находится } \eta \text{ как решение уравнения } H\eta = \varphi^* \Big|_{z=0} + \partial G / \partial Q;$$

$$3) \text{ решается прямая задача } (\varphi)_t + L\varphi = B\eta, \quad \varphi = 0 \text{ при } t = 0;$$

$$4) \text{ находится градиент функционала по формуле } \partial G / \partial T_{obs} = m_0 R^{-1} \varphi \Big|_{z=0}.$$

Здесь L – оператор конвекции-диффузии, оператор сопряженный к L , R – ковариационная матрица ошибок данных наблюдений, H – гессиан функционала стоимости, который может быть определен решением специальной системы [2]. В данной работе в качестве функционала G был рассмотрен функционал вида:

$$G = \frac{1}{\tau} \int_{\bar{t}-\tau}^{\bar{t}} dt \frac{1}{mes\omega} \int_{\omega} T(x, y, 0, t) d\Omega.$$

Описанный алгоритм использовался в численных расчетах для оценки чувствительности функционала, связанного с температурой после усвоения данных наблюдений.

Численные эксперименты. Для проведения численных экспериментов были выбраны акватории Черного, Азовского и Мраморного морей. Шаг сетки по долготе равен $0,05^\circ$ и по широте $0,036^\circ$. Шаг по времени в модели выбирался равным 150 секундам. Расчет производился на один год (2019) с начального состояния, соответствующего среднеклиматическому значению параметров на январь.

На рис. 1, а приведены данные наблюдений, полученные со спутника Aqua, на момент расчета чувствительности функционала от решения задачи. Заметим, что данные в этот момент времени известны только на части акватории, а области в акватории Черного и Азовского морей с от-

сутствием данных окрашены в белый цвет. Результаты расчета чувствительности функционала от решения задачи для 28 мая 2019 г. показаны на рис. 1, б. Из рисунка видно, что зоны, выделенные на рисунке красным цветом, в которых функционал G наиболее чувствителен к ошибкам в наблюдениях при проведении процедуры усвоения данных расположены у берегов, а также в менее глубокой северо-западной части Черного моря. Также отметим большую чувствительность функционала во всей акватории Азовского моря, где глубина моря не превышает 12 м. В центральной части Черного моря, с глубинами порядка 2 000 м, наоборот наблюдается минимальная чувствительность, на 2 порядка меньше, чем в области с наибольшей чувствительностью.

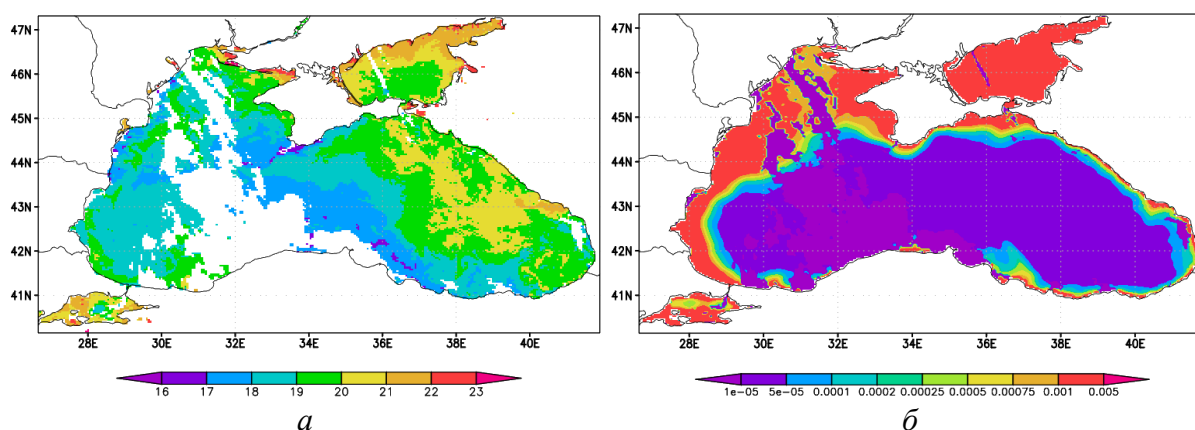


Рис. 1. Результаты численного эксперимента, 28 мая 2019 г.:

а) значения ТПМ, спутник Aqua, 23 часа 30 минут, °С; б) градиент функционала G

Таким образом, рассматриваемый функционал оказался наиболее чувствительным к погрешностям наблюдений в точках поверхности вблизи этих областей. Там, где данные наблюдений отсутствовали, градиент функционала не рассчитывался и на рисунке в этих областях получают нулевые значения.

Заключение. С использованием трехмерной модели гидротермодинамики Черного моря, разработанной в ИВМ РАН, в настоящей работе проведено исследование чувствительности функционалов от решения задачи вариационного усвоения данных с восстановлением потоков тепла на поверхности моря. Разработанный алгоритм позволяет вычислять градиенты функционалов от решения задачи после ассимиляции с учетом ковариационных матриц ошибок данных бэкграунда и данных наблюдений. Проведенные исследования могут быть полезны для решения проблемы определения районов моря, в которых функционалы от оптимального решения являются наиболее чувствительными к произвольным возмущениям в исходных данных при использовании процедуры вариационной ассимиляции, в том числе в случаях, когда значения этих возмущений заранее не известны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-11-20057).

Список источников

1. Agoshkov V. I., Parmuzin E. I., and Shutyaev V. P. Observational data assimilation in the problem of Black Sea circulation and sensitivity analysis of its solution. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 49 (2013), No. 6, 592–602.
2. Gejadze V. P. Shutyaev, and F.-X. Le Dimet, Analysis error covariance versus posterior covariance in variational data assimilation. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 139 (2013), 1 826–1 841.
3. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V., Moshonkin S. N., Demyshev S. G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2012. V. 27, No. 1, P. 95–111. DOI:10.1515/rnam-2012-0006.
4. Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Loupian E. A., Radchenko N. V., Sychugov I. G. "IKI-Monitoring" shared use center support and development – possible solutions // *Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2020. V. 17, No. 6, 51–55.

E. I. Parmuzin^{1,2}, V. P. Shutyaev^{1,3}

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

e-mail: e.parmuzin@inm.ras.ru

STUDY OF THE MODEL SENSITIVITY TO THE SATELLITE OBSERVATIONAL DATA IN VARIATIONAL DATA ASSIMILATION

Abstract. The problem of variational data assimilation for the Black Sea dynamics model developed at the Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences is considered. The approach is based on the splitting method and minimizing the cost functional associated with observational data by solving an optimality system that includes direct equations, adjoint equations and equation for control, as well as satellite observations and covariance matrices of observation and background errors. The sensitivity of functionals of solutions to observational data is studied for the considered variational assimilation problem. The results of numerical experiments for the considered water area of the Black Sea of Azov and the Sea of Marmara are presented.

Keywords: variational assimilation, optimality system, adjoint equation, sensitivity of functionals, satellite observation data

The work was supported by the Russian Science Foundation (project 20–11–20057).

Д. А. Перфильев

Сибирский федеральный университет, Красноярск Россия
perfiljev7775@yandex.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ КИСЛОТНОСТИ ПОЧВЫ

Аннотация. В статье предлагается интеллектуальная технология сегментации однородных по динамике частоты областей изображения. В статье приведен пример самонастраивания правила сегментации по трем классам кислотности почвы, опытного участка сельскохозяйственных земель Восточной зоны Красноярского края.

Ключевые слова: интеллектуальная технология, сегментация изображения, правило сегментации и интерпретации кислотности почвы

В области анализа изображения, задачи сегментации и интерпретации физических свойств объектов по-прежнему остаются ключевыми [1–3].

В [1–5] отмечается, что ключевым показателем определяющим энергетическое состояние плодородия сельскохозяйственных земель является ее кислотность. На рис. 1, [6, 7] представлено изображение кислотности опытного участка п. Степняки зоны ответственности САС «Солянская» Красноярского края.

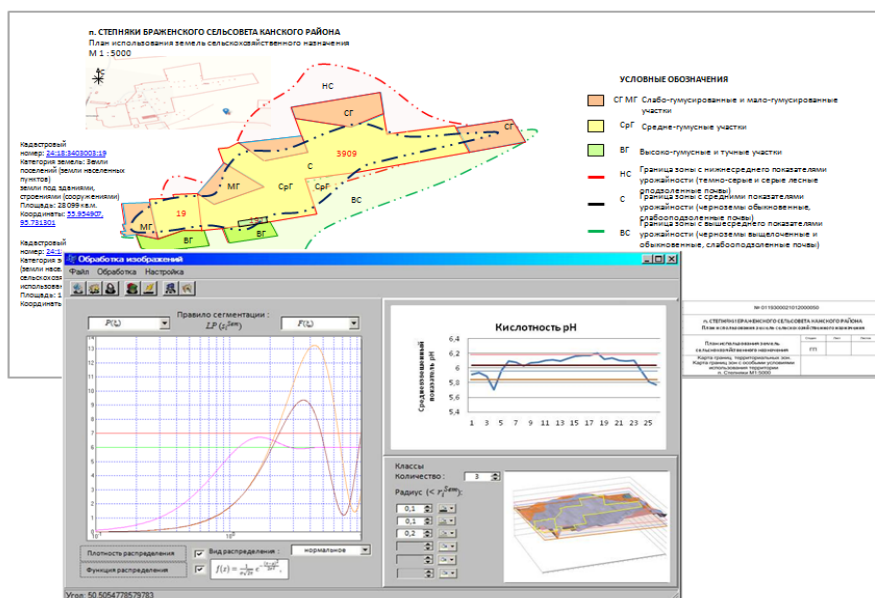


Рис. 1. Анализ частотной характеристики изображения кислотности опытного участка п. Степняки

В [4, 6, 7] отмечается, что кислотность опытного участка неоднородна. Центральная, сегментированная область, покрывает весь исследуе-

мый район земель сельскохозяйственного назначения п. Степняки. Эта область относится к классу «близко к нейтральной» почвенной среде (5,9 рН), относительно севернее расположенных более кислых и южнее нейтральных почв. Северная часть тяготеет к понижению кислотности среды до слабокислой почвы 5,6 рН, а южная часть к повышению кислотности до нейтральной среды 6,2 рН.

Вычисление радиуса r_i^{Sem} однородности для i -того класса выполняется от особой точки интегрирования i -того класса следующим образом:

$$\omega_{0i} = \mu_{cp} \pm \frac{r_i^{Sem} \sigma}{\sqrt{n}},$$

где n – количество измерений.

В результате характеристика $f(\omega_r)$, позволяет сформировать границы классов областей изображения радиусом r_i^{Sem} , отражающих однородные свойства кислотности.

Однако положение особой точки интегрирования для i -того класса не является точно определенной величиной на основе, которой можно точно интерпретировать текущее состояние кислотности почвы. В реальных условиях модель кислотности должна изменяться в соответствии с текущими результатами анализа показателя почвы. По этой причине центры классов перемещаются вдоль признаковой прямой, отражая повышение или понижение кислотности на настоящий момент времени.

Особенность интеллектуальной технологии. Каждый класс с центром a_i^* и радиусом однородности r_i^{Sem} перемещается в направлении заданного правилом интерпретации значения плотности сегментированных результатов на данный момент. Самонастраивание (адаптация) значения $Lp(s_i^{Sem})$, позволяет находиться в оптимальном состоянии: величины сектора сегментации, направления и глубины перемещения по изображению, как это схематично представлено на рис. 2.

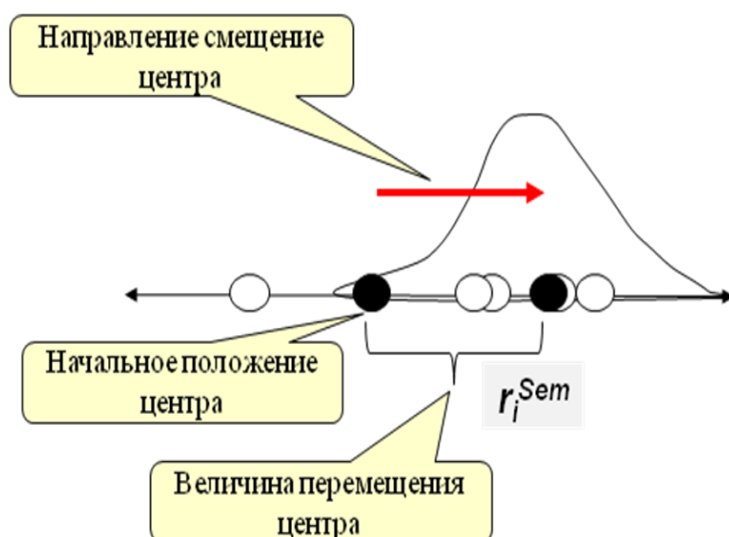


Рис. 2. Технология самонастраивания

Сужение сектора сегментации и глубины анализа изображения обычно приводит к значительному перемещению класса и наоборот.

Особенностью интеллектуальной технологии сегментации изображения является то, что определение направления движения, глубины и величины сектора сегментации ограничиваются за счет текущего массива данных. На рис. 3 представлена динамика перемещения трех классов кислотности почвы по данным сегментации изображения опытного поля.

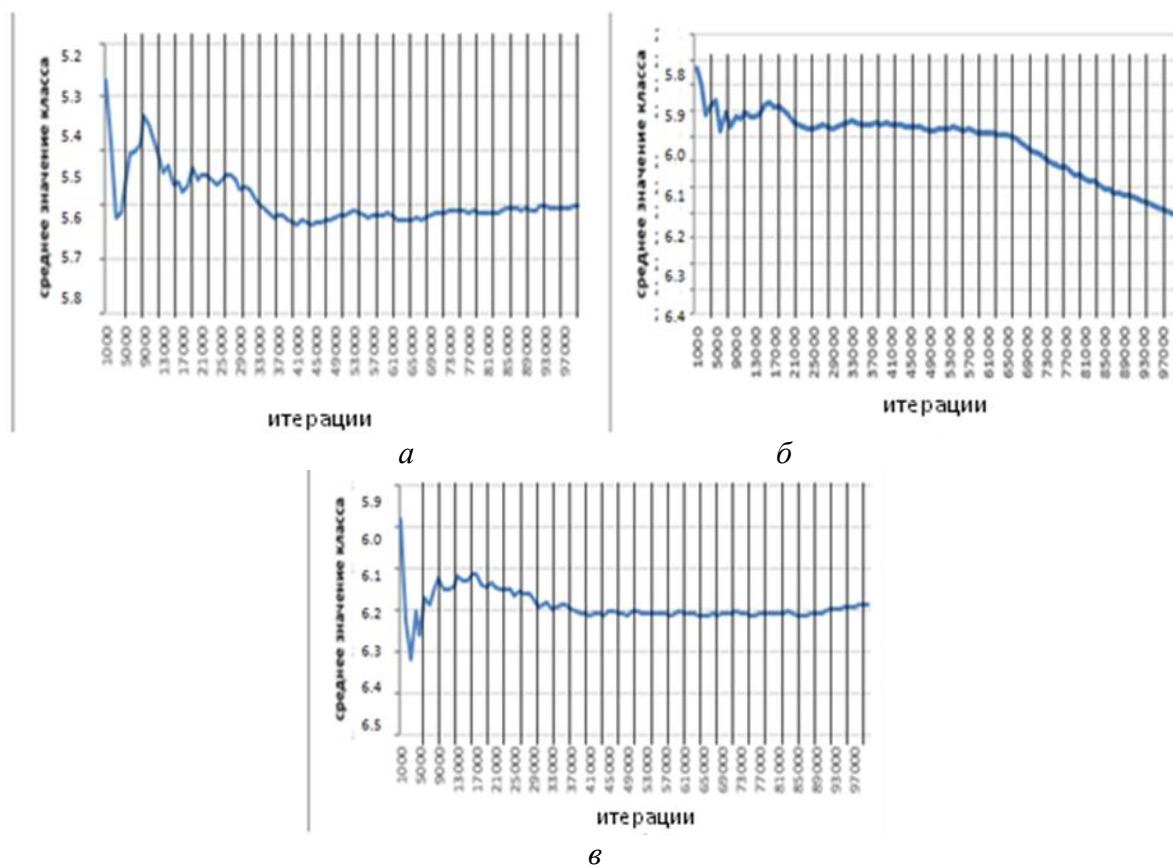


Рис. 3. Динамика перемещения классов кислотности почвы:
 а) северный участок, слабокислая среда 5,6 рН;
 б) центральный участок, близко к нейтральной среде 5,9 рН;
 в) южный участок, нейтральная среда 6,2 рН

Анализ представленных данных позволяет отметить, что класс, представляющий центральный участок поля (близко к нейтральной среде 5,6 рН) относительно быстрее самонастраивается (обучается) по результатам сегментации. Класс, представляющий северный участок поля ведет себя относительно менее стабильно, требует большего времени для самонастраивания (см. рис. 3. а)).

Анализ результатов. Анализ результатов сегментации изображения позволяет построить амплитудно-частотную характеристику по результатам самонастраивания классов кислотности (см. рис. 4). Очевидно, что в процессе самонастраивания классов происходит значительное сближение характеристик центрального и южного участка, что подтверждается данными по распределению кислотности опытного поля.

Характеристика северного участка практически остается в пределах типичных колебаний кислотности для слабокислой почвы, что позволяет сделать вывод о необходимости локального внесения удобрений для повышения устойчивости агрофизических показателей данного участка.

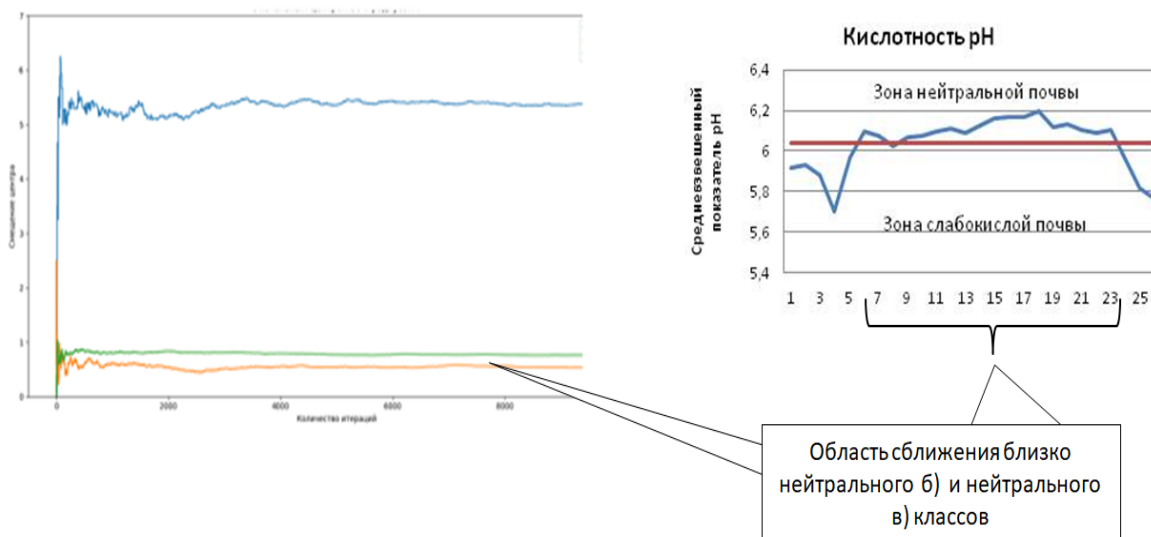


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика классов кислотности опытного участка

Заключение. Технология самонастраивания сегментации значительно расширяет возможности для более точного анализа, интерпретации и прогнозирования агрофизической характеристики состояния почв на локализованных участках в настоящий момент.

Интеллектуальная технология, показала свою эффективность в управлении качеством состояния естественного энергетического состояния на контрольных участках. Предполагается, что опыт будет применен на всей площади зоны ответственности «САС «Солянская» (912,4 тыс. га).

Список источников

1. R. Srikanth and K. Bikshalu, Multilevel thresholding image segmentation based on energy curve with harmony Search Algorithm, Ain Shams Engineering Journal, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.003>
2. Essam H. Houssein, Bahaa El-din Helmy, Diego Oliva, Ahmed A. Elngar, Hassan Shaban «A novel Black Widow Optimization algorithm for multilevel thresholding image segmentation» Expert Systems with Applications Available online 4 November 2020, 114159.
3. Prakash Purswani, Zuleima T. Karpyn, Khaled Enab, YuanXue, XiaoleiHuang «Evaluation of image segmentation techniques for image-based rock property estimation» Journal of Petroleum Science and Engineering Volume 195, December 2020, 107890.
4. Avdyukova T. V., Hrutsy S. A.. Fertility State of Arable Lands in the East Zone of Krasnoyarsk Krai // Agriculture. 2017. № 1. P. 25–29.
5. Chuprova V. V., Belousov A. A., Belousova E. N., Gorbunova Yu. V. Evaluation of agroecological condition of the soils involved in the development of sand and gravel quarries

of Kansk district of Krasnoyarsk region // Journal of Siberian Federal University. Agronomic 2019. № 3, 16–21.

6. Perfilyev D. A. Segmentation frequency of heterogeneity image. In Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the International Scientific Conference. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 328 pages, ISBN 978-5-7638-4389-7. 2020.

7. Perfilyev D. A., Avdyukova T. V. Image segmentation of acidity of agricultural lands in Eastern Siberia. Труды по вычислительным методам в системах и программном обеспечении CoMeSySo 2021: Наука о данных и интеллектуальные системы, стр. 133-144. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_1.

D. A. Perfilyev

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: perfilyev7775@yandex.ru

INTELLIGENT TECHNOLOGY SEGMENTATION IMAGE SOIL ACIDITY

Abstract. The article proposes intelligent technology segmentation image regions homogeneous frequency dynamics. The article provides example self-adjustment segmentation rules three classes soil acidity, a pilot plot agricultural land Eastern zone Krasnoyarsk territory.

Keywords: *intelligent technology, image segmentation, segmentation rule and interpretation of soil acidity*

А. С. Пятаев¹, Э. А. Писаренко²

¹ Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «ЦЗЛ Красноярского края», Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

e-mail: pyataev.alex@gmail.com

АЛГОРИТМ УДАЛЕНИЯ ФОНА ДЛЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ КРОНЫ ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ СЪЕМКИ

Аннотация. Степень густоты кроны дерева является одной из важнейших характеристик дерева, описывающих его состояние здоровья. В настоящей работе показан алгоритм автоматизированной сегментации кроны деревьев на переднем плане по наземным фотографиям лесных участков. Алгоритм основан на применении глубокой нейронной сети модели YOLO v5 и оригинального сочетания фильтров анализа изображений, что позволят получить маску дерева и затем, на ее основе отделить крону дерева от фона. Экспериментальные исследования проведены с использованием самостоятельно созданного набора данных.

Ключевые слова: удаление фона, сегментация кроны деревьев

Оценка категории состояния лесного участка представляет собой интегральную характеристику, складывающуюся из значений категорий состояния отдельных деревьев. От того какая характеристика присвоена лесному участку зависят применяемые к этому участку меры. Поскольку эти меры могут варьироваться от санитарной или оздоровительной рубки до различных восстановительных работ, достоверность такой оценки крайне важна. Степень густоты кроны является одной из определяющих характеристик для оценки здоровья дерева [1]. Для определения степени густоты кроны необходимо отделить изображение исследуемого дерева от фона, так как фон может содержать различные объекты, препятствующие корректной оценке кроны. В предыдущей работе [2] для сегментации изображения дерева используется неполная пороговая обработка с глобальным порогом. Однако, пороговая обработка, основанная на построении гистограммы изображения, часто выделяла похожие по яркостям области, не относящиеся к кроне дерева. Поэтому в настоящей работе для выделения изображения кроны дерева по данным наземной съемки предложен алгоритм на базе сочетания глубокой нейронной сети и нескольких фильтров.

Алгоритм выделения кроны дерева. Специалисты-лесопатологи при проведении обследования лесного участка и оценке категории состояния отдельных деревьев выполняют фотосъемку исследуемых участков. Примеры изображений показаны на рис. 1. Фотографии выполнены в высокоплотных насаждениях, что существенно усложняет работу алгоритма устранения фона из-за значительного пересечения крон деревьев,

поэтому принято решение о выделении деревьев только переднего плана, аналогично тому, как исследует лес специалист-лесопатолог.



Рис. 1. Фотографии лесных участков

Для сегментации изображений вручную создан собственный набор данных, состоящий из 3 711 изображений сосны обыкновенной – *Pinus sylvestris*. При создании набора данных около 700 изображений взято из данных лесопатологических обследований, выполненных в 2021 г. специалистами Центра защиты леса Красноярского края на таких территориях, как Заповедник Столбы и село Пировское. Остальные фотографии для создания набора данных сняты самостоятельно на территории экопарка Гремячая грива в г. Красноярске.

Иллюстрация работы предлагаемого алгоритма удаления фона для выделения кроны дерева, подлежащей дальнейшему обследованию показана на рис. 2.

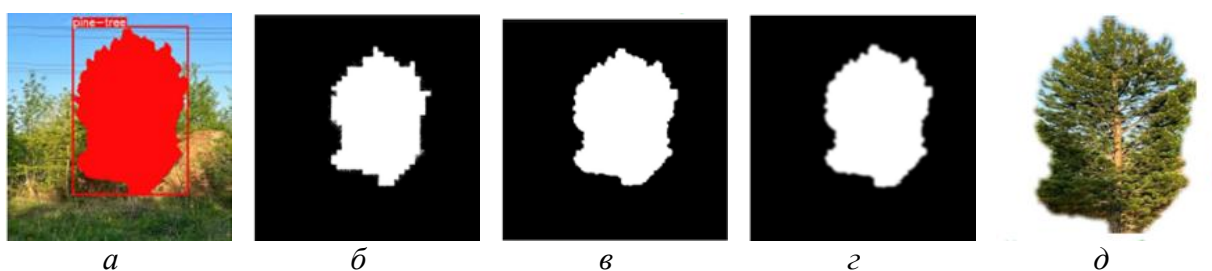


Рис. 2. Алгоритм удаления фона для сегментации изображения дерева

Программная реализация предложенного алгоритма удаления фона выполнена на языке Python с использованием библиотеки Pillow. Алгоритм удаления фона для сегментации изображения дерева состоит из следующих шагов:

1. Автоматическая сегментация с помощью глубокой нейронной сети YOLO v5 (рис. 2, а) [3]. Набор данных для работы нейронной сети разбит на тренировочный и тестовый из соотношения 70 % и 30 % случайным образом, модель обучалась на 50 эпохах. Достоверность выделения деревьев моделью составила в среднем 87 % по метрике Precision. Так как сегментация YOLO v5 выполняется путем нахождения наиболее подходящей по метрике IoU ограничивающей дерево рамки, то для оценки степени густоты кроны требуется дальнейшая обработка полученных рамок с целью выделения контура кроны.

2. Для созданной моделью на первом этапе рамки дерева выполняется обрезка изображения по ней, а затем это изображение преобразуется в бинарное (рис. 2, б).

3. Выполняется дилатация бинарной маски для устранения разрывов линий и выравнивания границы выделенной кроны (рис. 2, в) с применением функции ImageFilter.MaxFilter(3).

4. Для устранения острых контуров выделяемого изображения и увеличения естественности формы кроны выполнено размытие по Гауссу (1) (рис. 2, г):

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – коэффициент пропорциональности размытия, x, y – координаты центрального элемента матрицы. В настоящей работе для применения размытия использована матрица свертки:

$$\begin{bmatrix} 0.000789 & 0.006581 & 0.013347 & 0.006581 & 0.000789 \\ 0.006581 & 0.054901 & 0.111345 & 0.054901 & 0.006581 \\ 0.013347 & 0.111345 & 0.225821 & 0.111345 & 0.013347 \\ 0.006581 & 0.054901 & 0.111345 & 0.054901 & 0.006581 \\ 0.000789 & 0.006581 & 0.013347 & 0.006581 & 0.000789 \end{bmatrix}.$$

5. На последнем этапе работы алгоритма выделенная маска кроны накладывается на исходное изображение дерева (рис. 2, д) для получения сегментированного изображения кроны без объектов фона.

Применение разработанного алгоритма удаления фона позволяет выделить деревья на переднем плане без лишних фоновых объектов с максимально возможным сохранением естественной формы кроны. Далее полу-

ченые изображения крон передаются в другую глубокую нейронную сеть для классификации и принятия решения о состоянии дерева.

Список источников

1. Pyataev A. S., Pyataeva A. V., Redkin A. Y. Tree state category identification for boreal area conifers using global features estimation by fuzzy logic approach. Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science, Polish-Japanese Institute of Information Technology, Poland. 2019. Vol. 2 391. P. 211–215.

2. Пятаев А. С. Сегментация дерева на изображении методом неполной пороговой обработки с глобальным порогом. Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 291–293.

3. Jocher G. YOLOv5 by Ultralytics // Github. 2023. URL: github.com/ultralytics/yolov5. YOLO5.

A. S. Pyataev¹, E. A. Pisarenko²

¹ Branch of FBI “Russian Centre of Forest Protection” –
“Centre of Forest Protection of Krasnoyarskiy Krai”, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: pyataev.alex@gmail.com

BACKGROUND REMOVAL ALGORITHM FOR THE PROBLEM OF TREE CROWN IDENTIFICATION ACCORDING TO GROUND SURVEY DATA

Abstract. The degree of crown density of a tree is one of the most important characteristics of a tree, describing its state of health. This paper shows an algorithm for automated segmentation of the crown of trees in the foreground based on ground photographs of forest areas. The algorithm is based on the use of a deep neural network of the YOLO v5 model and an original combination of image analysis filters, which will make it possible to obtain a tree mask and then, on its basis, separate the crown of the tree from the background. Experimental studies were carried out using a self-created data set.

Keywords: background removal, tree crown segmentation

**Д. В. Харламов¹, В. Г. Подопригора^{2,3},
М. Ю. Реушев^{1,3}, Д. С. Макаров^{1,4}**

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁴ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

e-mail: ikivt@yandex.ru

МНОГОЛУЧЕВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ОТ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ ДРЕВОСТОЯ

Аннотация. Представлены результаты серии измерений амплитудно-временных зависимостей интерференционного поля сигналов навигационных спутников вблизи лесного массива. Проведен анализ результатов с использованием быстрого Фурье преобразования. Для качественного объяснения полученных рефлектограмм, была использована модель многолучевой интерференции в частично анизотропных средах. Результаты эксперимента могут быть использованы для мониторинга состояния лесных массивов.

Ключевые слова: ГНСС рефлектометрия, слоистые среды, лес, сигналы навигационных спутников

Одним из эффективных методов исследования земных покровов является многолучевая интерферометрия сигналов навигационных спутников (НС) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [1]. Рефлектометрические измерения отраженных средой радиосигналов частот диапазонов $L1$ и $L2$ характеризуются высоким пространственно-временным разрешением и чувствительностью. Регистрируемый приемником сигнал, прошедший и отраженный системой слоев «воздух-деревья-почва», вследствие рассеяния и поглощения искажается, и характер этих искажений, обусловленный электрофизическими характеристиками среды, содержит данные о параметрах древостоя.

Целью данной работы являлось исследование взаимодействия сигналов НС со слоистыми лесными структурами с целью мониторинга их состояния.

Исследовался участок соснового леса со средней высотой деревьев 18 м и средним расстоянием между ними 2,8 м. Приемник с правой круговой поляризацией в интервале азимутальных углов (270° – 220°) и угла возвышения (47° – 19°) регистрировал сигналы НС в виде амплитудно-временных зависимостей (АВЗ) с координатной привязкой. Частота обновления данных измерений АВЗ составляла величину 1 Гц. В качестве примера, на рис. 1, а приведена рефлектограмма лесного массива в виде АВЗ.

На рис. 1, б приведен спектр частот АВЗ рефлектограммы, полученный путем обработки АВЗ с использованием быстрого Фурье-преобразования (БФП).

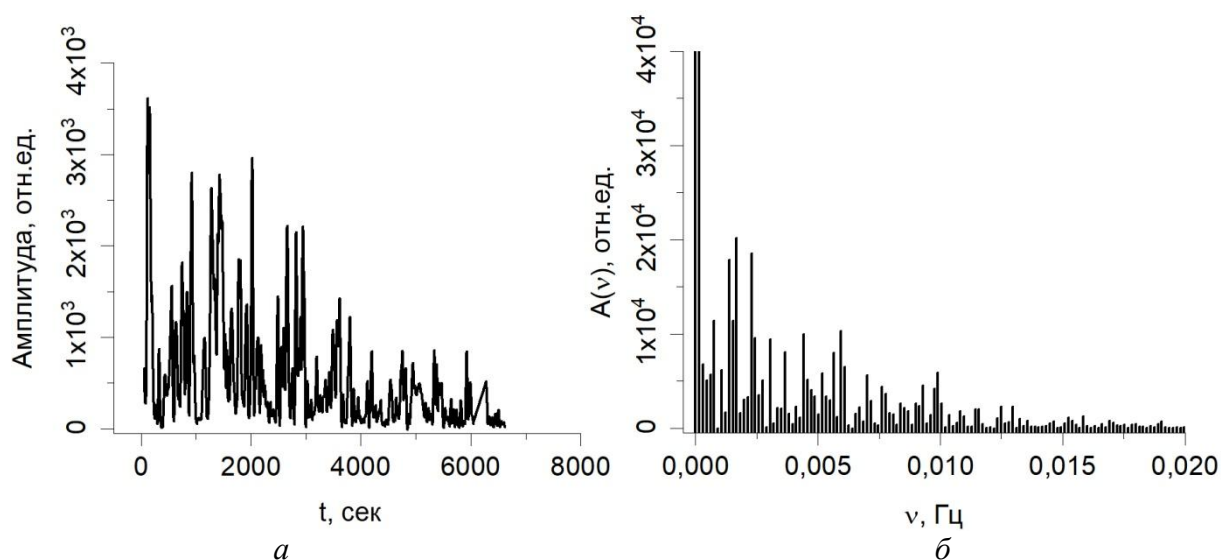


Рис. АВЗ (а) и БФП (б) лесного массива

Как видно из рис. 1, в спектре рефлектограммы вблизи основной частоты, обусловленной интерференцией прямого луча сигнала НС и отраженного от подстилающей поверхности, выражена и диффузная составляющая спектра, огибающая которой описывается выражением:

$$S(\nu) = S_0 \exp(-\alpha\nu + \beta) + C, \quad (1)$$

где S_0 – максимальное значение функции $S(\nu)$, α , β и C – коэффициенты, зависящие от характеристик поглощения сигналов НС в лесном массиве.

Для объяснения полученных рефлектограмм, было проведено численное моделирование процессов рассеяния и поглощения на элементах растительности и границах слоев лесного массива.

При моделировании предполагалось, что коэффициенты рассеяния могут быть вычислены как в дискретной модели, так и в приближении сплошной среды [2]. При этом влияние ориентационной упорядоченности и анизотропии дерева на коэффициенты рассеяния учитывалось, аналогично тому, как это сделано в работе [3].

Для расчета параметров сигнала НС, прошедших сквозь слои древесной и отраженных от границ раздела была использована модель многолучевой интерференции в рамках геометрической оптики [4]. При моделировании использовалась трехслойная модель «воздух (1) – древесиной (2) – почва (3)» со значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon_1 = 1,0$, $\epsilon_2 = 1,01 - 2 \times 10^{-4}$, $\epsilon_3 = 2,79 - 0,16j$ ($j = \sqrt{-1}$). Рассчитывались: запаздывание фазы волн, их амплитуды. При этом, амплитуда U_i волны, отраженной от i -

го слоя ($i = 1, 2, 3$) и приходящей на приемник, представлена следующим выражением:

$$U_i = R_{i,i+1} \prod_{k=1}^{k=i} T_{k-1,k} T_{k,k-1} e^{-2\alpha_k d_k} \quad (2)$$

где $T_{k-1,k}$ и $R_{i,i+1}$ – коэффициенты Френеля пропускания и отражения i -го и k -го слоев, $\alpha_k = 2\pi\lambda^{-1} \times |\text{Im}(\epsilon_k)|$ коэффициенты ослабления в k -м слое, λ – длина волны, $d_k = H_k / \cos(\theta_k)$, H_k и θ_k – толщина и угол падения луча в k -м слое.

Кроме процессов рассеяния и поглощения на элементах растительности на отраженное поле оказывает влияние взаимодействие сигнала НС с границами раздела фаз: «воздух – кроны», «кроны – стволы» и «стволы – почва». Границы раздела фаз имеют шероховатые поверхности. В работе [5] приведено выражение для таких поверхностей:

$$R_i = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{r_{i,i+1} + r_{i+1,i+2} \cdot e^S \cdot e^{j2\psi}}{1 + r_{i,i+1} \cdot r_{i+1,i+2} \cdot e^S \cdot e^{j2\psi}} \quad (3)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение высот неровностей почв, $r_{i,i+1}$ – коэффициенты отражения Френеля от границы i -го и $(i+1)$ -го слоев, ϵ_i и ϵ_{i+1} – диэлектрические проницаемости слоев, Ψ – фаза, зависящая от толщины слоя, S – корреляционный фактор поверхностной шероховатости, зависящий от стандартных отклонений высот неровностей границ раздела между слоями [6].

Дальнейшие расчеты показали, что в отраженном от лесного массива сигнале НС помимо когерентных волн из первой зоны Френеля присутствует и слабая диффузная компонента, обусловленная отражением от крупномасштабных неровностей границ раздела крон с воздухом и эффектами вторичного рассеяния между элементами лесной растительности. При увеличении плотности древостоя увеличивается затухание сигналов НС, и когерентное рассеяние, снижается. Измерение шероховатостей подстилки дает средние параметры $\sigma = 0,02 - 0,025$ м, что меньше рабочей длины волны $\lambda = 0,19$ м для $L1$ диапазона. Поэтому в отсутствие топографических эффектов некогерентная компонента значительно меньше когерентной компоненты. С учетом приведенных значений σ коэффициент отражения в диапазоне углов возвышения ($70^\circ - 20^\circ$) уменьшается от 0,22 до 0,04.

Таким образом, выполненные расчеты позволили качественно объяснить поведение АВЗ и соответственно спектр частот, полученных в результате обработки АВЗ с помощью БФП.

Основные выводы работы. Использование методов ГНСС рефлектометрии слоистых структур лесных массивов в сочетании с методами численного моделирования позволяет непрерывно и оперативно получать ин-

формацию об их параметрах. Подобная информация может быть использована для нужд лесного хозяйства и других областей хозяйственной деятельности на территории РФ.

Список источников

1. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В. и др. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий: монография // Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. Красноярск: СФУ, 2023 (2023-03-01). 256 с. ISBN 978-5-7638-4704-8.
2. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.
3. Ориентационная упорядоченность элементов дерева в модели диэлектрической проницаемости древостоя // Сорокин А. В., Подопрigора В. Г., Макаров Д. С., Харламов Д. В., Балтайс В. В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63. № 2 (746). С. 50–54.
4. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing // New York, London.: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.
5. Léron del G., Romestain R. Fresnel coefficients of a rough interface // Applied Physics Letters. 1999. Т. 74. № 19. С. 2740–2742.
6. Karam M. A. et al. A microwave scattering model for layered vegetation // Universities Space Research Association, Goddard Visiting Scientist Program for the Space and Earth Sciences Directorate. –1992.

D. V. Kharlamov¹, V. G. Podoprigora^{2,3}, M. Yu. Reushev^{1,3}, D. S. Makarov^{1,4}

¹Federal Research Center KSC SB RAS

²Institute of Physics named after L. V. Kirensky FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: ikivt@yandex.ru

MULTIPATH INTERFEROMETRY FROM NAVIGATION SATELLITE SIGNALS IN LAYERED STAND STRUCTURES

Abstract. The results of a series of measurements of the amplitude-time dependences of the interference field of navigation satellite signals near a forest area are presented. The results were analyzed using the fast Fourier transform. For a qualitative explanation of the obtained reflectograms, the model of multipath interference in partially anisotropic media was used. The results of the experiment can be used to monitor the state of forests.

Keywords: GNSS reflectometry, layered media, forest, navigation satellite signals

**У. Ю. Шаврина^{1,2}, Т. Д. Кочеткова¹,
В. С. Мурашкин¹, М. А. Волкова¹, Л. Г. Колесниченко¹**

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²ФГБУ «Государственный природный заповедник «Пасвик», Никель, Россия
email: ulyanashavrina@yandex.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЖАРОВ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИШАЙНИКОВОГО ПОКРОВА ПЛОСКОБУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Аннотация. С использованием данных дистанционного зондирования Земли на территории плоскобугристых торфяников Надым-Пурского междуречья выявлены участки с аномальными теплофизическими свойствами. При проведении полевых исследований на этих территориях были отобраны образцы лишайника рода *Cladonia* с участков, подвергнутых пожару и их ненарушенных аналогов. В результате лабораторных экспериментов были выявлены различия в диэлектрической проницаемости и теплопроводности исследованных лишайников.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, пожары, диэлектрическая проницаемость, лишайники, разновременные снимки спутника Landsat

Пространственная неоднородность наземного растительного покрова приводит к изменчивости диэлектрической проницаемости от которой в свою очередь зависят радиоизлучательные и отражательные характеристики территорий. Разработка дистанционных методов оценки состояния подстилающей поверхности базируется на изучении особенностей взаимодействия электромагнитных волн с растительностью, установлении зависимостей диэлектрических характеристик растительности от температуры, влажности и степени связанности воды в растении [1, 2].

Проведена оценка влияния пожаров на теплофизические свойства лишайникового покрова плоскобугристых торфяников криолитозоны Западной Сибири. Территория исследований расположена в Надымском и Тазовском административных районах Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для выявления территорий с аномальными теплофизическими свойствами поверхности бугристых торфяников на южной границе распространения многолетней мерзлоты Западной Сибири произведен расчет индексов NDVI, NBR и SWVI разновременных снимков спутников Landsat 5, 7, 8 (1984–2021). Удалось установить, что в 2007 г. на территории Надым-Пурского междуречья было максимальное количество пожаров, которыми пройдено около 6 % исследуемой территории. С применением Google Earth Engine и размещенного в открытом доступе кода [3] выявлено совпадение

контуров пожаров 2007 г. и участков с наибольшей температурой, что говорит об изменениях в теплофизических свойствах поверхности бугристых торфяников, подвергнутых пожарам. Сравнение разновременных NDVI, NBR и SWVI карт показало, что контуры гарей дешифрируются менее четко уже через два года после пожаров вследствие сукцессионных процессов. То же самое мы наблюдаем на картах, отражающих температуру поверхности территории.

На ряде выявленных территорий проведены полевые исследования, показавшие, что в среднем температура торфов участка, покрытого горелым лишайником на три градуса выше, чем на аналогичном ненарушенном участке.

Для дальнейшего изучения физических свойств лишайникового покрова были использованы образцы горелого и негорелого лишайника. В лабораторных условиях оценили:

- диэлектрическую проницаемость образцов разной влажности на СВЧ с использованием векторного анализатора цепей Agilent E8363B;
- теплопроводность образцов разной влажности в климатической камере с использованием системы температурных датчиков.

Результаты показали, что как мнимая, так и действительная части диэлектрической проницаемости лишайников на территориях, подверженных пожарам, значительно и статистически значимо отличается от диэлектрической проницаемости ненарушенных аналогов.

При исследовании теплопроводности не установлено значимых различий для образцов горелого и негорелого лишайников, однако, выявлена более тесная связь теплопроводности с влажностью для лишайника, подверженного пожару, чем для его ненарушенного аналога.

Используя метод множественной линейной регрессии, составлена регрессионная прогностическая модель зависимости диэлектрической проницаемости от влажности и теплопроводности:

$$\epsilon = 1,23 \cdot \lambda - 0,39 \cdot W + 1,2,$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, отн. ед., λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; W – влажность, %.

Полученные результаты в дальнейшем можно использовать при дешифрировании ДДЗ высокого разрешения и для работы с георадарами.

Исследование поддержано проектом РНФ № 23-27-00249 «Физические свойства мохово-лишайникового покрова торфяников криолитозоны Западной Сибири: изменения под влиянием природных и антропогенных факторов».

Список источников

1. Parrens M., Wigneron J.-P., et al . // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 181. P. 122–136.

2. Романов А. Н., Кочеткова Т. Д., Суляев В.И., Щеглова А. С. Диэлектрические свойства болотной растительности в диапазоне частот 0.1-18 ГГц при вариациях температуры и влажности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60, № 5. С. 52–60.

3. Ermida S. L., Soares, P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I. F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series // Remote Sensing. 2020. Vol. 12: 1471. <https://doi.org/10.3390/rs12091471>.

U. Y. Shavrina^{1,2}, T. D. Kochetkova¹,
V. C. Murashkin¹, M. A. Volkova¹, L. G. Kolesnichenko¹

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Pasvik State Nature Reserve

e-mail: ulyanashavrina@yandex.ru

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FIRES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF LICHEN COVER OF PALSAS OF THE CRYOLITHOZONE OF WESTERN SIBERIA

Abstract. We have identified areas of palsas of the Nadym-Pursky interfluvium with abnormal thermophysical properties using remote sensing data. During the field research, we selected samples of lichen of the genus *Cladonia* in these territories from sites exposed to fire and their undisturbed analogue. As a result of laboratory experiments, we revealed differences in the dielectric constant and thermal conductivity of the studied lichens.

Keywords: *fires, permafrost, dielectric permittivity, lichens, multi-temporal landsat satellite images*

Т. О. Шелопут, С. В. Петров

Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия
e-mail: t.sheloput@inm.ras.ru, spetrov.msk@gmail.com

АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ И ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможности применения алгоритмов, основанных на идее приближения полей геофизических данных в виде матриц малого ранга, для их сжатия и обработки. В работе рассматриваются следующие типы данных: массивы значений температуры поверхности моря, полученные по данным со спутников, и данные реанализа. В работе рассмотрен метод сжатия и восполнения данных, основанный на алгоритме SVP (Singular Value Projection), учитывающий наличие в данных аномалий. Как показано в работе, алгоритм позволяет эффективно сжимать данные о температуре, а также может быть использован для заполнения пропусков в данных со спутников.

Ключевые слова: сжатие геофизических данных, малоранговые матричные аппроксимации, алгоритмы восполнения матриц, вариационная ассимиляция данных, системы хранения данных

Введение. Известно, что одним из популярных продуктов, предоставляемых сервисами-агрегаторами геофизических данных [1], является реанализ данных наблюдений, полученных с помощью математического моделирования гидротермодинамики морских акваторий. Реанализ, полученный из моделей Мирового океана и других моделей морских акваторий с детальным пространственно-временным разрешением, занимает относительно большой объем дискового пространства, поэтому возникают трудности с хранением и передачей данных по сети. Другой актуальной проблемой является возрастающий объем хранимых данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) [2]. В связи с этим имеется необходимость в разработке и исследовании эффективности алгоритмов сжатия, учитывающих особенности геофизических данных.

В настоящее время существует множество алгоритмов сжатия данных, однако специальных алгоритмов компрессии геофизических данных, учитывающих их структуру и особенности, предложено не так много. Например, данные реанализа представляют собой четырехмерные массивы температуры, солености, скоростей, в которых значения меняются относительно «гладко». То есть, если представить, что каждый элемент массива является значением функции в узле сетки, то модуль градиента этой функции во всей области ограничен, более того, можно найти подобласти, где он мал. Известные подходы, связанные со сжатием битовых представлений (алгоритм Хаффмана и другие алгоритмы кодирования битовых последо-

вательностей) не являются достаточно эффективными в данном случае (степень сжатия около 3:1). Более перспективными являются алгоритмы, основанные на вейвлет-преобразовании с последующим квантованием коэффициентов [3], или тензорные разложения [4].

Поскольку данные, полученные в результате обработки спутниковых измерений и снимков, а также данные реанализа содержат погрешности, для решения задачи можно рассматривать алгоритмы сжатия с потерями, с учетом того, что потери не должны (в некотором смысле) превышать погрешности рассматриваемого продукта. В связи с наличием ошибок в данных также возникает вопрос – можно ли устроить так, чтобы используемый алгоритм сжатия не только уменьшал объем занимаемого дискового пространства, но и предоставлял некоторую аппроксимацию исходных данных, которая не содержала бы явных выбросов (не имеющих физического смысла), была бы более гладкой, но в среднем не отличалась бы от исходных данных более чем на некоторое пороговое значение? В работе рассматривается метод сжатия и восполнения данных, основанный на алгоритме SVP (Singular Value Projection), учитывающий наличие в данных аномалий. При использовании данного алгоритма предполагается, что матрица данных представляет собой сумму малоранговой и разреженной матриц. Таким образом, найденная малоранговая матрица может выполнять роль такой аппроксимации. Однако, заметим, что для проверки качества этой аппроксимации требуется более детальное исследование, а именно, сравнение с данными контактных измерений.

Описание используемого подхода. В настоящей работе исследуется метод, основанный на восполнении матрицы по неполному набору ее элементов, в котором предполагается, что матрица представляет собой сумму малоранговой матрицы и разреженной матрицы [5]. В основе метода лежит итерационный градиентный метод оптимизации в факторизованном виде – алгоритм SVP. В работе [5] предложена модификация алгоритма SVP, в которой учитывается наличие в матрице некоторой доли ошибочных значений (выбросов).

Результаты численных экспериментов. Для первого численного эксперимента были использованы данные наблюдений за температурой поверхности моря (ТПМ) со спутниковых приборов (ТПМ на базе MODIS, ТПМ на основе VIIRS). Рассмотрим для примера результаты работы алгоритма для сжатия данных о ТПМ за 2 сентября 2018 г., 11:05, полученных со спутника Aqua. На рис. 1 приведена зависимость ошибки аппроксимации данных от характеристики сжатия для ранга $R=8$. Характеристика сжатия выражена в виде отношения (в процентах) количества вещественных чисел, необходимых для получения аппроксимации матрицы, к общему числу значимых элементов исходной матрицы (без учета берегов и облаков). Ошибка аппроксимации E_f представляет собой отношение нормы Фробениуса разности между исходной матрицей и ее аппроксимацией к норме Фробениуса исходной матрицы (рис. 1, *a*). Ошибка аппроксимации E_c – наибольшее по модулю значение отклонения аппроксимации

от исходной матрицы (рис. 1, б). На рис. 2 представлены исходные данные. Из рис. 2 видно, что данные почти полностью покрывают акваторию (всего 450 604 значений температуры на сетке 800*1 600). Наблюдается существенное падение ошибок при использовании 3 200 ненулевых элементов в разреженной матрице (обратная величина к коэффициенту сжатия – 6,04 %). В экспериментах с данными за другие даты и с других спутников обратная величина к коэффициенту сжатия составила от 10 % до 22 % при тех же порядках точности аппроксимации.

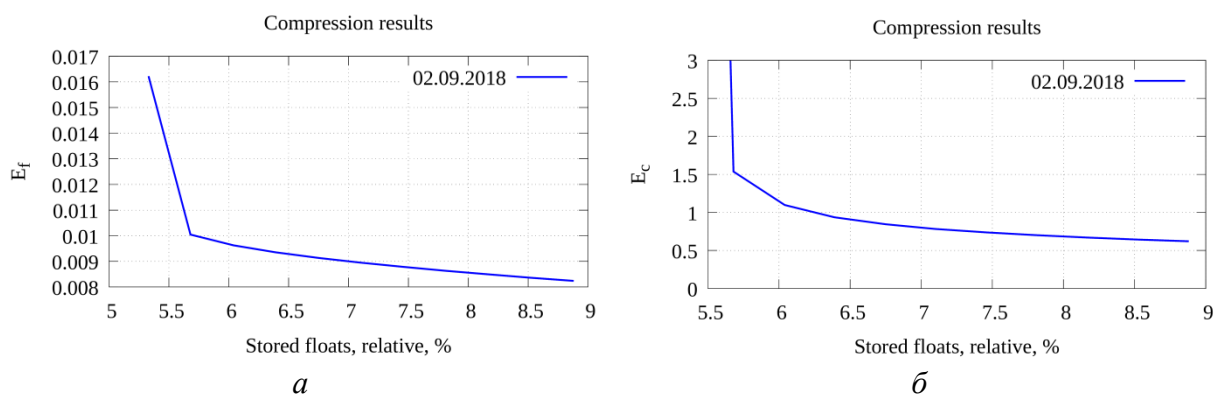


Рис. 1. Зависимость ошибки аппроксимации: а) E_f ; б) E_c , от обратной величины к коэффициенту сжатия (%) для данных со спутника Aqua за 02.09.2018, 11:05

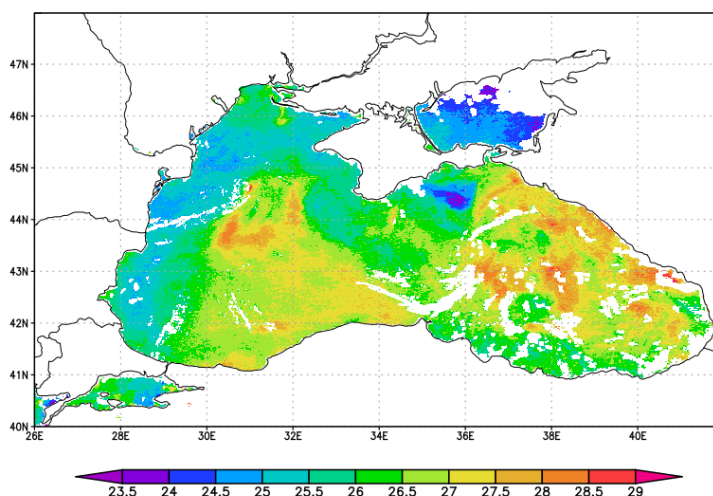


Рис. 2. ТПМ за 2 сентября 2018 г., 11:05, Aqua, MODIS

Во втором численном эксперименте рассматривались данные о ТПМ по результатам реанализа с использованием информационно-вычислительной системы вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Чёрное море» [2]. Для среднесуточных данных за 1 января 2018 г. на сетке 301*194 для ранга 10 аппроксимация с 1 505 разреженными элементами (обратная величина к коэффициенту сжатия – 22,22 %) составила $E_f = 0,00659$, $E_c = 0,287$.

Из результатов экспериментов можно сделать вывод о возможности использования рассмотренного алгоритма для сжатия данных. Следует за-

метить, что для вычисления значения аппроксимации в заданной позиции (i, j) требуется всего R умножений, где R – ранг.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035).

Список источников

1. Лупян Е. А. и др. 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.

2. Захарова Н. Б. и др. Реанализ гидрофизических полей на основе ассимиляции данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 63–75.

3. Bradley J. N., Brislawn C. M. Wavelet transform-vector quantization compression of supercomputer ocean models // [Proceedings] DCC93: Data Compression Conference. IEEE, 1993. P. 224–233.

4. Оселедец И. В. Вычислительные тензорные методы и их применения // дисс. на соиск. уч. степени д.ф.-м.н. М.: ИВМ РАН, 2012. 206 с.

5. Petrov S. V., Zamarashkin N. L. Matrix completion with sparse measurement errors // *Calcolo*. 2023. V. 60. №. 9. P. 1–33.

T. O. Sheloput, S. V. Petrov

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: t.sheloput@inm.ras.ru, spetrov.msk@gmail.com

ALGORITHMS FOR COMPRESSION AND PROCESSING OF GEOPHYSICAL DATA BASED ON MATRIX APPROXIMATIONS

Abstract. The work is devoted to the study of the possibility of using algorithms based on the idea of approximating geophysical data fields in the form of low-rank matrices for their compression and processing. The paper considers the following types of data: arrays of sea surface temperature obtained from satellite data and reanalysis. The paper considers a matrix completion method based on the SVP (Singular Value Projection) algorithm, which takes into account the presence of anomalies in the data. As shown in the paper, the algorithm allows efficient compression of temperature, and can also be used to fill gaps in satellite data.

Keywords: *geophysical data compression, low-rank matrix approximations, matrix completion algorithms, variational data assimilation, data storage systems*

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

УДК 574+528.88

А. Б. Алексеев, А. С. Плотникова

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
e-mail: poxrox@mail.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ ДРЕВОСТОЯ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Аннотация. Структурная сложность лесного древостоя играет ключевую роль в экосистемных функциях леса и оказывает большое влияние на биоразнообразие. Поэтому необходимы инструменты по объективной оценке структурной сложности. Широкий спектр показателей структурной сложности может быть оценен с использованием методов, которые варьируются от традиционных подходов к таксации до методов с применением дистанционного зондирования земли. В настоящем исследовании разрабатывается подход по комплексной количественной оценке структурной сложности древостоя леса на основе его трехмерной геопространственной модели всех надземных элементов, полученной по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС).

Ключевые слова: структурная сложность древостоя лесов, структурное разнообразие, воздушное лазерное сканирование, ДЗЗ, экосистемные функции леса

Одним из важнейших аспектов разнообразия лесов является их структурное разнообразие. Оно отражает вариации местообитаний, а также потенциал биоразнообразия и реализации экосистемных функций лесов [1–2]. В свою очередь, характеристика структурного разнообразия лесных экосистем включает оценку их структурной сложности. Такая оценка важна для: определения взаимосвязи неоднородности среды обитания и биоразнообразия, понимания взаимодействия между трехмерной структурой леса, биоразнообразием и выполняемыми экосистемными функциями. Структурная сложность древостоя является одним из показателей устойчивости лесной экосистемы к факторам естественного или антропогенного воздействия [3].

Определение структурной сложности древостоя леса подразумевает количественную оценку распределения деревьев и их крон в трехмерном пространстве. Такое определение выходит за рамки обобщения структуры леса через таксационные показатели: высота дерева, площадь сечения

ствола, сомкнутость кроны и другие. В лесном древостое большая структурная сложность выражается в большем разнообразии размеров деревьев, морфологии крон и может быть определена степенью неоднородности распределения биомассы в трехмерном пространстве под верхним пологом леса (рис. 1).

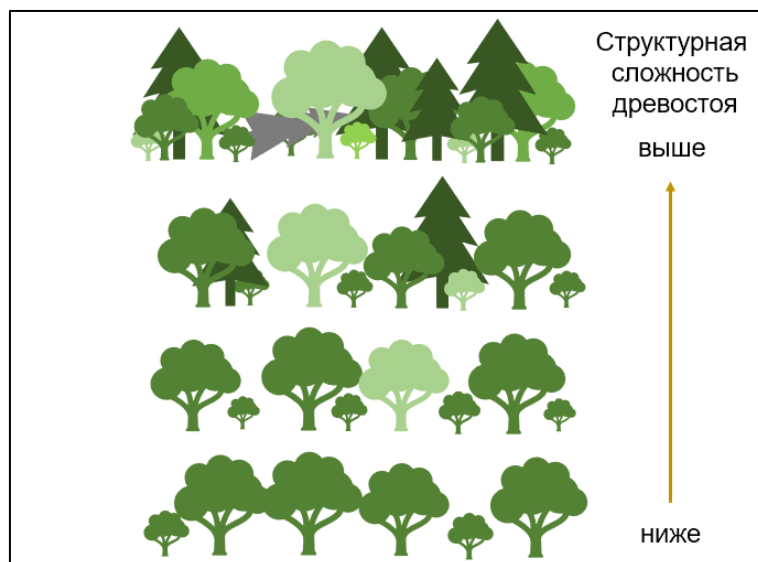


Рис. 1. Концептуальная схема структурной сложности древостоя

Воздушное лазерное сканирование по сравнению с другими методами съемки для оценки количественных и качественных характеристик древостоя лесов позволяет оперативно получать трехмерные данные о больших площадях лесных участков. Предоставляемая информация о структуре растительности под верхним пологом леса, а также о подстилающей поверхности характеризуется высокой точностью, полнотой и детальностью. Целью настоящего исследования является разработка интегрального индекса структурной сложности древостоя лесов на основе данных воздушного лазерного сканирования.

Объект и методика. Объект исследования расположен в зоне хвойно-широколиственных лесов Тверской области в 77 км. к северо-западу от г. Торжок. Объект имеет линейно-протяженную форму, площадь которой составляет 4,8 км². Определение структурной сложности древостоя объекта исследования планируется в границах пробных площадей размером 50x50 м. Для размещения пробных площадей была выполнена кластеризация, состоящая из следующих этапов: (1) Обработка исходного облака точек ВЛС, классификация на классы «земля» и «растительность»; (2) Классификация класса «растительность» на 4 высотных яруса; (3) Формирование регулярных растровых моделей плотности лазерных отражений и цифровой модели высот полога; (4) Кластеризация по полученным 5-ти признакам. Разрабатываемый интегральный индекс структурной сложности древостоя включает две составляющие. Вертикальную структуру древостоя описывает эффективное количество слоев (ЭКС), горизонтальную структуру – фрактальная размерность (ФР).

Эффективное количество слоёв учитывает высоту древостоя посредством ее деления на слои толщиной 1 м (рис. 2). В каждом отдельном слое определяется занятость компонентами деревьев – стволовой древесиной и листвой, по отношению к общему занимаемому ими объему (формула 1). Значение ЭКС возрастает при увеличении высоты древостоя и более равномерном заполнении слоев.

$$ЭКС = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i^2}, \quad (1)$$

где n – количество слоёв, p_i – отношение заполненных вокселей в i -м слое к сумме заполненных вокселей во всех n слоях.

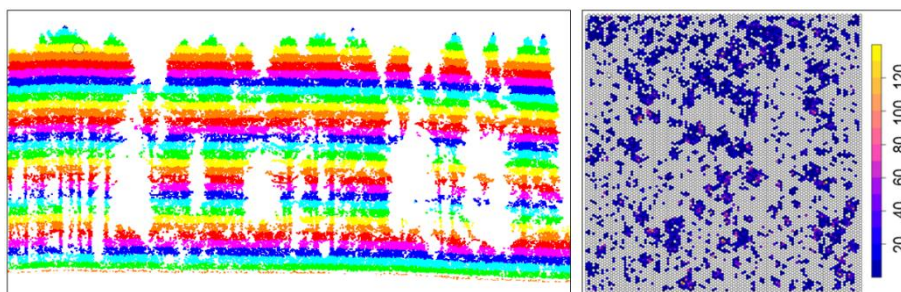


Рис. 2. Визуализация слоев (профильный вид древостоя) и занятых точками лазерных отражений от древостоя вокселей отдельно взятого слоя (вид сверху)

Фрактальная размерность пробной площади рассчитывается как среднее арифметическое фрактальных размерностей сечений толщиной 1 м (формула 2, рис. 3). Интегральный индекс структурной сложности древостоя лесов является функцией от эффективного количества слоев и фрактальной размерности.

$$\Phi P = \frac{2 \cdot \ln(0,25 \cdot P)}{\ln(A)}; \Phi P_{cp} = \sum_{1}^{50} \Phi P / 50, \quad (2)$$

где P – периметр фрактала, A – площадь фрактала.

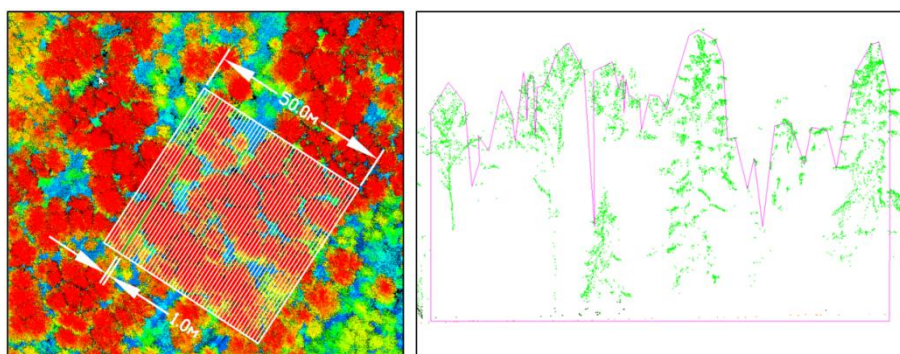


Рис. 3. Схема расчета фрактальной размерности пробной площади

Для проверки разрабатываемого интегрального индекса структурной сложности древостоя будет определен уровень корреляции с уже известными индексами, описывающими структуру древостоя. На основе разрабатываемого индекса возможно будет получать информацию о состоянии и динамики структурного разнообразия в различных типах леса, оценки мероприятий по управлению лесами. Представление структурной сложности в одном числе также позволит проводить прямое сравнение различных типов древостоя лесов и, в свою очередь, мониторинг биоразнообразия в целом.

Список источников

1. Лукина Н. В., Гераськина А. П., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Куприн А. В., Чернов Т. И., Чумаченко С. И., Шанин В. Н., Кузнецова А. И., Тебенькова Д. Н., Горнова М. В. // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1–90.
2. Нарыкова А. Н., Плотникова А. С. Картографирование экосистемных услуг на локальном уровне: обзор современного состояния исследований // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 3. Статья № 110, DOI 10.31509/2658-607x-202252-110.
3. Ehbrecht M, Seidel D, Annighöfer P, Kreft H, Köhler M, Clara Zemp D, Puettmann K, Nilus R, Babweteera F, Willim K, Stiers M, Soto D, Juergen Boehmer H, Fisichelli N, Burnett M, Juday G, Scott L, Stephens & Ammer C. Global patterns and climatic controls of forest structural complexity // Nature communications. 2021. Vol. 12(519). URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20767-z>.

A. V. Alekseev, A. S. Plotnikova

Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
(CEPF RAS), Moscow, Russia
e-mail: poxpoх@mail.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru

QUANTIFYING STRUCTURAL COMPLEXITY OF THE STAND OF THE CONIFEROUS-BROAD-LEAVED FORESTS OF THE TVER REGION BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING

Abstract. The structural complexity of the forest plays a key role in the ecosystem functions of the forest and has a major impact on biodiversity. Therefore, tools are needed for an objective assessment of structural complexity. A wide range of indicators of structural complexity can be assessed using methods that range from traditional taxation approaches to methods using remote sensing of the earth. In this work, an approach is developed for a holistic quantitative assessment of the structural complexity of a forest stand based on a three-dimensional geospatial model of all above-ground elements of a forest stand without taking into account individual taxation features based on airborne laser scanning (ALS) data.

Keywords: *airborne laser scanning, remote sensing, structural diversity, forest ecosystem functions*

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: belolip@icm.krasn.ru, sv@icm.krasn.ru

ДВУХСЛОЙНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНВЕРСИИ НАД ГОРОДОМ КРАСНОЯРСКОМ

Аннотация. Рассмотрена модификация разработанной авторами однослойной модели для исследования температурной инверсии в атмосфере над Красноярском. Теоретической основой модели является уравнение притока тепла для адиабатических процессов в атмосфере. Используются данные краткосрочных прогнозов температуры воздуха, полученных по мезомасштабным моделям. Выполнен совместный анализ данных суперкомпьютерного моделирования приземного слоя атмосферы с результатами численных экспериментов по упрощенной модели. Результаты модельных расчетов для декабря 2021 года согласуются с натурными данными по срокам образования/разрушения и интенсивности инверсии.

Ключевые слова: температурная инверсия, одномерная модель, прогноз погоды

Введение. Над крупными населенными пунктами наблюдаются высокие концентрации загрязняющих веществ. Исследованиям атмосферного воздуха над городами Москва, Томск, Пермь посвящены работы [1–4]. К наиболее загрязненным городам относится г. Красноярск. Оценка влияния различных типов источников выбросов на формирование неблагоприятных условий возможна на основе применения современных расчетных моделей переноса примесей в атмосфере, анализа данных наземных и спутниковых измерений и реанализа данных [5–7]. Существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере оказывают метеоусловия.

Данные наблюдений [www.air.krasn.ru], показывают что повышенный уровень загрязнений воздуха г. Красноярска в наибольшей степени проявляется в зимой при образовании температурной инверсии и для слабого (< 2 м/с) ветра. Температурная инверсия – повышение температуры воздуха с высотой вместо обычного понижения. Слой инверсионного распределения температуры препятствует развитию вертикального движения в атмосфере и способствует накоплению вредных примесей в поверхностном слое.

Увеличение температуры в инверсионном слое колеблется от десятых долей градуса до $1\ 520$ °С. Наибольшей мощностью обладают приземные инверсии температуры в зимний период.

Для прогноза погоды над ограниченной территорией с достаточно высоким разрешением применяются мезомасштабные математические модели [4, 8, 9]. Мезомасштабные модели включают, как правило, нестациона-

нарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов.

В работе [10] рассматривается однослойная модель с использованием краткосрочных прогнозов погоды для анализа возможных образований или разрушений температурной инверсии в приземном слое атмосферы над Красноярском. В настоящей работе рассматривается двухслойная параметризация температурной инверсии.

Численный алгоритм. Теоретической основой модели температурной инверсии является уравнение притока тепла для слабого ветра. Для адиабатических процессов в атмосфере уравнение притока тепла имеет вид [11]:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = -w_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial z} + \beta_a \right) \quad (1)$$

здесь $T_i(t, z)$ температура воздуха в i -ом слое ($^{\circ}\text{C}$), β_a – адиабатический градиент температуры, t – время, z – вертикальная координата, $w_i = w_i(t)$ – параметр, характеризующий вертикальные движения, ($i = 1 \ 0 \leq z \leq h$; $i = 2 \ h \leq z \leq H$).

Задаются начальные и граничные условия на уровнях $z = 0$, $z = h$, $z = H$. В условии на верхней границе $z = H$ введен калибровочный параметр T_a , отвечающий за внешнее воздействие на верхней границе.

Вводим равномерную сетку $\Delta z = H/(jj-1)$, $0 \leq j \leq jj1$. Условия на границе слоев $z = h = z_k$:

$$\begin{aligned} T_{1,h} = T_{2,h} = T_k, \\ T_k^{n+1} = 0.5(T_{k+1}^n + T_{k-1}^n) - \Delta t \cdot w_i \left(\frac{T_{k+1}^n - T_{k-1}^n}{2\Delta z} + \beta_a \right), \\ w_h = 0.5(w_1 + w_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где Δt – шаг по времени, Δz – шаг по координате.

Для определения параметров модели w_i задаются дополнительные начальные условия.

Численное решение уравнения (1) находится по явной схеме Лакса.

Для калибровки параметра T_a требуется дополнительная информация о решении, которое задавалось один раз в сутки на высоте $z = H$ в прогнозируемые дни. Калибровка модели выполнялась методом стрельбы. Задавались начальные условия, решалась прямая задача. Вычисленные значения сравнивались с заданными.

Численные эксперименты, выводы. Целью работы является оценка характеристик температурных инверсий в пограничном слое атмосферы г. Красноярска. Предлагается оценить термическую структуру ат-

мосферного пограничного слоя в г. Красноярске с помощью описанного численного алгоритма. Верификация и калибровка алгоритма выполнена с использованием данных о температуре воздуха в Красноярске в декабре 2021 г., полученных со стационарного профилемера МТР-5 Красноярского научного центра [<http://www.air.krasn.ru/mtp5/>], расположенного в центре города. В этот период времени в Красноярске наблюдалась мощная инверсия с интенсивностью более 20 °С.

С профилемера можно получить данные о температуре воздуха по вертикали с шагом 25 м (до 100 м) и с шагом 50 м до 1 000 м и дискретностью от 20 минут. Нами использовались данные с дискретностью 3 часа. Также использовалась информация о температуре воздуха, размещенная на сайте www.ventusky.com, где представлены прогнозные значения, полученные по мезомасштабным моделям (GFS, ICON и др).

Рассмотрено несколько тестовых задач об образовании и разрушении температурных инверсий в атмосфере над городом. Были выделены три группы характерных интервалов времени: без инверсии (13–19 декабря), образование инверсии (20–24 декабря) и разрушение инверсии (25–30 декабря).

По натурным данным температурная инверсия возникла 20 декабря (в 3:00) с интенсивностью $\Delta T = 2 - 10$ °С. По предлагаемому алгоритму инверсия образовалась 19 декабря (в 18:00) с интенсивностью 1 – 3 градуса и достигла интенсивности 19 °С 25 декабря, как и в натурных данных. По однослойной модели рассчитанная интенсивность была меньше на 2–3 градуса. Разрушение инверсии произошло 29 декабря.

Заключение. В прогнозах погоды нет информации о вертикальных профилях температуры. Предлагаемый метод позволяет определить по прогнозу погоды, возникнет или разрушится температурная инверсия. Выполнен совместный анализ данных суперкомпьютерного моделирования атмосферы (прогнозов погоды в зимний период) с результатами численных экспериментов по упрощенной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-21-20117 и Красноярского краевого фонда науки.

Список источников

1. Локощенко М. А., Богданович А. Ю., Еланский Н. Ф., Лезина Е. А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2021. Т. 57. № 6. С. 641–650.
2. Shklyayev V. A., Kostareva T. V. Characteristics of the temperature inversions and their relationship with atmospheric air pollution in Perm //Geographical bulletin. 2019. № 1(48). P. 84–92.
3. Mikhailuta S., Kucherenko A., Lezhenin A. Issues of Estimation the Structure of Emissions in the System of Industrial Enterprises – Motor Vehicles. Ecology and Industry of Russia. 2017;21(4):54–58.
4. Старченко А. В., Барт А. А., Кижнер Л. И., Данилкин Е. А. Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния

метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. 2020. № 66. С. 35–55.

5. Shaparev N, Tokarev A., Yakubailik O. The state of the atmosphere in the city of Krasnoyarsk (Russia) in indicators of sustainable development // International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2020, 27(4), 349–357.

6. Zavoruev V. V , Zavorueva E. . Concentration of PM_{2,5} in the surface layer of the Krasnoyarsk atmosphere during the winter anticyclone // In Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11 208.

7. Дергунов А. В., Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э. Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации //Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 3. С. 84–94.

8. Grell G. A., Duchies J., Stauffer D. A. A Description of the Fifth-generation Penn Sta / NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note, NCAR / TN-398+IA. 1993. 122 p.

9. Хребтов М. Ю., Гаврилов А. А., Дектерев А. А., Тэпфер Е. С. Разработка математической модели динамики атмосферы и распространения вредных выбросов над г. Красноярском // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 8. С. 1 000–1 006.

10. Белолипецкий В. М., Генова С. Н. Parametrization of temperature inversion over Krasnoyarsk city. // E3S Web Conf., 392 (2023) 02028.

11. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 751 с.

V. M. Belolipetskii, S. N. Genova

Institute of Computational Modeling SB RAS, a subdivision of FRC KSC SB RAS,
Krasnoyarsk, Russia
e-mail: belolip@icm.krasn.ru, sv@icm.krasn.ru

TWO-LAYER PARAMETERIZATION OF THE TEMPERATURE INVERSION OVER THE KRASNOYARSK CITY

Abstract. A modification of the one-layer model developed by the authors for the study of temperature inversion in the atmosphere over Krasnoyarsk is considered. The theoretical basis of the model is the heat inflow equation for adiabatic processes in the atmosphere. The data of short-term air temperature forecasts obtained by mesoscale models are used. A joint analysis of supercomputer simulation data of the surface layer of the atmosphere was performed. The results of model calculations for December 2021 are consistent with the measured data on the formation/destruction times and the intensity of inversion

Keywords: temperature inversion, one-dimensional model, weather forecast

В. И. Бышев¹, А. В. Гусев^{1,2}, А. Н. Сидорова¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия
e-mail: byshev.v@mail.ru

О ТЕРМОДИНАМИКЕ ВЕРХНЕГО ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

Аннотация. Поскольку глобальный климат играет исключительно важную роль во всех сферах жизнедеятельности мирового сообщества, включая экономическое развитие, социальные, да и политические проблемы, то динамика современного климата требует глубокого понимания и способности его прогнозирования. Этого можно добиться при условии изучения причин наблюдаемых изменений глобальной природной среды и факторов, ответственных за эти изменения. Исследования показывают, что, очевидно, изменение термодинамического состояния верхнего деятельного слоя Мирового океана (ВДС МО) играет важнейшую роль в наблюдаемых сдвигах в динамике современного климата (середина 70-х годов прошлого века, канун 21-го столетия) и в очередном климатическом сдвиге, ожидаемом в течение ближайшего десятилетия. Изучение и мониторинг изменчивости термодинамического состояния ВДС МО заслуживают особого внимания

Ключевые слова: современный климат, климатический сдвиг, фазовая изменчивость, гидрологический фронт, глубокая конвекция, верхний деятельный слой (ВДС)

Введение. Гидрофизические эксперименты в МО, выполненные в фазу относительно влажного климата (1975–1999 гг): МЕГАПОЛИГОН (Тихий океан, 1987 г.) и АТЛАНТЭКС-90 (Атлантический океан, 1990 г.) позволяют обратить внимание на особенности термодинамических процессов, наблюдавшихся в ВДС в системах течений Куроисио и Гольфстрим. Для районов каждой из названных систем течений характерными процессами являлись: глубокая конвекция, поддерживающая аномально высокие потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу, и трансфронтальный перенос вод, осуществляющий горизонтальный теплообмен через гидрологический фронт. Состояние атмосферы в районах тепловой разгрузки океана определялось развитием аномального многослойного облачного покрова, существенно сокращающего приток коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана.

Использованный фактический материал. Результаты численного моделирования [1], материалы крупных гидрофизических экспериментов: ПОЛИГОН-70 [2], ПОЛИМОДЕ [3], МЕГАПОЛИГОН [4], АТЛАНТЭКС-90 [5] и диагностические расчеты [6], позволили связать особенности динамики современного климата с изменчивостью теплосодержания МО [7; 8].

Обсуждение. Изменение расходов течений, интенсификация трансфронтального обмена (перенос вод через гидрологический фронт, рис. 1),

глубокая конвекция (вертикальный теплообмен в пределах ВДС, рис. 2) определяют термодинамическое состояние районов основных систем течений МО (Курисио, Гольфстрим, Антарктическое Циркумполярное, Сомалийское и др.), характеризую высокие потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу, формируя в последней аномальную влажность и облачность, которые экранируют приток коротковолновой солнечной радиации к земной поверхности.

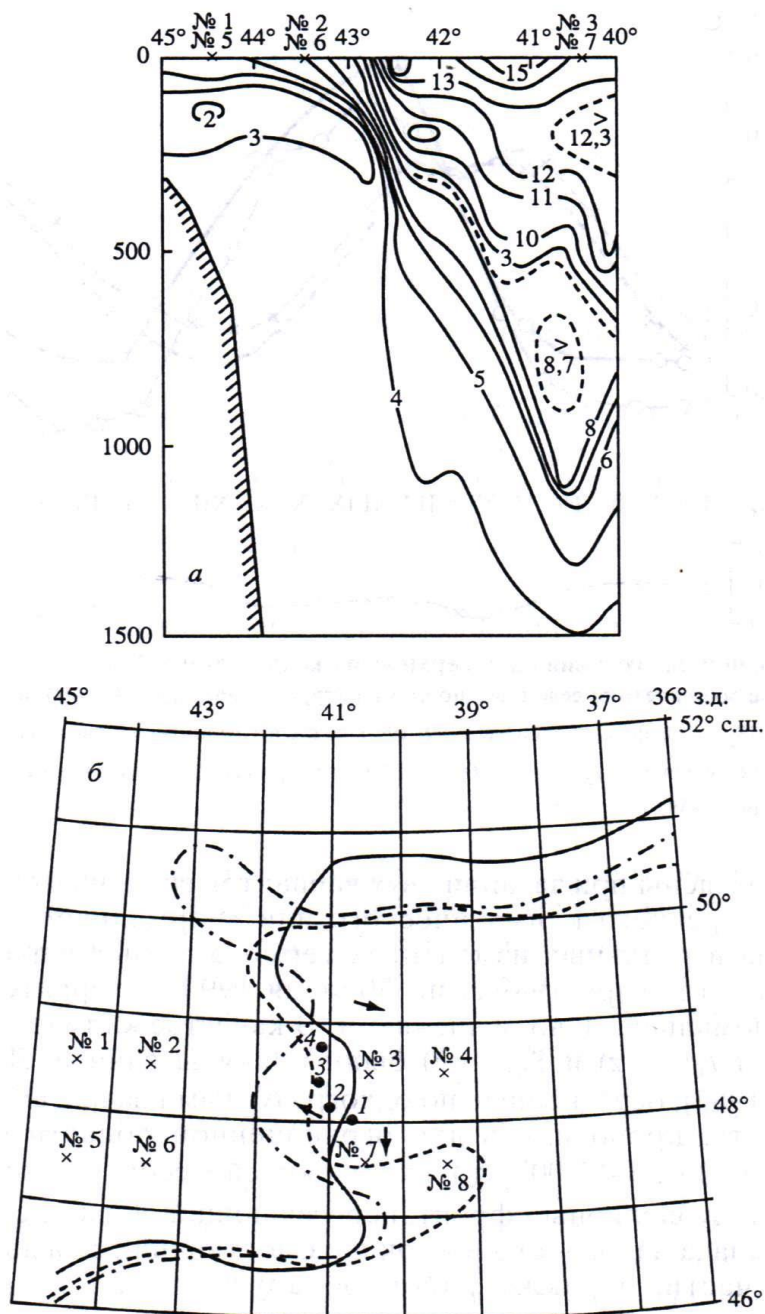


Рис. 1. Зональный (вдоль 48° с.ш.) разрез температуры (а), выполненный 13–15.06.1990 г. НИС «Академик Курчатов» (50-й рейс), и положение изотермы 12°С на поверхности океана с 22 по 29.06.1990 г. (б). Точками указано положение центра линзы на разные даты: 1 – 16.06, 2 – 25.06, 3 – 28.06. и 4 – 30.06.1990 г.; крестиками – центры одноградусных квадратов N 1–8, стрелками – измеренные течения

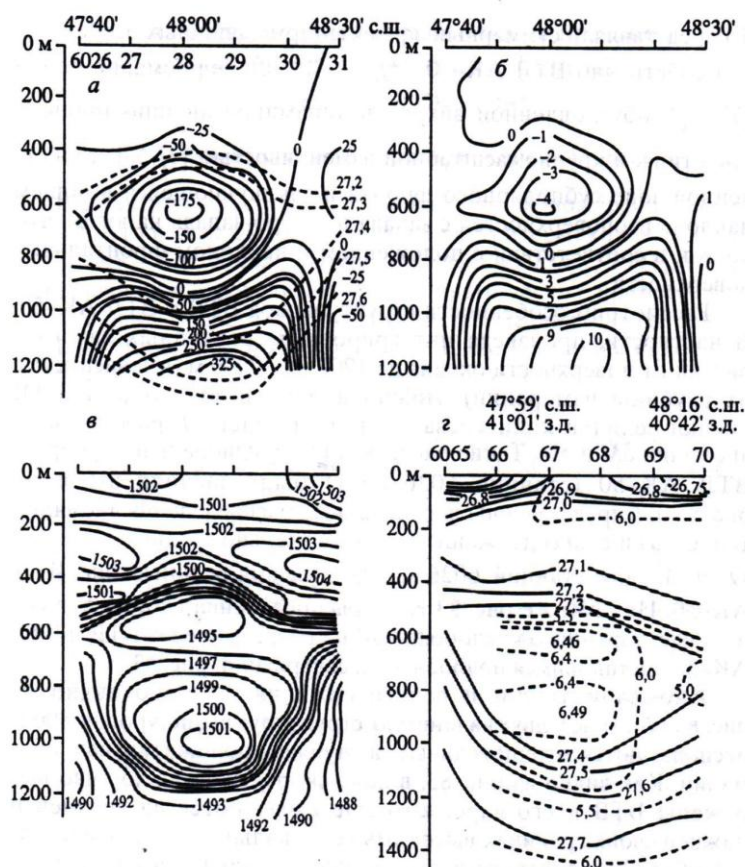


Рис. 2. Распределение аномалий теплосодержания 10^7 Дж/м² (а), солесодержания 10^{-1} кг/м² (б), скорости звука м/с (в) и кислорода мл/л (г) на разрезе через внутритермоклинную линзу. Штриховой линией на (а) нанесены изопикны, а на (г) – распределение кислорода. На верхней шкале (а–в) размечено положение станций 6026-6031 (слева направо), а на (г) станций 6065-6070.

Мониторинг названных выше процессов позволяет контролировать фазовую изменчивость термодинамического состояния океана и прогнозировать сроки очередного климатического сдвига. Аномальная вихревая структура океана в фазу тепловой разгрузки свидетельствует о его бароклинной неустойчивости, иллюстрируя переход доступной потенциальной энергии в кинетическую.

Заключение. Поскольку наблюдаемая фазовая изменчивость и сдвиги в современном климате сопровождаются существенными изменениями глобальной окружающей среды, то следовало понять и природу этого процесса, и механизмы, реализующие подобную динамику. Оказалось, что это проявление особенностей самой климатической системы, отражающей характерные связи и взаимодействие её составляющих: океана, атмосферы и континентов. На современном этапе роль изменчивости термодинамического состояния океана в наблюдаемую динамику текущего климата обозначилась наиболее ярко.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2021-0003.

Список источников

1. Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948-2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН, Сер. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.
2. Атлантический гидрофизический полигон-70. Метеорол. и гидрофиз. Исследования. Отв. ред. В. Г. Корт и В. С. Самойленко. М.: Наука, 1974. 317 с.
3. Атлас ПОЛИМОДЕ. Ред. Вурис А. Д., Каменкович В. М., Монин А. С. Woods Hole. Massachusetts. U.S.A., 1986. 375 с.
4. Эксперимент «Мегаполигон». Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана. Отв. ред. Ю. А. Иванов. М.: Наука, 1992. 415 с.,
5. Ivanov Yu. A., Byshev V. I., Romanov Yu. A., Sidorova A. N., On the structure of the North Atlantic Current in May-June 1990 // Journal of Oceanological Research. 2019. Vol. 47. No. 2. P. 33–63. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).4.
6. Бышев В. И., Фигуркин А. Л., Анисимов И. М. Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 2. С. 240–244.
7. Byshev V. I., Neiman V. G., Anisimov M. V., Gusev A. V., Serykh I. V., Sidorova A. N., Figurkin A. L., Anisimov I. M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. No. 7. P. 2 863–2 878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.
8. Byshev V. I., Gusev A. V., Neiman V. G., Sidorova A. N. Interdecadal Oscillation of the Ocean Heat Content as a Contribution to Understanding of Physical Aspects of the Present-Day Climate // J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10(8). 1064; <https://doi.org/10.3390/jmse10081064>.

V. I. Byshev¹, A. V. Gusev^{1,2}, A. N. Sidorova¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

² Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: abyshev.v@mail.ru; natoly.v.gusev@gmail.com

ON THE THERMODYNAMICS OF THE ACTIVE UPPER LAYER OF THE WORLD OCEAN

Abstract. Since the global climate plays an extremely important role in all spheres of life of the world community, including economic development, social and political problems, the dynamics of the modern climate requires a deep understanding and the ability to predict it. This can be achieved by studying the causes of observed changes in the global natural environment and the factors responsible for these changes. Studies show that, obviously, the change in the thermodynamic state of the active upper layer of the World Ocean (AUL of the WO) plays a crucial role in the observed shifts in the dynamics of the modern climate (mid-70s of the last century, on the eve of the 21st century) and in the next climate shift, expected over the next decade. The study and monitoring of the variability of the thermodynamic state of the AUL of the MO deserve special attention.

Keywords: *modern climate, climatic shift, phase variability, hydrological front, deep convection, active upper layer (AUL)*

Е. В. Варламова, В. С. Соловьев

Институт космофизических исследований и астрономии
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

ОТКЛИК ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА (TIN) НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Аннотация. Приведены результаты анализа отклика интегрального вегетационного индекса (TIN) на изменение климата в Восточной Сибири по данным GIMMS NDVI3g (1982–2015 гг.). В целом, в течение последних десятилетий на территории Восточной Сибири в условиях глобального потепления наблюдается положительная тенденция TIN. Наиболее высокий значимый рост TIN (на 11 ± 2 %) наблюдается на севере Якутии, максимальный прирост которого отмечается в течение последних ~10 лет (после 2004 г.). Показано, что рост TIN обусловлен повышением приземной температуры воздуха в мае (на $3,4 \pm 1,6^\circ\text{C}$) и июне (на $2,5 \pm 1,4^\circ\text{C}$), а также увеличением (на 30 ± 11 дней) количества теплых дней с температурой $>10^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: GIMMS NDVI3g, интегральный вегетационный индекс (TIN), Восточная Сибирь

Введение. Основной экологической проблемой современности является изменение климата, вызванное глобальным потеплением. На евразийском материке наибольшие значения тренда глобального потепления приходятся, в основном, на Восточную Сибирь (Якутию) и частично на север Западной Сибири [1–3]. К наиболее быстро реагирующим на изменения внешних условий компонентом природной среды является растительный покров, который, в свою очередь, играет важную роль в изменении климата. Для северных регионов с огромной территорией и ограниченной доступностью, данные дистанционного зондирования прекрасно дополняют наземные системы сбора информации, а в некоторых случаях являются единственным источником информации о происходящих изменениях. Целью данной работы является исследование динамики интегрального вегетационного индекса TIN в Восточной Сибири в условиях глобального потепления климата по данным ДЗЗ.

Данные и методика. Интегральный вегетационный индекс TIN, рассчитываемый как сумма 15-дневных значений NDVI за период май–сентябрь, отражает общее состояние растительности за вегетационный период. Для расчета TIN использовались глобальные композиты 15-дневных NDVI (продукт GIMMS NDVI3g, 1982–2015 гг. [4]). Для расчета продолжительности «теплых дней» (TSL – количество дней в году между датами устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через $+10^\circ\text{C}$

весной и осенью) были использованы данные реанализа ERA-Interim [5] по приземной температуре воздуха.

Результаты. За рассматриваемый период на большей части Восточной Сибири наблюдается значительное изменение TIN. Карта пространственного распределения линейного тренда TIN за 1982–2015 гг. показана на рис. 1, *а*. Как следует из рис. 1, *а*, на исследуемой территории преобладает положительная тенденция TIN. Прирост значений TIN в среднем по Восточной Сибири составил $\sim 4\%$. При этом статистически значимые ($p < 0,05$) положительные тренды занимают $\sim 57\%$ исследуемой территории, тогда как значимые отрицательные тренды занимают всего $\sim 2\%$ территории. Вместе с тем, из рис. 1, *б* видно, в какие годы наблюдаются максимальные значения TIN. Показано, что преимущественно на севере Восточной Сибири максимальный прирост TIN наблюдается в течение последних ~ 10 лет.

Анализ пространственного распределения тренда TIN выявил область с наиболее высокими ($> 0,03$ в год) значениями тренда. Эта область (ROI) расположена на севере Восточной Сибири выше 65-й параллели северной широты, на севере Якутии. Граница ROI на рис. 1, *а* показана сплошной черной линией. Среднее значение тренда TIN на территории ROI составило $11 \pm 2\%$. Как было показано ранее [6], прирост TIN произошел в основном за счет увеличения NDVI в мае (на $19 \pm 5\%$) и июне (на $17 \pm 6\%$).

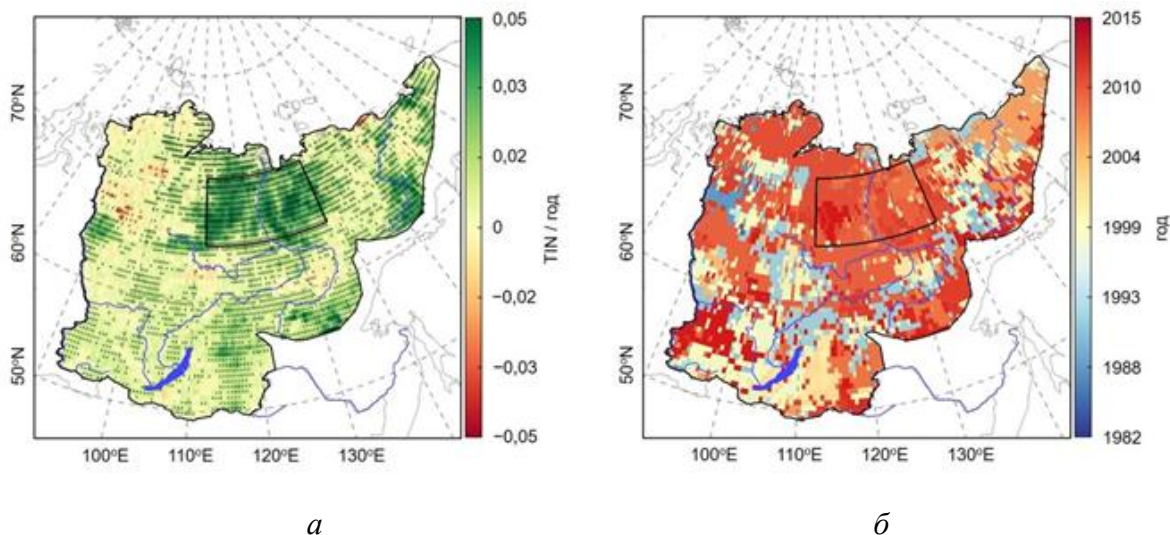


Рис. 1. *а*) пространственное распределение тренда TIN на территории Восточной Сибири за 1982–2015 гг. Точками отмечены области с $p < 0,05$. Черной линией выделена область ROI; *б*) годы (1982–2015) с максимальным значением TIN

Следует отметить, что на территории Восточной Сибири за рассматриваемый период наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха, среднее значение которого составило $1,5 \pm 0,7^\circ\text{C}$. Наиболее высокие и статистически значимые тренды температуры охватывают преимущественно северо-восточную часть Восточной Сибири (рис. не приведен). Также на севере Восточной Сибири было выявлено увеличение количества

теплых дней (TSL) [7]. В работе [7] было показано, что наиболее высокие и статистически значимые положительные тренды TSL преимущественно локализованы на севере Якутии. Среднее значение тренда TSL по территории ROI составило 30 ± 11 дней и обусловлено за счет тенденции более раннего (на 15 ± 8 дней) начала и позднего (на 17 ± 10 дней) окончания продолжительности теплых дней.

На рис. 2 показаны аномалии TIN и TSL относительно среднемноголетних (1982–2015), усредненные по территории ROI. Показано, что наиболее устойчивый рост TIN наблюдается с 2004 г., где также отмечены положительные аномалии TSL.

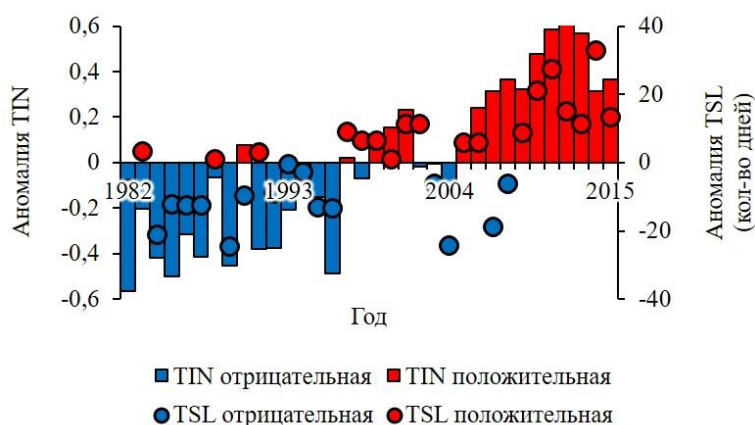


Рис. 2. Аномалии TIN и TSL относительно среднемноголетних, усредненные по территории ROI за 1982–2015 гг.

Заключение. На территории Восточной Сибири за 1982–2015 гг. в среднем преобладает положительная (4 ± 1 %) тенденция TIN на фоне роста среднегодовой температуры воздуха (на $1,5 \pm 0,7^\circ\text{C}$) и атмосферных осадков (на 34 ± 17 мм). Наиболее высокий значимый рост TIN (на 11 ± 2 %) наблюдается на севере Якутии, максимальный прирост которого отмечается в течение последних ~ 10 лет (после 2004 г.). Показано, что рост TIN обусловлен повышением приземной температуры воздуха в мае (на $3,4 \pm 1,6^\circ\text{C}$) и июне (на $2,5 \pm 1,4^\circ\text{C}$), а также увеличением (на 30 ± 11 дней) количества теплых дней с температурой $>10^\circ\text{C}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

Список источников

1. Field C. B., Barros V. R. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Climate change 2014. New York: Cambridge university press, 2014.
2. Gorokhov A. N., Fedorov A. N. Current Trends in Climate Change in Yakutia // Geography and Natural Resources. 2018. Vol. 39. № 2. P. 153–161.
3. Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 1. P. 1–10.

4. Pinzon J., Tucker C. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. № 8. P. 6 929–6 960.

5. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. № 656. P. 553–597.

6. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Исследование динамики растительного покрова Восточной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VIII Международной научной конференции [Электронный ресурс]. Красноярск: СФУ. 2021. С. 148–150.

7. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Многолетняя динамика вегетационного индекса растительности Сибири в условиях глобального изменения климата // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: ИОА СО РАН. 2023. С. D46–49.

E. V. Varlamova, V. S. Solovyev

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
e-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

RESPONSE OF THE TIME-INTEGRATED VEGETATION INDEX (TIN) TO CLIMATE CHANGE IN EASTERN SIBERIA

Abstract. In this study, we evaluated the response of the time-integrated vegetation index (TIN) to climate change in Eastern Siberia using GIMMS NDVI3g (1982–2015) data. In general, over the past decades, the positive trends of TIN prevail over Eastern Siberia under global warming. The significant increase of TIN by 11 ± 2 percentage is located in the northern part of Yakutia. Furthermore, the maximum increase of TIN is observed over the past ~10 years (after 2004). This greening trend is mainly due to a significant increase in air temperature in May ($3.4 \pm 1.6^\circ\text{C}$) and June (by $2.5 \pm 1.4^\circ\text{C}$), as well as a significant increase of the number of days with temperatures above 10°C by 30 ± 11 days.

Keywords: GIMMS NDVI3g, Time-integrated NDVI (TIN), Eastern Siberia

С. А. Васильева, В. С. Стародубцев

Институт космических исследований и астрономии
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия
e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru, starodubjr@ikfia.ysn.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НАД ПОСЛЕПОЖАРНЫМИ ТЕРРИТОРИЯМИ В ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА TROPOMI

Аннотация. Проведены исследования динамики распределения концентрации атмосферного метана по данным спектрометра TROPOMI (май-сентябрь 2018–2022 гг.) над послепожарными территориями в Якутии. Для проведения исследования были отобраны шесть обособленных гарей в центральной части Якутии за 2017–2019 гг. Были проведены исследования динамики концентрации метана над гарями, а также над участками, не подвергшимся воздействию лесных пожаров. Анализ полученных данных показал, что над гарями концентрация метана выше, чем над не горевшими участками. Так же было показано, что наблюдается тенденция к росту концентрации метана.

Ключевые слова: метан, TROPOMI, послепожарные территории, Якутия

Введение. Лесные пожары являются одним из значительных источников парниковых газов, включая метан [1]. Метан (CH_4) является вторым по мощности после углекислого газа (CO_2) парниковым газом. Потенциал нагрева атмосферы одной молекулы CH_4 в 28 раз выше, чем молекулы CO_2 , в расчете за сто летний период. Глобальный бюджет содержания атмосферного метана увеличился примерно в 2,6 раз с доиндустриальной эпохи [2].

Известно, что эмиссия углерода происходит во время горения, а в условиях криолитозоны возможно и после пожаров, так как увеличивается глубина сезонно-талого слоя, что ведет к деградации вечной мерзлоты [3–4].

Целью данной статьи является исследование динамики концентрации метана над после пожарными территориями в Якутии по данным спектрометра TROPOMI.

Данные и методы. В работе использовались данные общей концентрации CH_4 , спектрометра TROPOMI [5]. Данные концентрации метана из отдельных пролетов отфильтровывались по порогу качества ($qa_value=0,5$) и далее были рассчитаны среднемесячные значения CH_4 май-сентябрь 2018–2022 гг. Для выбора обособленных гарей и соответствующих гарям фоновых участков работе был использован продукт MCD64A1 v006 радиометра MODIS [6]. За обособленные гари принимались гари, не подвергавшиеся пирогенной активности с 2001 г. и после их образования, случаев повторного горения этих территорий

не наблюдалось. Среднемесячные значения NDVI были взяты из продукта MOD13A3 v061 [7].

Исследуемая территория. Якутия – регион, территория которого полностью находится в зоне вечномёрзлых грунтов. Для Якутии характерен резко субарктический континентальный климат с годовым диапазоном температур $\sim 100^{\circ}\text{C}$: от -70°C зимой до 40°C летом. Зимний сезон (определяемый наличием снежного покрова) обычно длится с конца сентября до начала мая.

Обсуждение. Для проведения исследования были отобраны обособленные гари в центральной части Республики Саха (Якутия) за 2017–2019 гг. На гарях №1 (2017 г.), 2 (2018 г.) и 3 (2019 г.) преимущественно произрастает лиственница. На гарях №4 (2017 г.), 5 (2018 г.) и 6 (2019 г.) преобладает кустарничково-травянистая растительность. В соответствии с типом растительности гарям были подобраны фоновые участки, не подвергавшиеся пирогенной активности за 2001–2022 гг. Тип растительности определялся по 100-метровой карте составленной по данным спутника PROBA-V [8]. Площадь гари №1 – 3935 км^2 , №2 – 1189 км^2 , №3 – 2787 км^2 , №4 – 445 км^2 , №5 – 667 км^2 , №6 – 451 км^2 . Площадь фоновых участков для гари №1 – 3867 км^2 , №2 – 1422 км^2 , №3 – 2382 км^2 . Для гарей №4, 5 и 6 фоновый участок один, его площадь составляет 485 км^2 .

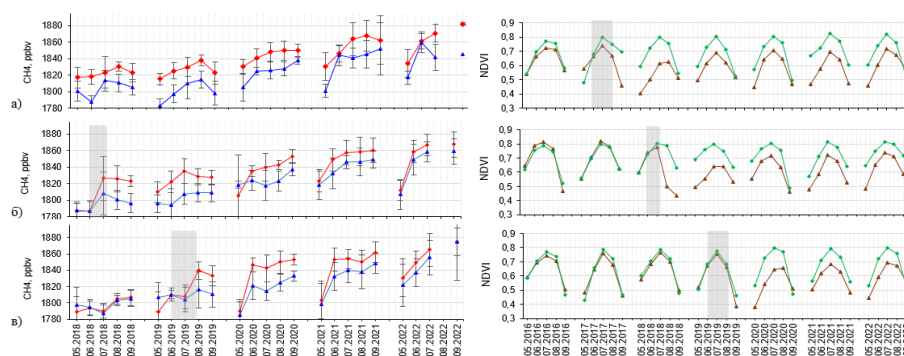


Рис. 1. Концентрация метана над гарями и индекс NDVI (лиственница):
а) №1 (2017 г.); б) №2 (2018 г.); в) №3 (2019 г.)

На рис. 1, а показана концентрация CH_4 и индекс NDVI гарей №1, 2 и 3 где основным видом растительности является лиственница и соответствующих им фоновых участков. Концентрация CH_4 над гарями отражена красным цветом, над фоном синим. Гарь №1 образовалась в 2017 г. Как видно на графике рис. 1, а разница между концентрацией метана над данной гарью и фоном видна на всем исследуемом периоде. Уровень концентрации CH_4 над гарью №2 (рис. 1, б) начинает отличаться от фона с июля месяца 2018 г. (пожар начался 30 июня, длился по 21 июля) и сохраняется в последующих годах. Разница между гарью №3 (рис. 1, в) и фоном начинает проявляться также после пожара, который начался в июне 2019 г. и продлился до конца августа. По данным индекса вегетационной активности NDVI наблюдается различие между горевшим и фоновым участком,

которое прослеживается для всех рассматриваемых выше гарей рис. 1. Индекс вегетации NDVI над гарью отражен коричневым цветом, над фоном зеленым. Отличие начинает наблюдаться вовремя и после лесного пожара и сохраняется на всем исследуемом периоде.

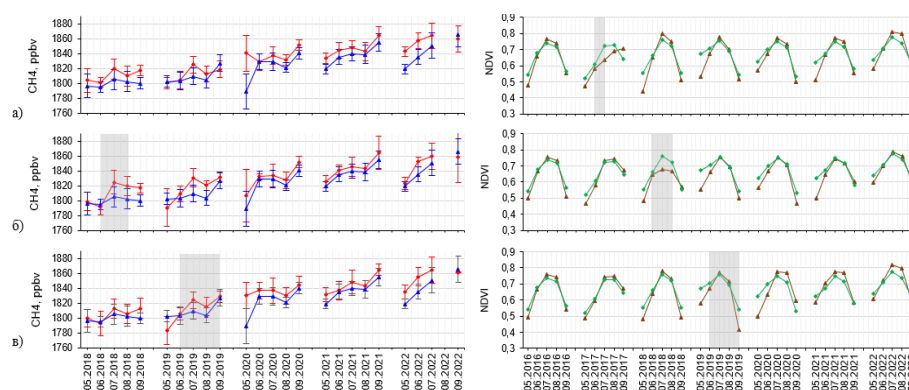


Рис. 2. Концентрация метана над гарями и индекс NDVI (кустарники/трава):
а) № 4 (2017 г.); б) № 5 (2018 г.); в) № 6

Концентрация CH_4 и индекс NDVI гарей № 4, 5 и 6 представлена на рис. 2. На данных гарях преимущественно распространена кустарниково-травянистая растительность. Следует отметить, что разница между концентрацией над гарями и фоновым участком наблюдается примерно в течение 1–2 лет, после этого периода концентрация над гарями и фоном находится примерно на одном уровне/в пределах ошибок. По данным индекса NDVI видно, что растительность восстановилась в кратчайшие сроки (1–1,5 года) (рис. 2). Это может говорить о слабом повреждении подстиляющей поверхности, и как следствие эмиссия метана на гарях сохранилась на своём естественном уровне.

На всех гарях и фоновых участках следует отметить возрастание уровня концентрации метана с каждым годом. Максимум концентрации наблюдается в конце летнего сезона. Возможно это связано с максимальной глубиной оттайки сезонно-талого слоя и последующим увеличением эмиссии метана.

Выводы. За рассматриваемый период май-сентябрь 2018–2022 гг. по данным спектрометра TROPOMI наблюдается тенденция к росту концентрации метана над исследуемой территорией.

Анализ динамики концентраций метана над выбранными гарями показал, что уровень концентрации метана над послепожарными территориями становится выше, чем над территориями, не подвергавшимися лесным пожарам. Концентрация метана остается высокой над теми гарями, где преимущественно распространена лиственница, остается выше фона на всем исследуемом периоде. Различимой разницы между уровнем концентрации CH_4 над гарями и фоном, где в основном преобладает кустарниково-травянистая растительность, не наблюдается. По вегетационному индексу NDVI для лиственничной растительности, разница между гарью и фоном наблюдается за весь исследуемый период. Индекс

вегетационной активности NDVI для гарей с преобладанием кустарнико-травянистой растительности, восстанавливается в кратчайший срок.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

Список источников

1. Панов А. В., Прокушкин А. С., Брюханов А. В., Корец М. А., Пономарев Е. И., Сиденко Н. В., Зражевская Г. К., Тимохина А. В., Андреа М. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродосодержащих газов от лесных пожаров в Сибири // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 30–38.
2. Saunio M., Bousquet P., Dlugokencky E. J., Patra P. K., et al. The global methane budget // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. Issue 3. P. 1 561–1 623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
3. Gibson C. M., Chasmer L. E., Thompson D. K., Quinton W. L., Flannigan M. D., David Olefeldt Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands // Nature Communications. 2018. Vol. 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
4. Anastasia A. Knorre, Alexander V. Kirilyanov, Anatoly S. Prokushkin, Paul J. Krusic, Ulf Büntgen, Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 652. P. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124>.
5. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov>
6. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. P. 72–85.
7. Didan, K.. MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V061. 2021, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061>.
8. Buchhorn, M., Lesiv, M., Tsendbazar, N. – E., Herold, M., Bertels, L., Smets, B. Copernicus Global Land Cover Layers–Collection 2. Remote Sensing 2020, 12Volume 108, 1044. DOI 10.3390/rs12061044.

S. A. Vasilieva, V. S .Starodubtsev

Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: tomskaya@ikfia.ysn.ru, starodubjr@ikfia.ysn.ru

METHANE CONCENTRATION DYNAMICS OVER THE POST-FIRE TERRITORIES IN YAKUTIA ACCORDING TO THE TROPOMI SPECTROMETER

Abstract. The dynamics of atmospheric methane concentration distribution over the post-fire territories in Yakutia were investigated from may 2018 to september 2022 using the TROPOMI spectrometer. From 2017 to 2019 six isolated burnt-out areas in the central part of Yakutia were selected for the study. Methane concentration dynamics over burning areas, as well as over areas that were not exposed to forest fires were studied as well. The analysis of the data obtained showed that the methane concentration above the burns is higher than over the unburned areas. It has also been shown that there is a tendency to increase the concentration of methane.

Keywords: methane, TROPOMI, post-fire territories, Yakutia

Е. А. Гаврилюк¹, И. М. Бавшин^{1,2}, Е. В. Тихонова¹, И. Н. Семенков^{1,3}

¹ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

² НП «Смоленское Поозерье», Пржевальское, Россия

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: egor@ifi.rssi.ru

ОЦЕНКА ПОРОДНО-ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ НП «СМОЛЕНСКОЕ ПООЗЕРЬЕ» НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СПУТНИКОВЫХ, ПОЛЕВЫХ И ИСТОРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Работа посвящена созданию карт породной и возрастной структуры лесов для территории Национального парка «Смоленское Поозерье» в рамках проекта РФФИ «Индикаторы агрогенного развития лесной территории». Породная структура оценивалась по результатам тематической классификации спутниковых данных Sentinel-1,2 на основе материалов наземных обследований. Для оценки возраста лесов использовалась комбинация результатов ручной оцифровки исторических карт, регрессионного моделирования по данным Sentinel-1,2, и анализа динамики современного зарастания по временной серии спутниковых данных Landsat. В результате были получены оценки распространения коренных древостоев и лесов на различных стадиях восстановительной постагрогенной сукцессии.

Ключевые слова: леса на постагрогенных почвах, породный состав лесов, возраст лесов, данные ДЗЗ, машинное обучение

Введение. Следы былой распашки прослеживаются во многих даже условно коренных (суб)бореальных сообществах на протяжении длительного времени. Это проявляется в морфологических и химических свойствах почв, видовом составе растительности и почвенных микробоценоза и зооценоза, что в конечном итоге определяет отличие некогда нарушенных экосистем от эталонных по структурным, функциональным и иным характеристикам. Процесс убыли сельского населения, наблюдаемый во многих регионах России с 20-х гг. XX в., сопровождается забрасыванием земель сельскохозяйственного назначения (пашен, сенокосов и пастбищ) и увеличением доли залесённых территорий. Комплексные междисциплинарные исследования постагрогенного восстановления растительности и почв принципиально важны для разработки эффективного управления некогда нарушенными экосистемами и понимания путей их восстановления. Такая работа в настоящее время проводится на территории Национального парка (НП) «Смоленское Поозерье» в рамках проекта РФФИ «Индикаторы агрогенного развития лесной территории». Проводимые исследования можно стратифицировать по нескольким взаимосвязанным направлениям: картографирование, таксационно-геоботанические и почвенные наземные обследования,

и статистическое моделирование. Главная цель картографического блока работ – оценка современного и исторического пространственного распределения наземных экосистем (в первую очередь, лесов и сельхозугодий) на территории НП, и в частности, формирование тематических карт породной и возрастной структуры лесов на основе совместного использования современных данных ДЗЗ, накопленных материалов наземных обследований и имеющихся исторических карт.

Территория исследования. НП «Смоленское Поозерье» (площадь – около 1,5 тыс. км²) расположен в пределах Демидовского и Духовщинского районов Смоленской области. Положение парка в экотоне между таежными и широколиственными лесами, совместно с ландшафтной структурой, определяет существующее ценотическое разнообразие. В пределах НП сохранились крупные массивы восточно-европейских лесов и что особенно важно – весь исходный комплекс ценозов (ельники, сосновые боры, хвойно-широколиственные леса, черноольшаники, экосистемы болот, рек и озер), а также представлены все виды сельскохозяйственного использования (пашни, сенокосы, пастбища, залежи).

Материалы и методы. Оценки современной породной структуры лесов парка были получены в результате тематической классификации спутниковых разносезонных композитных изображений, сформированных из сцен, собранных в 2019–2022 гг. аппаратами серий Sentinel-1,2 [1; 2]. Древостои подразделялись на пять типов лесов по доминантам древесного полога: (1) ельники, (2) сосняки, (3) смешанные широколиственные и хвойно-широколиственные леса, (4) вторичные мелколиственные леса с преобладанием березы, осины и серой ольхи, (5) мелколиственные леса с преобладанием черной ольхи. В качестве источника обучающих данных использовались геоботанические описания с 478 наземных пробных площадей, заложенных в период с 2006 по 2022 г, дополненные таксационными материалами, полученными при проведении лесоустройства парка в 2014–2015 гг.

Для оценки возраста лесов использовалась комбинация результатов ручной оцифровки исторической военно-топографической карты Генерального Штаба Рабоче-крестьянской Красной армии масштабом 1:50 000 (карта РККА), регрессионного моделирования на основе данных Sentinel-1,2, и анализа динамики современного зарастания территории НП по многолетним спутниковым данным Landsat [3]. Карта РККА отражает ситуацию на местности по состоянию на 1927 г., и использовалась для выделения наиболее старых, (условно-) коренных лесов (возрастом 100 и более лет), а также границ максимального распространения сельхозугодий. Возраст лесов, возникших в постсоветский период (за последние 30–35 лет), определялся путем последовательного выделения и совмещения границ лесного покрова на разновременных композитных изображениях Landsat, объединенных в непрерывную временной серию с шагом в 5 лет, методом пороговой классификации спектрального индекса FCI [4]. Для оставшихся

лесов возраст (в диапазоне 30–100 лет) моделировался на основе того же набора данных, что использовался при оценке породного состава.

Все использованные спутниковые композитные изображения формировались инструментами Google Earth Engine [5]. Классификационная (для пород) и регрессионная (для возраста) модели обучались методом случайных лесов [6]. Общая методика обработки данных ДЗЗ для получения геопространственных оценок биометрических и структурных характеристик лесов, использованная в работе, описана в [7].

Результаты. В результате были получены тематические продукты, отражающих современную возрастную структуру древостоев и распределение основных древесных пород по территории НП с пространственным разрешением 10 м/пиксель (см. рис. 1).

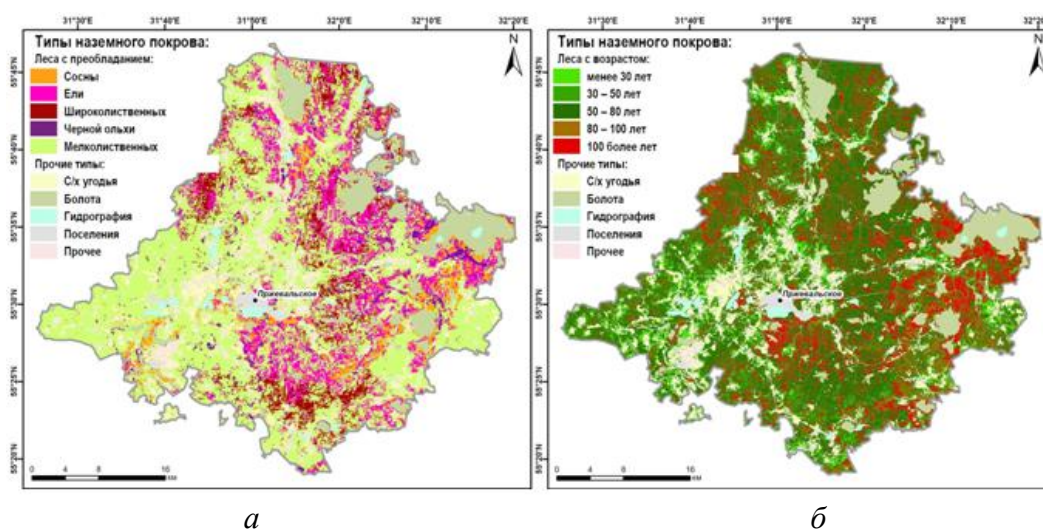


Рис. 1. Породная (а) и возрастная (б) структура лесов НП «Смоленское Поозерье»

Общая точность классификации породной структуры лесов составила 86,8 % (каппа Коэна 0,82). Точность распознавания отдельных классов варьирует от 71 % до 92 %. Коэффициент детерминации полученной регрессионной модели возраста составил $R^2 = 0,45$ при средней абсолютной ошибке MAE = 10,4 года и средней квадратической ошибке RMSE = 14,3 года. Для целевого диапазона 30–100 лет ошибки модели были ниже – MAE = 8,6 года, RMSE = 11,2 года.

На основе пространственного пересечения двух продуктов были получены оценки распространения по территории парка коренных древостоев и лесов на различных стадиях восстановительной постагрогенной сукцессии. На настоящий момент леса занимают почти 79 % территории НП (на 1927 г – 55 %). Около 42 % современных лесов парка (около 50 тыс. га) произрастает на бывших сельскохозяйственных угодьях разной давности забрасывания. Потенциальные (условно-) коренные насаждения занимают 11 % площади лесов. Из них 1,9 % – это сосняки, 5,4 % – ельники, 0,8 % – смешанные хвойно-широколиственные леса. Суммарно, сосновые древостои занимают 7 % от площади лесов парка (2,5 % произра-

стают на заброшенных с/х-угодьях), еловые – 19,1 % (4 %), широколиственные – 9,4 % (0,7 %).

Выводы. Полученные результаты обладают достаточной точностью для решения одной из первичных задач проекта – локализации потенциальных участков (условно-) коренных лесов и древостоев на разной стадии восстановительной постагрогенной сукцессии, с целью закладки в них пробных площадей для проведения комплексных наземных обследований. Помимо этого, тематические продукты породно-возрастной структуры лесов являются исходными данными для составления карты растительности парка и могут быть использованы в качестве независимых переменных при построении интегральной статистической модели взаимодействия различных компонентов лесных экосистем.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №21-74-20171 и ГЗ ЦЭПЛ РАН (р/н НИОКТР 121121600118-8, тематическая обработка данных Landsat).

Список источников

1. ESA Sentinel-1 [Электронный ресурс]. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (дата обращения 13.07.2023).
2. ESA Sentinel-2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (дата обращения 13.07.2023).
3. USGS Landsat Missions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat> (дата обращения 13.07.2023).
4. Ershov D. V., Gavriilyuk E. A., Koroleva N. V., Belova E. I., Tikhonova E. V., Shopina O. V., Titovets A. V., Tikhonov G. N. Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-soviet period: A comparative Landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus // *Remote Sensing*. 2022. V.14. No2. P. 322.
5. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Pyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
6. Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. № 1. P. 5–32.
7. Гаврилюк Е. А., Королева Н. В., Карпухина Д. А., Сочилова Е. Н., Ершов Д. В. Геопространственное моделирование биометрических и структурных характеристик лесов Брянской области на основе спутниковых и выборочных лесотаксационных данных // *Лесоведение*. 2021. № 6. С. 609–626.

E. A. Gavriilyuk¹, I. M. Bavshin^{1,2}, E. V. Tikhonova¹, I. N. Semenov^{1,3}

¹ Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Moscow, Russia

² Smolenskoye Poozerye National Park, Przhevalskoye, Russia

³ M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

e-mail: egor@ifi.rssi.ru

MAPPING THE FOREST SPECIES AND AGE STRUCTURE IN SMOLENSKOYE POOZERYE NATIONAL PARK BASED ON SATELLITE, FIELD AND HISTORICAL DATA CONSOLIDATION

Abstract. In this paper, we focus on the mapping of the forest species composition and age structure in the Smolenskoye Poozerye National Park within the scope of the Russian Sci-

ence Foundation project “Indicators of the agrogenic stage of forest development”. The species composition was estimated by performing the thematic classification of the Sentinel-1,2 imagery based on field surveys. To estimate the forest age, a combination of manual digitizing of historical maps, regression modeling based on Sentinel-1,2 data, and modern natural afforestation dynamics analysis based on Landsat time series was used. As a result, we obtained the assessments of the spatial distribution of native forests and stands at various post-agrogenic restorative succession stages.

Keywords: forests on post-agrogenic soils, species composition, forest age, remote sensing data, machine learning

О. Л. Гиниятуллина, П. В. Гречишкин

АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ (Кемеровский филиал)», Кемерово, Россия
e-mail: skiporol@mail.ru, pv_grechishkin@mail.ru

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ СЕЛИТЕБНЫХ ЗОН НА ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Аннотация. Рассматривается пример мониторинга зон городской застройки на подработанной территории ликвидированного объекта угольной шахты с использованием данных радиолокационной съемки. Приводятся результаты интерферометрической обработки данных и оценки вертикальных смещений поверхности, которые демонстрируют процесс сдвижения горных пород после частичного затопления главного конвейерного уклона шахты. Выделяется полигон зданий социальной инфраструктуры, которым требуется применение дополнительных мер по укреплению фундамента и мониторинга состояния строений.

Ключевые слова: мониторинг деформаций поверхности, радиолокационные данные, интерферометрическая обработка, подработанные территории, селитебные зоны

Вопросы мониторинга поверхности селитебных зон на подработанном пространстве шахт и рудников одна из актуальных задач дистанционного зондирования. В России особенно много промышленных населенных пунктов, например, пос. Боровой (Кузбасс), г. Березники (Пермский край) и др., которые изначально располагались вблизи границы горного отвода разрабатываемых месторождений, постепенно расширяясь по территории закрытых объектов добычи полезных ископаемых. Высокие современные темпы урбанизации приводят к освоению подработанных площадей, где существует высокая вероятность образования провалов и деформаций поверхности. В настоящее время проблемам освоения подработанных пространств в рамках городских агломераций уделяется достаточно большое внимание: от вопросов возникновения экологических проблем до расчета экономических рисков в результате эксплуатации данных территорий [1–4]. Тем не менее предлагаемые методы, как правило, ориентированы на небольшие площади и существенно ограничены во временном диапазоне исследования. Чаще всего исследуют территорию с уже зафиксированным фактом возникновения провала без оценки состояния прилегающих территорий.

С этой точки зрения применение данных дистанционного зондирования для мониторинга больших пространств селитебных зон является одним из наиболее эффективных и удобных инструментов. В Кемеровском филиале АО «Научно-исследовательский институт горной механики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ»

выполнялся мониторинг жилой застройки в пос. Боровой (Кемеровская область) площадью 300 м², которая располагается на территории ликвидированного объекта угольной шахты. Целью исследования было определение влияния закрытого объекта добычи на состояние территории с целью предотвращения деформаций объектов социальной инфраструктуры.

Согласно проектной документации, на данной территории располагается главный конвейерный уклон шахты, который затоплен с 1998 по 2016 г. до отметки +150,3 м. В течении 2016–2020 г., наступлением водоотлива с разведочного уклона уровень воды в нем был понижен и поддерживался на уровне горизонта +50,9 м. до 2020 г. Начиная с 2020 г, вода не откачивалась, выработки затоплены до отметки +152,2 м. Ликвидация объекта выполнена с установкой изоляционных перемычек, пространство между которыми засыпано по всему сечению. Фактическая ликвидация устья выполнена правильно, риски провалов сведены к минимуму. Несмотря на это на поверхности в 2021 г. были зафиксированы зоны провалов в районах городской застройки, что потребовало дополнительного изучения местности. В 2022 г. специалистами ВНИМИ выполнялись работы по оценке состояния указанной территории геофизическими инструментальными средствами, расчетами математических моделей и обработкой данных дистанционного зондирования. Именно использование космоснимков позволило показать динамический характер изменений обосновать основные технологические решения.

Для оценки деформации земной поверхности исследуемой территории использовались радиолокационные снимки активного сенсора Sentinel-1В Европейского космического агентства (ESA). Периодичность прохода спутника над исследуемой территорией составляет 12 дней. Первичными данными для расчета смещений являются снимки первого уровня обработки типа SLC, содержащие амплитуду и фазу отраженного от земной поверхности сигнала.

Радарная интерферометрия обеспечивает одномоментную съемку большой территории и минимальное влияние атмосферных помех (облачность, туман). Однако, уплотненный снежный покров высотой более 10 см является сильным экраном для радиоизлучения и сильно искажает картину рельефа. Поэтому для расчета смещений на исследуемой территории рекомендуется использовать снимки с апреля по октябрь.

Технология получения смещений и скоростей смещений содержит последовательность вычислительных процедур, включающую подготовку снимков в специализированном ПО Snap, развертку фазы в специализированном ПО SnapHu и расчет скоростей смещений методом SBAS в специализированном ПО Mintpy. Вся схема и отдельные алгоритмы вычислений стандартизированы и обеспечивают высокую достоверность значений конечных величин, прежде всего, скоростей смещений.

Конечным продуктом является векторная точечная карта. Каждая точка имеет набор атрибутов, в т. ч. географические координаты, отклоне-

ние от цифровой модели рельефа на дату снимка, среднюю скорость изменения вертикальных смещений (в мм/год) и другое. Финальное разрешение составляет 20×20 м на точку. Следовательно, каждая точка представляет собой интегральный показатель величины смещения в данном квадрате, который формируется как средняя величина изменения поверхности.

Область интереса представляет квадрат со стороной 7,5 км, накрывающий п. Боровой в пригороде г. Кемерово. Для определения скоростей смещений на исследуемой территории в длительной ретроспективе использованы снимки за 5 лет с 2018 по 2022 гг. С учетом сезонности это составило в среднем 18 снимков в год и 90 снимков на все исследование.

Ниже приводятся результаты расчетов смещений за указанный промежуток времени (рис. 1).

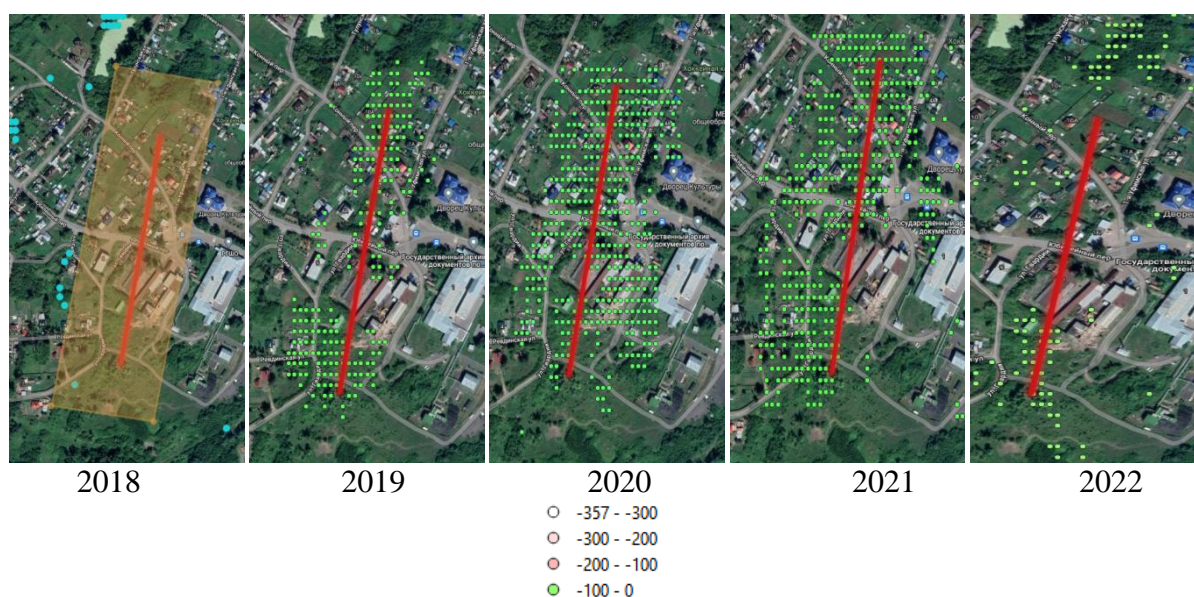


Рис. 1. Результаты расчета смещений методом радарной интерферометрии за 2018–2022 гг.

В 2018 г. в зоне обследования не зафиксированы существенные подвижки земной поверхности. Методами радарной интерферометрии зафиксированы отдельные участки изменения поверхности в диапазоне $[-7; -15]$ см вне зоны закрытого угольного объекта.

В 2019 г. формируются отчетливые зоны смещений в диапазоне $[0; -10]$ см по всей длине устьевой части Главного конвейерного уклона. Ширина коридора изменения поверхности изменяется от 118 до 206 м по поверхности.

В 2020 г. процессы смещения усиливаются, площадь изменения возрастает, ширина полосы изменений достигает 350 м, с вертикальным оседанием в пределах $[0; -10]$ см.

В 2021 г. изменения в нижней части исследуемой зоны локализуются, хотя по общей площади также происходят деформационные процессы с оседанием в пределах 10 см.

В 2022 г. формируются отчетливые зоны смещений в диапазоне $[0; -8]$ см, которые соответствуют устьевой части Главного конвейерного

уклона. Можно сделать заключение о прекращении активных изменений на исследуемой площади.

Таким образом, на выделенной в результате анализа территории следует вести дополнительный мониторинг зданий социальной инфраструктуры в соответствии официальной документацией [5–8] и применять дополнительные методы для упрочнения фундаментов и сохранения объектов.

Учитывая, что при ликвидации горных выработок путем полного или частичного затопления происходит активизация сдвижения горного массива, а размещение объектов городских объектов приводит к увеличению рисков их разрушения, необходимо вести обязательный контроль сдвижения и деформаций земной поверхности в рамках организованного сейсмогеодинамического полигона, и в этом отношении применение данных радиолокационного мониторинга позволяет получать достоверную картину в динамике.

Список источников

1. Питулько В. М., Кулибаба В. В. Реновация природных систем и ликвидация объектов прошлого экологического ущерба. М., 2019. 497 с.
2. Мамаев Ю. А., Стольникова П. В. Модели природно-техногенных условий как основа зонирования подработанных территорий калийного месторождения по степени экономического риска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 3. С. 91–96.
3. Пустовойтенко В. П., Мансуров Е. Э. Строительство зданий и сооружений на подрабатываемых территориях // Перспективы развития строительных технологий: материалы конференции. Днепропетровск, 2014. С. 133–138.
4. Кириллов С. Г., Семькин Е. С., Мокрицкая Н. И. и др. Сдвижение земной поверхности при отработке Талнахского и Октябрьского месторождения. Меры охраны подрабатываемых зданий и сооружений // Горная Промышленность. 2020. № 6. С. 106–111.
5. СНиП 2.01.09-91 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях.
6. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.
7. Методические указания по проектированию промышленных зданий на просадочных грунтах. К.: НИИСК, 1984. 103 с.
8. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1975. 156 с.

O. L. Giniyatullina, P. V. Grechishkin

Research institute of rock mechanics and mine survey. Inter-branch research center “VNIMI”
(Kemerovo branch), Kemerovo, Russia
e-mail: skiporol@mail.ru, pv_grechishkin@mail.ru

THE REMOTE MONITORING OF DEFORMATIONS OF RESIDENTIAL ZONES IN UNDERGROUND TERRITORIES

Abstract. An example of monitoring urban areas in the underworked area of a liquidated coal mine using radar survey data is considered. The results of interferometric data processing and estimation of vertical displacements of the surface are presented, which demonstrate the process of rock displacement after partial flooding of the main conveyor slope of the

mine. A polygon of social infrastructure buildings is allocated, which require the use of additional measures to strengthen the foundation and monitor the condition of buildings.

Keywords: surface deformation monitoring, radar data, interferometric processing, undermined areas, residential areas

А. А. Гостева¹, А. К. Матузко²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, akmatuzko@icm.krasn.ru

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОДОРΟΣЛЕЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Аннотация. Водные объекты большой протяженности при исследовании на содержание водорослей требуют дополнительных дистанционных инструментов в связи с большим количеством труднодоступных мест. Для определения наличия водорослей в р. Енисей в черте города Красноярска в работе применен индекс цветения водорослей SABI (Surface Algal Bloom Index). Для возможности тиражирования алгоритма на протяженности всего русла реки было отмечено, что в местах скопления водорослей температура воды выше, чем в чистых участках. Для апробации авторами был исследован участок Абаканской протоки р. Енисей.

Ключевые слова: SABI, Landsat, водоросли, Енисей, дистанционное зондирование, LST

Введение. Одним из важных показателей качества реки, является содержание в ней микроорганизмов животного и растительного происхождения. Учитывая, тот факт, что река Енисей одна из самых полноводных рек в России [1] и физически проводить исследование водной поверхности является весьма затруднительным необходимо рассмотреть возможности определения локализации водорослей дистанционными методами. В работе рассмотрено применение спутниковых снимков Planet Scope и Landsat 8–9 для локализации водорослей. Учитывая, что в черте города Красноярска наблюдается интенсивное зарастание водорослями р. Енисей, в качестве пробного участка будет рассмотрена Абаканская протока.

Материалы и методы. В работе рассмотрено применение индекса цветения водорослей SABI (surface algal bloom index) в Абаканской протоке реки Енисей по спутниковым данным высокого разрешения Planet Scope. Для поиска взаимосвязи роста водорослей в акватории реки с температурой воды использовались спутниковые данные Landsat 8–9 [2].

SABI – это эмпирический алгоритм, разработанный для обнаружения плавающей в воде биомассы, которая имеет ближний инфракрасный отклик, аналогичный отклику наземной растительности, чувствительных к океану; синий (характерный для чистой воды) и зеленый (характерный для цветения водной толщи). Определяется индекс SABI по следующей формуле:

$$SABI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_B + \rho_G},$$

где ρ_{NIR} – интенсивность излучения в канале NIR (ближнем инфракрасном), ρ_R – интенсивность излучения в канале RED (красный), ρ_B – интенсивность излучения в канале BLUE (синий), ρ_G – интенсивность излучения в канале GREEN (зеленый).

Если полученные значения индекса SABI выше нуля, то это считается показателем относительно высокой фотосинтетической активности водорослей, при этом важным фактором является пространственное положение водорослей в толще воды. Максимальные значения индекса свидетельствуют о развитии водорослей у поверхности воды, а низкие или отрицательные значения являются индикатором развития водорослей в более глубоких слоях водной толщи либо их отсутствием. Важно отметить, что индекс SABI наилучшим образом подходит для речной воды, не обладающей значительной глубиной, и оценки интенсивности цветения водорослей в случаях преимущественно поверхностного сосредоточения микроорганизмов.

Для расчета индекса применены данные Planet Score с разрешением 3 метра. По снимкам высокого разрешения были посчитаны 4 сцены в городе Красноярске (27 апреля 2020, 03 июля 2020, 12 июля 2020, 29 июля 2020). Рассмотрен участок Абаканской протки, расположенный возле правобережной части города Красноярска возле острова Отдыха.

Учитывая взаимосвязь теплой воды и распространение водорослей, дополнительно в работе были использованы данные о температуре воды, полученные по космическим изображениям Landsat 8–9 [3]. Авторами собран архив значений температуры поверхности в окрестностях города Красноярска по данным Landsat 8–9 за последние 10 лет. Более подробно процесс получения значений температуры поверхности описан в других работах авторов [4].

Результаты и обсуждения. На рис. 1, *а* представлен снимок на 27 апреля 2020 г., самое начало вегетационного периода и на изображении водоросли не видно достаточно хорошо, они практически не отличаются от водной поверхности. Следующий временной период 3 июля 2020 г. (рис. 1, *б*) водоросли заметны уже относительно соседних однородных водных участков. Значение индекса SABI около 2. Пик вегетационного активности наступает с середины лета и активная фаза цветения водорослей наблюдается на снимке 12 июля 2020 г., что изображено на рис. 1, *в*. Значение индекса SABI достигает значения 2,8. Максимально просматриваются водоросли в этой серии снимков 29 июля 2020 г., расчет индекса SABI на эту дату представлен на рис. 1, *г*, значение индекса достигает значения 4 единиц.

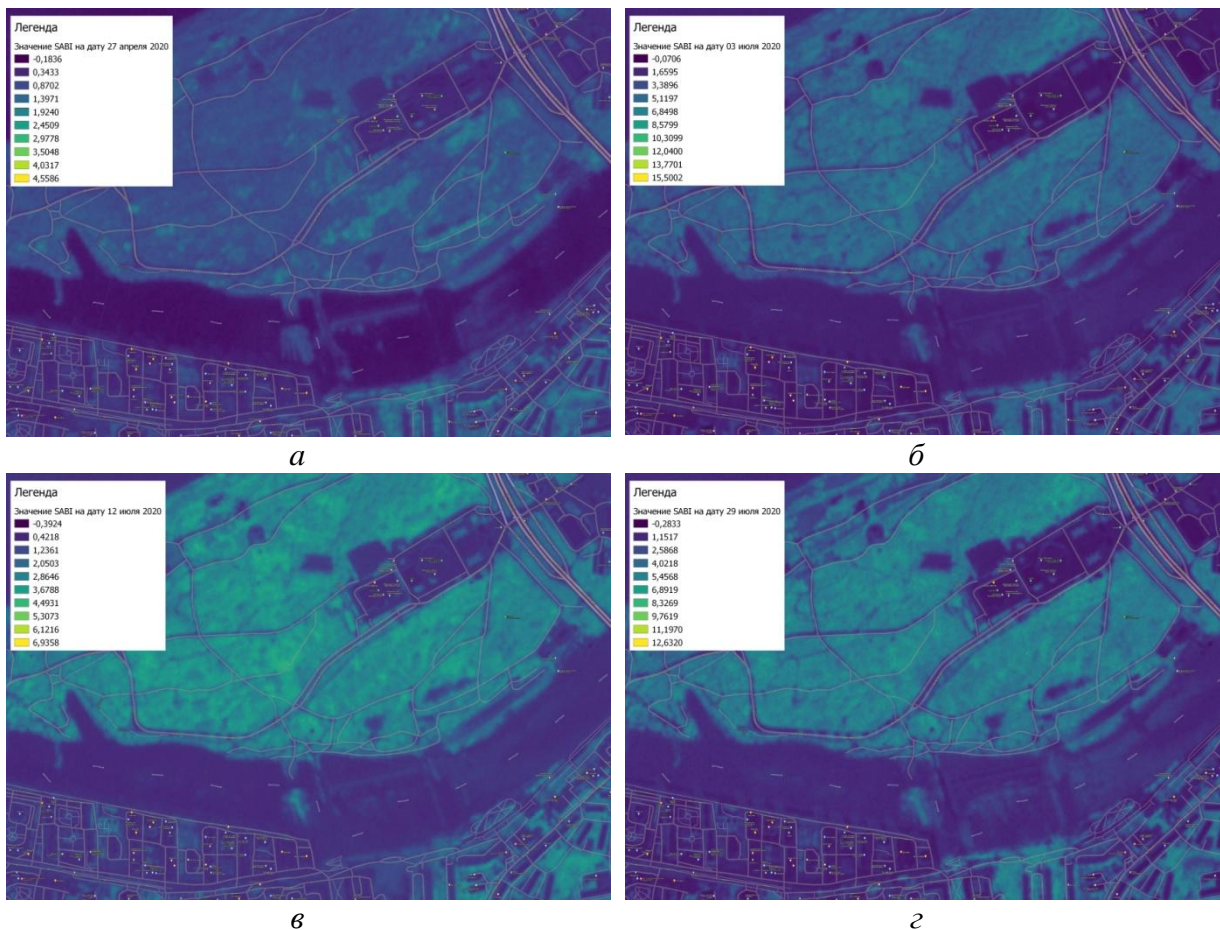


Рис. 1. Значение индекса SAVI в Абаканской протоке р. Енисей: а) дата 27 апреля 2020 г.; б) дата 3 июля 2020 г.; в) дата 12 июля 2020 г.; г) дата 29 июля 2020 г.

После рассмотрения индекса SAVI были выделены зоны с локализацией водорослей они показаны на рис. 2, а. На рис. 2, б представлен расчет температуры поверхности на 12 июня 2020 г., где видно, что в основном русле вода холоднее (обозначена зеленым цветом, что соответствует примерно $+13^{\circ}\text{C}$), чем в Абаканской протоке, где температура воды примерно $+25^{\circ}\text{C}$.

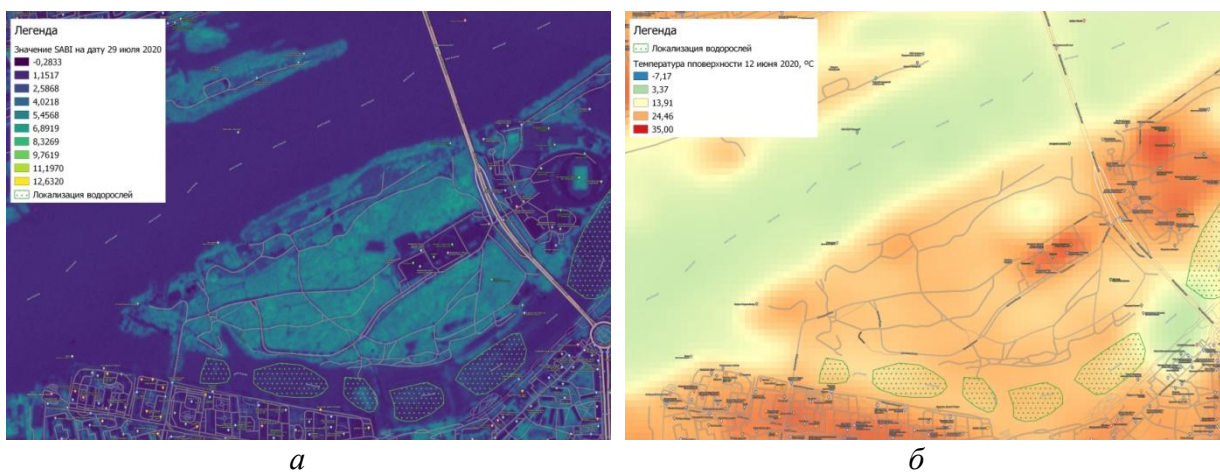


Рис. 2. Локализация водорослей в Абаканской протоке: а) зоны с водорослями, выделенные по SAVI 29 июля 2020 г.; б) температура поверхности 12 июня 2020 г.

Тенденция к появлению водорослей часто связана с повышенной температурой воды, поэтому при поиске загрязненных участков можно выделить два этапа, где сначала по тепловым снимкам рекомендуется находить более прогретые участки реки, а потом по снимкам более высокого разрешения производить расчёт SABI и выявлять наличие растительных микроорганизмов.

Выводы. Исследование индексом SABI Абаканской протоки р. Енисей выявило признаки водорослей. Так же температура воды в этом месте выше, чем в основном русле, совместное исследование этих факторов определяет возможность комплексного применения спутниковых снимков для анализа речных микроорганизмов и растительности. Социальный эффект работы – привлечь внимание общественности информацией о зонах цветения русла реки Енисей, что должно способствовать организации работ по очистке реки от водорослей.

Список источников

1. Космаков И. В. Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее / И. В. Космаков; Красноярское УГМС; Красноярский филиал Сиб. науч.-исслед. гидрометеорологического ин-та; под ред. Е. Г. Попова, Д. А. Буракова. Красноярск, 2001. 143 с.

2. Alawadi F.. Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2010.

3. Boucher J., Weathers K. C., Norouzi H., Steele B. Assessing the effectiveness of Landsat 8 chlorophyll a retrieval algorithms for regional freshwater monitoring // Ecological Applications. 2018. Vol. 4. Pp. 1–11.

4. Гостева А. А., Матузко А. К., Якубайлик О. Э. Дистанционные методы в изучении температуры поверхности земли в городах (на примере г. Красноярска, Россия), ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2018. Т. 24, Ч. 2. С. 195–205. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205.

A. A. Gosteva¹, A. K. Matuzko²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of computational modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: AGosteva@sfu-kras.ru, akmatuzko@icm.krasn.ru

ALGORITHM FOR DETERMINING ALGAL LOCALIZATION IN THE COMPLEX USE OF SPACE IMAGES

Abstract. Long-distance water bodies require additional remote instruments for testing for algae content due to the large number of hard-to-reach places. To determine the presence of algae localizations, the SABI (Surface Algal Bloom Index) algal bloom index was used in the work. To be able to replicate the algorithm along the entire riverbed, it was noted that in places where algae accumulated, the water temperature was higher than in clean areas. For testing, the authors investigated the section of the Abakan channel of the river. Yenisei.

Keywords: SABI, Landsat, algae, Yenisei, remote sensing, LST

Р. Ю. Данилов¹, О. Ю. Кремнева¹, И. И. Середа², М. В. Зимин²

¹ Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия

² Московский Государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: kremenoks@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПШЕНИЧНЫХ АГРОЦЕНОЗОВ

Аннотация. На опытном поле Федерального центра биологической защиты растений были выделены тестовые участки с посевами озимой пшеницы для создания искусственного инфекционного фона развития патогенов. Методика исследований была основана на временной синхронизации высокоточных наземных спектрометрических измерений со спутниковой и беспилотной дистанционной съемкой и сопоставлением полученных данных с результатами фитопатологических полевых обследований. В ходе изучения динамики спектральных характеристик посевов озимой пшеницы было установлено, что наиболее информативными спектральными диапазонами при использовании космических снимков и мультиспектральных камер, размещенных на БПЛА, являются красный и ИК диапазоны. Использование вегетационных индексов при оценке динамики спектрального образа различных съемочных систем позволяет привести их к схожим значениям.

Ключевые слова: пшеница, возбудители болезней, фитосанитарный мониторинг, дистанционное зондирование Земли, гиперспектральный анализ, спектрометрия

Определяющим звеном успешной защиты растений от вредных организмов является эффективный фитосанитарный мониторинг позволяющий осуществить своевременную диагностику развития болезней в посевах сельскохозяйственных культур [1]. В современных реалиях интенсивного сельского хозяйства проведение фитосанитарного мониторинга по классическим методикам затруднено наличием больших посевных площадей, вследствие чего отсутствует должный контроль со стороны специалистов. Наиболее перспективным способом решения данной проблемы представляется разработка дистанционных методов диагностики состояния посевов сельскохозяйственных культур, основанных на использовании спектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли и оригинальных средств мониторинга [2, 3].

Целью настоящих исследований являлась разработка методических основ использования спектральной аппаратуры наземного и аэрокосмического базирования для дистанционного мониторинга пшеничных агроценозов.

На опытном поле Федерального центра биологической защиты растений, г. Краснодар был создан полигон исследований, представленный посевом озимой пшеницы перспективного сорта Алексеич. С целью обеспечения сопоставимости данных аэрокосмической съемки с результатами наземных спектрометрических измерений в пределах опытного поля с об-

щей площадью 1 га было выделено 10 тестовых участков для создания искусственного инфекционного фона и соответственно 10 контрольных участков. Размер каждого тестового участка составлял 10×10 м (100 м²). Для создания инфекционного фона на тестовых участках применяли метод искусственного заражения растений озимой пшеницы спорами фитопатогенов [4]. Заражение растений озимой пшеницы осуществляли 16 апреля в фазу «начало выхода в трубку» (фаза Z 30-32). Создание чистого фона (без болезней) осуществлялось путем 2-х кратной обработки контрольных участков системным фунгицидом Фалькон. Степень поражения растений болезнями оценивали в процентах по международным методикам [5].

Методика исследований была основана на временной синхронизации высокоточных наземных спектрометрических измерений со спутниковой и беспилотной дистанционной съемкой и сопоставлением полученных данных с результатами фитопатологических полевых обследований. Такой методический подход позволил сформулировать требования технологических режимов применения различных съемочных систем для фитосанитарного мониторинга пшеничных агроценозов и оценить возможность масштабирования разрабатываемой технологии. Даты проведения работ представлены в таблице.

Наземное спектрометрирование проводилось бесконтактно на высоте 1,2–1,4 м от поверхности земли в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2 500 нм со спектральным разрешением 1–10 нм. Для этого был использован спектрорадиометр «ASD FieldSpec 3 Hi-Res», который предназначен для измерения абсолютных и относительных значений энергетической яркости.

Данные, полученные в результате наземных спектрометрических измерений, являются набором значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ), которые показывают степень отражения солнечного света от поверхности растений на каждой длине волны. Эти данные были обработаны автоматизированно с использованием специально написанного скрипта на языке программирования Python.

При аэросъемке использовалась мультиспектральная камера Parrot SEQUOIA+, которая позволяет проводить многозональную съемку в четырех каналах с центральными значениями спектра 550 нм, 660 нм, 735 нм и 790 нм. В результате работы камеры создавалась серия изображений эксперимента с воздуха, которая связывалась между собой в единый ортофотоплан с использованием программного обеспечения Pix4D.

Для тестовых участков также были получены данные космической съемки сверхвысокого разрешения, которая проводилась частной космической компанией Planet (США) с помощью группировки спутников Dove Planet. Пространственное разрешение снимков составляет 50 см. Спектральное разрешение – 8 каналов с центральными значениями спектра 443 нм, 490 нм, 531 нм, 565 нм, 610 нм, 665 нм, 705 нм, 865 нм.

С целью обеспечения сопоставимости спектрометрических данных, полученных с использованием различных съемочных систем, были взяты

спектральные диапазоны камеры Parrot SEQUOIA+, а также вегетационный индекс NDVI. Данные аэросъемки и космических снимков обрабатывались с помощью инструмента Zonal Statistic, предоставляемого открытой настольной геоинформационной системой QGIS. В результате работы инструмента спектральные данные для каждой площадки были записаны в виде общей таблицы как среднее арифметическое всех пикселей, попавших на изображении в границы тестовых участков. Корреляционный анализ взаимосвязи спектральных данных и результатов учета болезней осуществлялся с использованием библиотеки SciPy языка программирования Python.

В результате наземных осмотров тестовых участков были получены данные о развитии различных патогенов в течение периода наблюдений от фенологической фазы «флаг-лист» Z 40-47 (27 апреля), до «восковой спелости» Z 85 (7 июня). В ходе работ спектральные образы растительности соотносились с представленными результатами полевых осмотров.

При рассмотрении спектральных характеристик различных съемочных систем было выявлено, что наиболее высокие показатели КСЯ характерны для данных аэросъемки. Наиболее низкие показатели КСЯ у космической съемки. При этом использование вегетационных индексов, таких как NDVI, позволяет привести различные съемочные системы к схожим значениям для большинства измерений. Также следует отметить, что динамика спектральных характеристик космической съемки хорошо соотносится с данными аэросъемки, за исключением диапазона 712–722, что обусловлено различиями спектрального разрешения соответствующего канала данных систем. Это позволяет сделать предварительный вывод о том, что космические снимки и данные БПЛА могут быть взаимозаменяемы и дополнять друг друга при дистанционном мониторинге развития посевов (рис. 1).

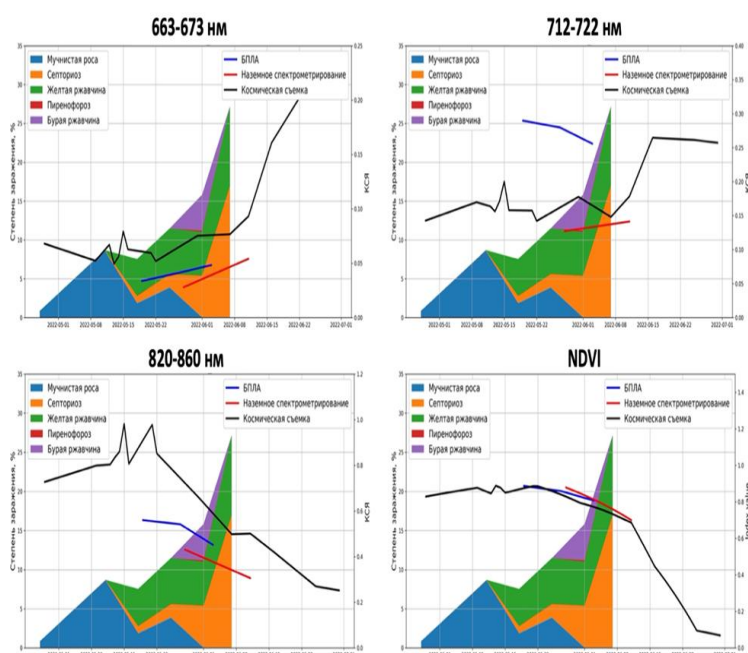


Рис. 1 Динамика развития патогенов и КСЯ в различных спектральных диапазонах

В ходе исследования различных способов получения спектральной информации о посевах пшеницы озимой и сопоставления полученных данных с уровнем патогенного фона тестовых участков было обнаружено, что наименее подверженные заболеванию растения преимущественно имеют более низкие значения в зеленом, красном и red-edge диапазонах спектра и высокие значения КСЯ в ИК диапазоне в период развития «флаглист» – «восковая спелость». Наиболее информативными спектральными диапазонами при использовании космической съемки и мультиспектральных камер, размещенных на БПЛА являются красный и ИК диапазоны. При этом высокая периодичность измерений имеет гораздо более ключевое значение для определения уровня патогенного фона, чем спектральное разрешение. Изучение технологических режимов использования спектральной аппаратуры и установленные статистически значимые взаимосвязи динамики спектрального образа различных съемочных систем с развитием патогенного фона посевов озимой пшеницы позволят сформулировать методические основы дистанционного аэрокосмического мониторинга пшеничных агроценозов.

Работа выполнена при поддержке совместного гранта РНФ и Кубанского научного фонда № 22-26-20119.

Список источников

1. Санин С. С., Соколова Е. А., Черкашин В. И., Назарова Л. Н., Стрижекозин Ю. А., Ибрагимов Т. З., Неклеса Н. П. Болезни зерновых колосовых культур: М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 139 с.
2. Benito, M. T. J.; Ojeda, C. B.; Rojas, F. S. Process analytical chemistry: applications of near infrared spectrometry in environmental and food analysis: an overview. // Applied Spectroscopy Reviews. 2008, 43 (5), 452–484.
3. Thenkabail, P. S.; Lyon, J. G.; Huete, A. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. 2011, Boca Raton, FL: CRC Press.
4. Анпилогова Л. К., Волкова Г. В. Методы создания искусственных инфекционных фонов и оценки сортообразцов пшеницы на устойчивость к вредоносным болезням (фузариозу колоса, ржавчинам, мучнистой росе): Краснодар ВНИИБЗР, РАСХН, 2000. 28 с.
5. Peterson R. F., Campbell A. B., Hannah A. E. Diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // Canad. J. Rev. 1948. No. 26. P. 495–500.

R. Yu. Danilov¹, O. Yu. Kremneva¹, I. I. Sereda², M. V. Zimin²

¹Federal State Budgetary Scientific Institution

«Federal Research Center of Biological Plant Protection», Krasnodar, Russia

²M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR REMOTE MONITORING OF WHEAT AGROCOENOSIS

Abstract. On the experimental field of the Federal Center for Biological Plant Protection, test plots with winter wheat crops were allocated to create an artificial infectious background for the development of pathogens. The research methodology was based on time syn-

chronization of high-precision ground-based spectrometric measurements with satellite and unmanned remote surveys and comparison of the obtained data with the results of phytopathological field surveys. In the course of studying the dynamics of the spectral characteristics of winter wheat crops, it was found that the most informative spectral ranges when using satellite images and multispectral cameras placed on UAVs are the red and IR ranges. The use of vegetation indices in assessing the dynamics of the spectral image of various survey systems allows us to bring them to similar values.

Keywords: wheat, pathogens, phytosanitary monitoring, Earth remote sensing, hyperspectral analysis, spectrometry

А. В. Дергунов¹, О. Е. Якубайлик²

¹ Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru, oleg@icm.krasn.ru

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА МТП-5 И МОДЕЛИ GFS В КРАСНОЯРСКЕ

Аннотация. Изучение температурной стратификации атмосферы Красноярска важнейшая актуальная задача, поскольку инверсии температуры воздуха – один из ключевых факторов его повышенного загрязнения. В работе проводится сравнение профилей температуры воздуха в слое до 1 км по данным температурного профилемера МТП-5 и реанализа NCEP GFS для периодов НМУ зимой 2022–2023 гг. Получены ночные и дневные профили температуры воздуха по двум наборам данных, рассчитаны максимальные разницы значений, произведено сравнение интенсивностей инверсий. Результаты работы показывают достаточно высокую применимость данных реанализа NCEP GFS в задачах исследования приземного слоя атмосферы Красноярска.

Ключевые слова: температурная инверсия; НМУ; GFS; МТП-5; PM_{2.5}; загрязнение воздуха

Введение. Красноярск подвержен негативному влиянию на экологическую обстановку, особенно в холодное время года. Повышение загрязнения воздуха влияет на состояние здоровья населения [1, 2].

Определенные метеорологические условия могут способствовать ухудшению экологической обстановки. Периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ) характеризуются низкой скоростью ветра и наличием приземных или приподнятых температурных инверсий в атмосфере, что в совокупности препятствует вертикальному и горизонтальному рассеянию загрязняющих частиц [3].

Возникает необходимость в анализе различных метеорологических параметров приземного слоя атмосферы города. Так, для изучения вертикального распределения температуры воздуха применяют различные приборы, например, метеорологические температурные профилемеры, которые осуществляют зондирование атмосферы по принципу приема собственного теплового излучения атмосферы на частоте около 60 Гц [4]. Альтернативой на сегодняшний день могут выступить различные наборы данных реанализа и глобальных моделей прогноза погоды, обладающие высоким пространственным и временным разрешением [5].

Целью работы является сравнение данных о температурной стратификации атмосферы Красноярска для холодного периода 2022–2023 г.

во время режимов НМУ по двум наборам данных: температурного профилера МТП-5 и метеорологической модели NCEP GFS.

За период времени с 01.11.22 по 31.03.23 службой Среднесибирского УГМС было объявлено о 8-ми периодах НМУ в городе Красноярске [6].

Материалы и методы. В работе используется метеоинформация из набора данных модели Global Forecast System (GFS). Модель GFS разработана Национальным Центром Экологического Прогнозирования США (NCEP). Горизонтальное разрешение составляет 0,25 градуса [7].

В работе использовались данные анализа о температуре воздуха на десяти вертикальных уровнях: поверхность, 2, 80, 100 м, 1 000–850 мбар., а также информация о геопотенциальной высоте выбранных изобарических поверхностей. Исследуемым был выбран период с 01.11.22 по 31.03.23.

Поскольку высоты изобарических поверхностей изменяются с течением времени на десятки и сотни метров, их высоты определялись геопотенциальными метрами. Для каждого выбранного момента времени методом линейной интерполяции вычислялись температуры на интересующих высотах.

Также в работе использовалась информация с температурного профилера МТП-5. Это сканирующий приемник СВЧ излучения на частоте 60 Гц, принимающий собственное тепловое излучение атмосферы в максимуме полосы поглощения молекулярного кислорода на разных углах места. Прибор МТП-5 установлен в центре Красноярска на высоте 150 метров от уровня моря.

Результаты и обсуждение. Проведено сравнение профилей температуры по двум источникам данных: профилер МТП-5 и модель реанализа NCEP GFS. На рис. 1 приведены ночные (00 ч) и дневные (12 ч) профили температуры в слое 0–1 000 метров в избранные дни периода НМУ с 1 по 8 февраля 2023 г.

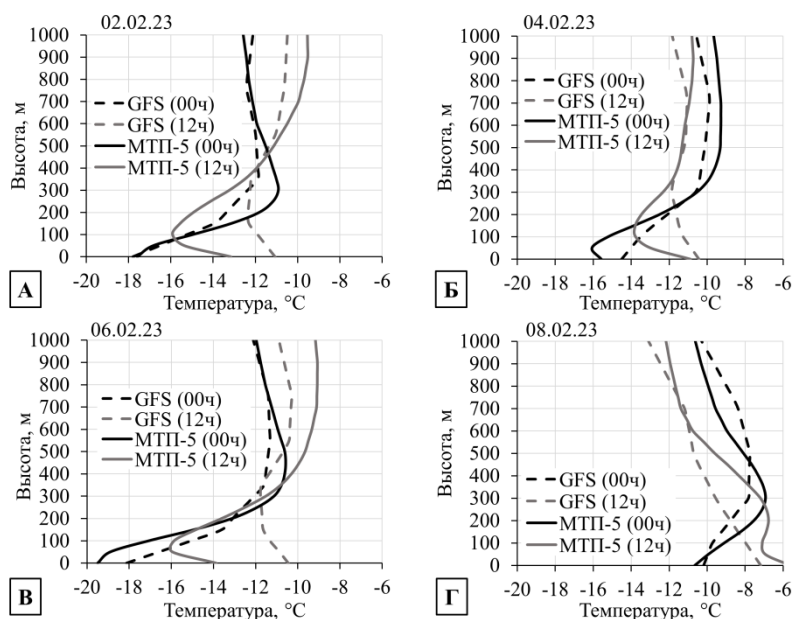


Рис. 1. Сравнение ночных и дневных профилей температуры

При сравнении профилей температуры по двум наборам данных можно выделить сходимость значений на границах рассматриваемого слоя 0-1000 м, а также, форму изгиба самого профиля. На рис. 1 ночные профили температуры достаточно сильно совпадают друг с другом, однако, дневные профили, наоборот, сильно расходятся. Профили температур по данным GFS более пологие.

На рис. 1 максимальная разница ночных температур между данными МТП-5 и GFS 02.02 составила $1,7^{\circ}\text{C}$ на 250 м, 04.02 – 2°C на 50 м, 06.02 – $2,3^{\circ}\text{C}$ на 50 м, 08.02 – $1,2^{\circ}\text{C}$ на 200 м. Разница дневных температур 02.02 составила 4°C на высоте 100 м, 04.02 – $2,5^{\circ}\text{C}$ на 100 м, 06.02 – 5°C на 50 м, 08.02 – $2,3^{\circ}\text{C}$ на 300 м. В целом, демонстрируется снижение разниц температур с увеличением высоты.

Проведено сравнение интенсивности температурных инверсий за 41 день периодов НМУ. Результаты показали, что общая динамика изменения этого показателя с течением времени у обоих источников данных схожая, однако, модель GFS в целом занижает значения интенсивности, особенно дневные (рис. 2). Ночные значения больше соответствуют друг другу.

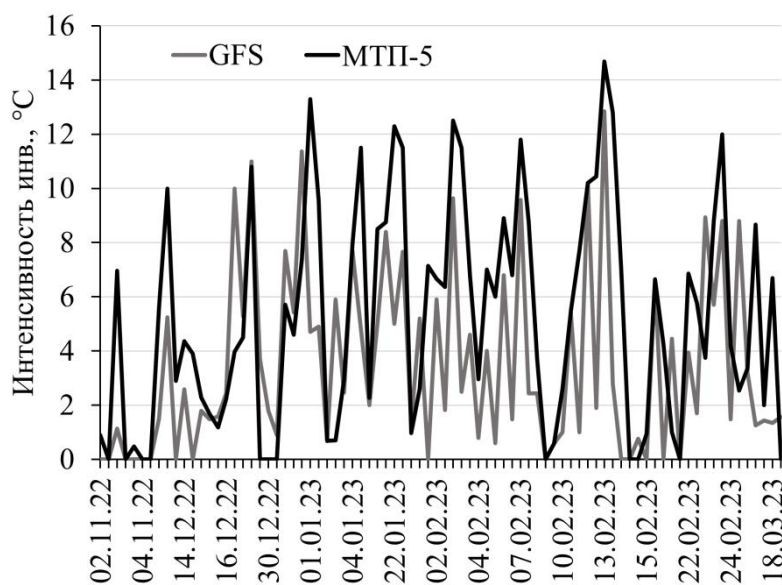


Рис. 2. Сравнение интенсивности инверсий по данным прибора МТП-5 и реанализа NCEP GFS за период исследования

Коэффициент корреляции между интенсивностью ночных инверсий по двум наборам данных составил 0,64, между интенсивностью дневных инверсий – 0,57.

Заключение. В результате данной работы было проведено сравнение профилей температуры воздуха Красноярска в слое 0–1 000 метров по данным профилера МТП-5 и модели NCEP GFS для 8-ми периодов НМУ с ноября 2022 по март 2023 г.

Анализ показал, что лучшую сходимость демонстрируют ночные профили температуры. Наибольшая разница значений фиксируется в нижнем 300 м слое, с увеличением высоты она уменьшается.

Профили температуры по данным GFS более пологие, это ведет к занижению значений интенсивности инверсий температуры. Интенсивности инверсий также более схожи для ночных профилей.

Результаты работы показывают достаточно высокую применимость данных реанализа NCEP GFS в задачах исследования приземного слоя атмосферы Красноярска.

Список источников

1. Orru, H. et al. Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences // *Air quality, atmosphere & health*. 2011. Т. 4. №. 3. С. 247–258.
2. Dominici, F. et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases // *Jama*. 2006. Т. 295. №. 10. С. 1 127–1 134.
3. Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2015. № 40. С. 150–159.
4. Piyin, G. N.; Troitsky, A. V. Determining the Tropospheric Delay of a Radio Signal by the Radiometric Method // *Radiophys. Quantum Electron*. 2017. Т. 60. С. 291–299.
5. Dergunov A., Yakubailic O. Influence of temperature inversions on air pollution in Krasnoyarsk // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021. Т. 333. С. 02002.
6. ФГБУ «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: <https://meteo.krasnoyarsk.ru/> (дата обращения 23.01.2023).
7. The Global Forecast System (GFS) Documentation. URL: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php (дата обращения 23.01.2023).

A. V. Dergunov¹, O. E. Yakubailic²

¹ Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru, oleg@ icm.krasn.ru

COMPARISON OF THE TEMPERATURE STRATIFICATION OF THE ATMOSPHERE ACCORDING TO THE DATA OF THE MTP-5 INSTRUMENT AND THE GFS MODEL IN KRASNOYARSK

Abstract. The study of the temperature stratification of the Krasnoyarsk atmosphere is the most important urgent task, since air temperature inversions are one of the key factors in its increased pollution. The paper compares the air temperature profiles in the layer up to 1 km according to the data of the MTP-5 temperature profiler and the NCEP GFS reanalysis for the NMU periods in the winter of 2022-2023. The nighttime and daytime air temperature profiles were obtained from two sets of data, the maximum differences in values were calculated, and the inversion intensities were compared. The results of the work show a rather high applicability of the NCEP GFS reanalysis data in the problems of studying the surface layer of the Krasnoyarsk atmosphere.

Keywords: temperature inversions; unfavorable weather conditions; GFS; MTP-5; PM2.5; air pollution

Е. Ю. Жукова¹, А. А. Жуков¹, В. В. Чагин¹, А. В. Клещ¹, И. Ю. Ботвич²
¹ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова», Абакан, Россия
²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия
e-mail.ru: zhukov_aa@khsu.ru

ДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕСТОВЫХ УЧАСТКАХ В РЕСПУБЛИКЕ ХАКАСИЯ ПО ДАННЫМ SENTINEL 2

Аннотация. Предмет исследования – динамика продуктивности и обводненности восстановленной растительности на техногенно нарушенных участках в степной зоне Хакасии. В статье приведен анализ динамики восстановленных фитоценозов, выполненный на основе данных Sentinel 2 за 2020–2022 гг. Регрессионный анализ показал зависимость индексов NDVI и NDWI 2. Определена площадь участков с наибольшей продуктивностью. Выявлено, что большинство территории занято лесными насаждениями (в основном, *Ulmus pumila*), межгодовая динамика которых подвержена значительным изменениям. Валовые значения NDVI уменьшились за 2020–2022 гг. на 5,2–24,1 %, NDWI 2 – увеличились на 4,8–29,2 %.

Ключевые слова: Sentinel 2, NDVI, NDWI 2, динамика растительности

Динамика растительности на техногенно нарушенных участках отражает эффективность проведения рекультивационных мероприятий и метеорологические условия территории.

Целью работы является анализ динамических процессов восстановленной растительности на техногенно нарушенных участках в степной зоне Хакасии по данным Sentinel 2.

Были выбраны 7 тестовых участков. Участки 1–3, являются рекультивированными отвалами угольного разреза «Черногорский» (1Cher – 53° 45' 54,30'', 91° 5' 32,97''; 2Cher – 53° 44' 59,69'', 91° 4' 4,06''; 3Cher – 53° 44' 27,35'', 91° 1' 48,75'') и 7Gydro (53° 52' 27,40'', 91° 22' 21,92''). Участок 7Gydro – это лигнинные поля бывшего гидролизного завода. Участки относятся к Уйбат-Биджинскому междуречному равнинно-холмистому степному району [1]. Участки 4–6 – это рекультивированные отвалы угольного разреза «Изыхский» (4IZ_old – 53° 38' 54,56'', 91° 27' 44,74''; 5IZ_old – 53° 38' 44,18'', 91° 27' 10,39''; 6IZ – 53° 36' 53,51'', 91° 25' 58,26''), расположенные в Алтайском холмисто-степном районе [1]. На 4IZ_old доминирующей древесной породой является *Pinus sylvestris*. На остальных участках преобладает *Ulmus pumila*.

В работе использовали данные Sentinel-2 уровня-2A с атмосферной коррекцией, применяемой к продуктам с ортоизображениями уровня-1C «Верхняя часть атмосферы». Для обработки снимков и расчета показателей использовали программу SNAP:

1. Расчет спектральных индексов NDVI и NDWI 2 для снимков Sentinel 2 (интервал 3 дня, с 03.05. по 31.10. с 2020 по 2021) и Landsat 8.

2. Применение маски облаков и их теней. Снимки со сплошной облачностью заменялись на Landsat 8, или на значения медианы.

3. Построение вегетационных кривых (NDVI, NDWI 2). Расчет параметров вегетационных кривых (валовые значения, прирост). Базовую статистику и регрессионный анализ проводили в программах Attestat и Excel.

4. Составление карт индексов проводилось методом дерева решений.

Анализ сезонной динамики фитоценозов и оценка их продуктивности базировалась на спектральных индексах NDVI и NDWI 2 (табл. 1).

Таблица 1

Пространственное распределение классов NDVI, %

Классы ¹	1Cher	2Cher	3Cher	4_IZ_old	5_IZ_old	6_IZ	7_Gydro
2022							
-0,2 – 0,2	0,5	–	0,2	–	–	–	7,4
0,2 – 0,3	1,9	–	0,7	–	0,2	0,7	12,5
0,3 – 0,4	4,6	–	4,4	–	5,4	5,3	17,4
0,4 – 0,5	8,0	–	10,7	2,5	20,5	16,5	16,0
0,5 – 0,6	15,1	–	29,0	27,3	43,0	20,6	15,4
0,6 – 0,7	29,6	–	41,9	30,2	22,0	23,5	15,2
0,7 – 1,0	47,5	–	13,2	40,1	9,7	37,3	33,4
2021							
-0,2 – 0,2	0,3	–	–	–	–	–	0,6
0,2 – 0,3	1,6	0,5	0,1	–	–	–	4,0
0,3 – 0,4	3,5	61,7	0,2	–	–	0,1	4,3
0,4 – 0,5	4,4	30,6	1,1	–	0,8	1,1	5,6
0,5 – 0,6	7,7	45,8	4,3	3,7	3,2	7,6	7,2
0,6 – 0,7	15,6	15,0	18,0	27,0	21,8	18,7	13,3
0,7 – 1,0	67,0	1,9	78,1	69,1	74,0	69,7	64,4
2020							
0,0 – 0,2	1,7	2,1	–	–	–	–	3,8
0,2 – 0,3	4,7	3,5	–	–	–	–	6,6
0,3 – 0,4	5,4	10,7	–	–	1,0	0,2	6,3
0,4 – 0,5	8,4	19,0	–	–	3,6	1,2	8,2
0,5 – 0,6	17,4	37,5	–	2,2	9,0	5,9	11,6
0,6 – 0,7	28,3	19,6	–	59,9	37,2	17,1	15,0
0,7 – 1,0	34,2	7,6	–	37,9	49,0	75,6	48,3
Площадь, га	78,6	33,6	72,5	7,7	13,9	234,0	20,4

Как видно из табл. 1, на всех участках практически отсутствуют классы от -1,0 до 0,2. Это свидетельствует о небольшом количестве вод-

¹ -0,2 – 0,2 отсутствие растительности;
0,2 – 0,3 низкопродуктивные луга, степи;
0,3 – 0,4 среднепродуктивные луга;
0,4 – 0,5 высокопродуктивные луга;
0,5 – 0,6 разреженные кустарниковые заросли;
0,6 – 0,7 кустарники низкорослые;
0,7 – 1,0 высокие кустарники или деревья первой и второй величины.

ных объектов, открытого грунта и пионерной растительности. В 2022 г. наибольшее количество классов от 0,5 до 0,6 – 15,4–43,0 %; от 0,6 до 0,7 – 15,2–41,9 %, выше 0,7 – 9,7–47,5 %. В 2021 г. увеличился процент класса 0,7-1,0, на всех участках – изменение связано с погодными условиями (лучшим увлажнением). Для участков 1Cher, 5_IZ_old, 6_IZ процентное соотношение уменьшилось, а для участков 4_IZ_old и 7_Gydro пространственное распределение вышеуказанных классов изменилось незначительно, для участков 2Cher и 3Cher нет данных для сравнения. Хорошо развита древесная растительность на 4IZ_old и 6IZ. Высокие значения NDVI отмечены и для 7Gydro. Представляет интерес динамичность отдельных участков.

В условиях аридного климата Хакасии, даже в неблагоприятное время, доля растительности со средними и высокими показателями вегетационного индекса, на исследуемых техногенных участках составляет не менее 64,0 %. Это подтверждает гипотезу о том, что растительность техногенно-нарушенных участков вносит свой вклад в поглощение CO₂.

Значения среднемесячных температур и количества осадков по данным наиболее близко расположенной к участкам метеостанции «Хакасская» (с. Зеленое) [2; 3] представлены в табл. 2.

Таблица 2

Среднемесячная температура и осадки района исследования

Годы	Месяцы										Σ осадков, мм
	май		июнь		июль		август		сентябрь		
	t, °C	осадки, мм	t, °C	осадки, мм	t, °C	осадки, мм	t, °C	осадки, мм	t, °C	осадки, мм	
2020	9	21,4	12,9	139,8	19,3	66,9	17,9	67,7	10,3	41,4	337,2
2021	11,2	43,9	15,6	89,1	19,8	30,8	17,5	71,5	9,6	11,1	246,4
2022	15,5	24,6	18,6	41,8	18,8	73,1	16,7	41,8	11,1	35,5	216,8
Среднее, °C	11,9	–	15,7	–	19,3	–	17,4	–	10,3	–	–
Среднее, за 2016–2022, °C	11,2	–	17,4	–	19,8	–	16,8	–	9,9	–	–

Май характеризовался относительно высокими значениями среднемесячной температуры, и, как правило, данных условий достаточно для активного роста и развития ранних и холодостойких растений. Среднетемпературный показатель за май и июнь 2022 г. был выше многолетнего. В 2020 г. наблюдали снижение среднесуточной температуры за май и июнь и количество осадков было больше на 120,4 мм в сравнение с 2022 г. В 2022 г. отмечена теплая весна и начало лета и минимальное количество осадков за 2020–2022 гг. Наблюдаемые явления оказали неблагоприятное влияние на показатели вегетационного индекса. Начало осени характеризовалось средней температурой близкой к порогу активных температур.

Существенным превышением среднееголетних показателей в июне характеризовались 2020–2021 гг. (соответственно 139,8 мм и 89,1 мм), в 2022 г. выпало существенно меньше осадков (41,8 мм), что на 10,3 мм меньше среднееголетнего значения. Июль последних двух сезонов характеризуется только половинной нормой в 2021 г. и превышением на 11,7 мм в 2022 г. В сентябре 2021–2022 гг. наблюдалось количество осадков ниже среднееголетних нормативов.

Показатели продуктивности выражены в условных единицах (валовые показатели NDVI и NDWI, результат интегрирования вегетационной кривой) и представлены в табл. 3. Индекс обводненности может принимать отрицательные значения (до –0,7).

Таблица 3

Параметры вегетационных кривых NDVI

Код	Валовые индексы, май-сентябрь						Валовый прирост с 2020–2022 гг., %		Прирост NDVI в мае, %		
	2020		2021		2022						
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI	2020	2021	2022
1_Cher	93	-84	107	-99	86	-73	-7,5	13,1	42,2	75,1	53,4
2_Cher	75	-72	76	-76	61	-63	-18,7	12,5	34,1	81,3	-3,7
3_Cher	102	-103	93	-88	83	-75	-18,6	27,2	26,4	62	48,3
4_IZ_old	115	-104	117	-111	109	-99	-5,2	4,8	27,2	38,9	71
5_IZ_old	107	-100	107	-101	84	-82	-21,5	18,0	49,7	64,9	50,1
6_IZ	116	-106	112	-103	88	-75	-24,1	29,2	32	69,8	60,2
7_Gydro	104	-101	99	-90	87	-86	-16,3	14,9	45,9	62,5	53,7

Как видно из табл. 3 растительные сообщества на тестовых участках мало различимы между собой по валовой продуктивности и количеству воды, кроме 1_Cher и 2_Cher. Среднее значения валового NDVI варьировались от 61 до 117. Наибольшие значения по фитомассе имели 4 и 6 участки. Минимальные значения показателей у второго участка. Тенденции для NDWI схожи. Следует отметить, что показатели NDVI на рекультивированных в 2000 г. участках (1–3 участки), приближалось к старовозрастным участкам (90-е гг.), и, следовательно, быстрее восстановили свою продуктивность до уровня ранее рекультивированных отвалов.

Анализ вегетационных кривых показал, что в 2021 г. в мае был значительный прирост фитомассы (табл. 3). Это связано с пониженными температурами, которые задержали рост растений в апреле, и в мае они начали интенсивное развитие. В целом, прирост в 2022 г. был выше, чем в 2020 г. Максимальные значения прироста NDVI обнаружены на участках 5_IZ_old и 6_IZ.

Коэффициент регрессии между NDVI и NDWI составил 0,922. Уравнение зависимости носит полиномиальный характер: $y = -0,0026x^2 - 0,3789x - 28,433$. Это говорит о том, что растительность на данной территории тесно связана с атмосферными условиями увлажнения. Чем лучше водообеспеченность, тем выше NDVI.

На отвалах разрезов Черногорский и Изыхский, предположительно за счет наличия питательных веществ в грунтах [4; 5], происходит самовосстановление посттехногенных экосистем. Участок территории бывшего Усть-Абаканский гидролизного завода характеризуется высокой продуктивностью растительности за счет большого количества производимых отходов завода, а в частности лигнина, который повышает содержание гумуса в почвах [6].

Таким образом, определены межгодовые особенности динамики восстановленной растительности на тестовых участках с 2020 по 2022 гг. В целом за указанный период идет снижение вегетационного индекса и повышение обводненности сообществ. В 2022 г. отмечена засуха.

Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 94 от 13.12.2022 г.). Научно-исследовательский проект «Оценка секвестрации углерода растительностью техногенно-нарушенных территорий Республики Хакасия», в рамках мероприятия Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь» «Региональная сеть карбоновых полигонов для долговременных наблюдений потоков парниковых газов, тепла и влаги».

Список источников

1. Куминова А. В. и др. Растительный покров Хакасии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 423 с.
2. Донская О. Л., Николаева З. Н. Экологическая оценка агроэкосистем юга Средней Сибири. Абакан: Изд-во Хакас. гос. ун-та, 2008. 174 с.
3. Герасимова А. С. Климат Абакана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 152 с.
4. Лавриненко А. Т. Особенности рекультивации техногенно разрушенных территорий в засушливых регионах угледобычи // Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления. Новокузнецк: Церис. 2016. С 125–133.
5. Сенькова, Л. А., Гринец Л. В. Мониторинг экологического состояния почв на рекультивированных отвалах Коркинского угольного разреза // Аграрный вестник Урала. 2019. № 7(186). С. 63–69.
6. Комаров А. А. Роль гидролизного лигнина в плодородии почв и питании растений: специальность 06.01.03 «Агрофизика»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук. Санкт-Петербург, 2004. 42 с.

E. Yu. Zhukova¹, A. A. Zhukov¹,
V. V. Chagin¹, A. V. Kleshch¹, I. Yu. Botvich²

¹ Katanov State University, Abakan, Russia

² Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoyarsk, Russia

e-mail.ru: zhukov_aa@khsu.ru

DYNAMICS OF RESTORED VEGETATION ON TEST AREAS IN THE REPUBLIC OF KHAKASIA ACCORDING TO SENTINEL 2 DATA

Abstract. The subject of the study is the dynamics of productivity and water content of restored vegetation in technogenically disturbed areas in the steppe zone of Khakassia. The article provides an analysis of the dynamics of restored phytocenoses, based on Sentinel 2 data for 2020–2022. Regression analysis showed the dependence of the NDVI and NDWI 2 indices. The area of plots with the highest productivity was determined. It was revealed that most of the territory is occupied by forest plantations (mainly *Ulmus pumila*), the interannual dynamics of which is subject to significant changes. Gross NDVI decreased over 2020–2022 by 5,2–24,1 %, NDWI 2 increased by 4,8–29,2 %.

Keywords: Sentinel 2, NDVI, NDWI 2, vegetation dynamics

А. Н. Забродин^{1,2}, Е.И. Пономарёв^{1,3}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРОВ СИБИРИ И СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРЕВОСТОИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

Аннотация. Исследованы особенности пожаров в древостоях Сибири (50–75° с.ш., 60–150° в.д.) по спутниковым данным 2015–2021 гг. Выявлено соотношение классов нарушенности: в светлохвойных насаждениях – 44 %, 29 % и 27 % для низкого, среднего и высокого уровня пожарного воздействия; в темнохвойных лесах – 63 %, 14 % и 23 %; в зоне тундры – 59 %, 26 % и 15 %, соответственно. Показана значимость корреляции ($R^2=0,77-0,94$, $p<,05$) между индексами NBR/dNBR и интегральными FRP. Пожары высокой интенсивности (>100 000 МВт) преимущественно фиксируются в светлохвойных насаждениях, где пожарное воздействие высокого уровня составляет ~56 %.

Ключевые слова: лесные пожары, Сибирь, NBR/dNBR, FRP, радиационная мощность излучения, доминирующие древостои

Введение. Лесные пожары – это наиболее значимый фактор нарушенности лесов Сибири [1; 2], влияние которого будет усиливаться в связи вероятными климатическими изменениями. В настоящее время дистанционные средства являются важнейшим инструментом сбора сведений о пожарах в Сибири. Благодаря технологии Normalized Burn Ratio (NBR/dNBR), с достаточной степенью достоверности можно выделять степень нарушенности растительности [3; 4] на снимках послепожарных участков. Дополнительно инструментальная оценка интенсивности горения возможна на основе спутниковых данных о Fire Radiative Power (FRP). Так известно, что мгновенные значения радиационной мощности FRP от участка активного горения напрямую связаны с интенсивностью горения активной кромки и пропорциональны скорости сгорания биомассы [5].

Исходные данные и методы обработки. Анализ проводился для территории Сибири (50–75° с.ш., 60–150° в.д.). На данной территории преобладают лиственничные леса и редколесья (*Larix sibirica*), насаждения сосны (*Pinus sylvestris*), а также темнохвойные леса (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, *Picea obovata*), кедровый стланик (*Pinus pumila*) и лиственные древостои (*Betula spp.*, *Populus tremula*). Датировки пожаров мы контролировали по базе данных спутникового мониторинга ИЛ СО РАН (2015–2021 гг.). Репрезентативная выборка составила 36 пожаров для 7 типов

древостоя, общей площадью 19 тыс. км². Для определения типа растительного покрова использовалась карта леса ВЕГА-Про (<http://pro-vega.ru/maps/>, дата обращения 07.07.2023) и стандартные процедуры ГИС. В работе использовались 72 снимка Landsat–8/OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor), полученные из открытых каталогов (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) для 7 вариантов преобладающего древостоя.

Уровень пожарного воздействия на растительность оценивался с использованием спектрального показателя Normalized Burn Ratio (NBR/dNBR). Временной интервал между снимками Landsat до и после пожара составлял в среднем 1 год, в соответствии с требованиями метода. На основе пороговых диапазонов значений dNBR [3] выделяли 4 категории пожарного воздействия на растительность с привязкой к доминирующим древостоям Сибири.

Радиационная мощность FRP активных зон горения регистрировалась в режиме реального времени спутниковыми системами Aqua, Terra / MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <https://modis.gsfc.nasa.gov/>) за 2015–2021 гг. Для каждого участка с заданным классом пожарного воздействия в анализе учитывались только те пиксели с рассчитанными значениями индекса dNBR, на которые имелись данные о FRP.

Результаты и обсуждение. Для доминирующих древостоев Сибири выявлены соотношения классов нарушенности (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение площадей пожаров по классам dNBR и суммарной мощности FRP

Растительность	Площадь пожаров (км ²)	Доля площади dNBR (%) ±SD				FRP, 10 ³ МВт (min-max)	Сумма FRP, 10 ³ МВт
		1	2	3	4		
<i>Larix sibirica</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	12 355	10±3	34±8	29±4	27±8	3–732	2 085
<i>Pinus sibirica</i> , <i>Picea obovata</i>	885	28±22	35±15	14±6	23±13	1–79	143
<i>Pinus pumila</i>	6 142	15±8	44±10	26±10	15±9	12–217	684

В светлохвойной растительности выявлено преобладание площадей, относимых к классам среднего и высокого уровня пожарного воздействия (суммарно ~56 % от общей площади). Для послепожарных участков в темнохвойных древостоях до ~63 % от общей площади составляют классы негоревшей/незначительных повреждений и низкого уровня пожарного воздействия. Для растительности с преобладанием тундры и кедрового стланика (*Pinus pumila*) выявлено доминирование классов низкого и среднего уровня пожарного воздействия (~70 % от общей площади).

Для рассмотренной выборки пожаров интегральные значения FRP варьировали на уровне 2 700–730 000 МВт в светлохвойных насаждениях, 12 400–216 000 МВт в темнохвойных и до 900–79 000 МВт в зоне редколесий и тундры (таблица). Инструментально подтверждено, что пожары высокой интенсивности (интегральные значения FRP в границах одного пожара – 20 000–100 000 МВт) преимущественно фиксируются при пожарах в светлохвойных насаждениях, где выделяемые категории средней и высокой степени пожарного воздействия также были наибольшие и составляли ~56 % общей площади повреждения, что согласуется с [6]. Результаты распределения радиационной мощности для каждого древостоя представлен на рис. 1.

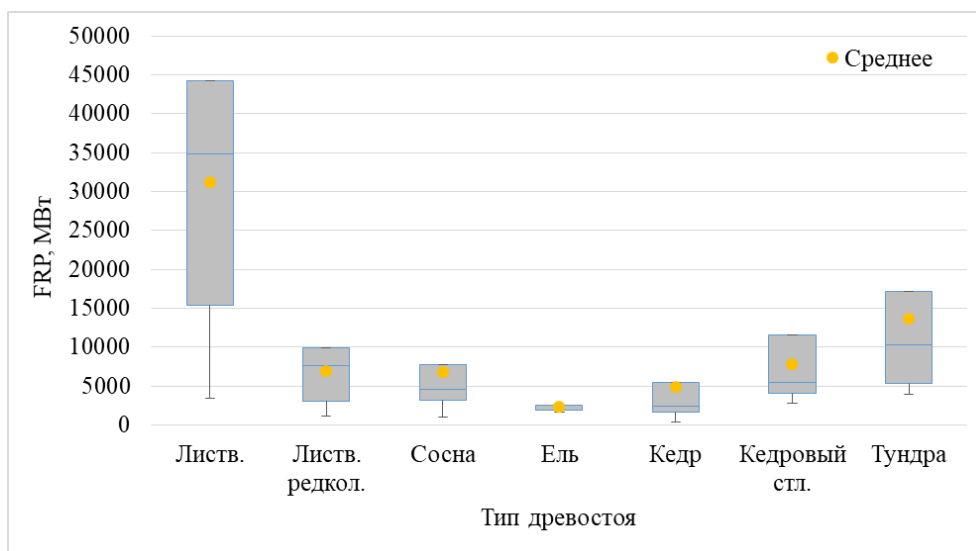


Рис. 1. Распределение интегральной суммы FRP для пожаров в 7 вариантах растительности

Графики корреляционного поля демонстрируют значимый ($R^2=0,77–0,94$, $p<0,05$) уровень корреляции между интегральным значением интенсивности пожара (FRP) и категориями нарушенности в терминах dNBR (рис. 2).

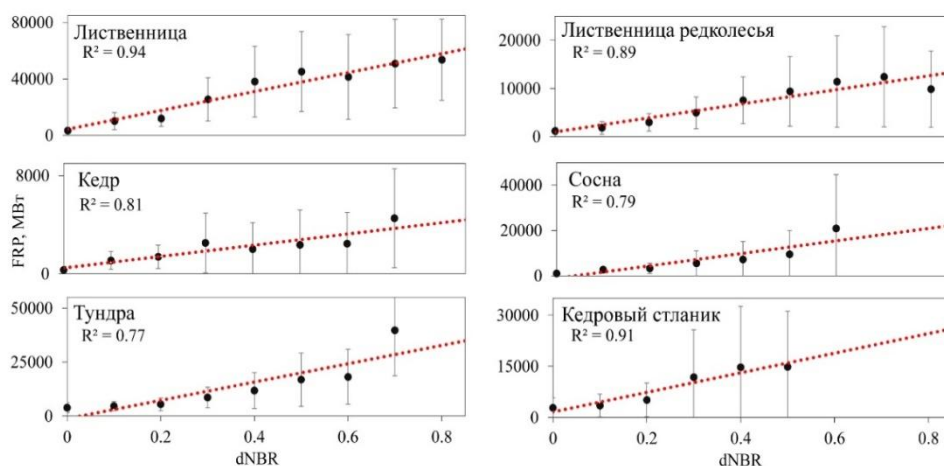


Рис. 2. Корреляция между FRP и категориями нарушения растительности в терминах dNBR

Заключение. Соотношение классов нарушенности в светлохвойных насаждениях – 44 %, 29 % и 27 % для низкого, среднего и высокого уровня пожарного воздействия; в темнохвойных лесах – 63 %, 14 % и 23 %; в зоне тундры – 59 %, 26 % и 15 %, соответственно. Интегральные значения FRP в светлохвойных древостоях имели значительные экстремумы до 730 000 МВт, существенно превышающие данную характеристику для пожаров в темнохвойных (> 200 000 МВт) лесах или в зоне тундры (до 79 000 МВт). Между параметром dNBR и интегральной радиационной мощности (FRP) выявлена значимая прямая корреляция ($R^2=0,77-0,94$, $p<0,05$), что позволяет рассматривать эти индексы как взаимодополняющие при решении задачи оценки количества сгорающей биомассы.

Работа выполнена по госзаданию FWES-2022-0001 (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Список источников

1. Барталев С. А., Стыщенко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С.115–122.
2. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыщенко 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. Delcourt C. J. F., Combee A., Izbicki B., Mack M. C., Maximov T., Petrov R., Rogers B. M., Scholten R. C., Shestakova T. A., vanWees D., Veraverbeke S: Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery in Northeast Siberian Larch Forests // Remote Sens. 2021. 13 (12). 2 311.
4. Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T. Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index // Fire. 2022. 5. 19.
5. Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremens R: Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // J. Geophys. Res. 2011. 116. P. 1–18.
6. Krylov A., McCarty J.L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C: Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environ. Res. Lett. 2014. 9. P. 1–8.

A. N. Zabrodin^{1,2}, E. I. Ponomarev^{1,3}

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³ V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: azabrodin@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

ASSESSMENT OF THE SIBERIAN FIRES ENERGY CHARACTERISTICS AND THE IMPACT ON TREE STANDS BY REMOTE SENSING

Abstract. Wildfire characteristics investigated for predominant tree stands of Siberia (50–75°N, 60–150°E) based on satellite data for 2015–2021. It is shown that during fires in light coniferous plantations, the ratio of disturbance classes is on average 44 %, 29 % and 27 % for low,

medium and high levels of fire exposure, respectively. In the post-fire areas in dark coniferous forests – 63 %, 14 % and 23 %, and in the case of tundra vegetation – 59 %, 26 % and 15 %, respectively. Significant ($R^2=0,77-0,94$, $p<0,05$) correlation between the Normalized Burn Ratio (NBR/dNBR) and the integral FRP was revealed. It has been instrumentally confirmed that fires of high intensity ($>100,000$ MW) are mainly recorded in light coniferous plantations, where the proportion of medium and high fire impact is also the greatest (~56 %).

Keywords: forest fires, Siberia, NBR/dNBR, FRP, radiation power, dominant stands

К. В. Краснощеков¹, О. Э. Якубайлик²

¹ Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: krasko@icm.ru

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ $PM_{2.5}$ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМИ И ЮЖНЫМИ РАЙОНАМИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Аннотация. В работе описывается процесс построения данных о пространственном распределении среднемесячных значений $PM_{2.5}$ для территории центральных и южных районов Красноярского края. Концентрации PM рассчитывались при помощи данных полученных при помощи спутникового мониторинга и данных метеорологической модели Global Forecast System (GFS).

Ключевые слова: твердые частицы, качество воздуха, PM , GFS, AOD

Введение. На территории Красноярского края находится большое количество промышленных предприятий. Благодаря большому количеству природных ресурсов в крае сильно развита металлургия, а также находится большое количество тепловых электростанций. Основными промышленными центрами края считаются Красноярск, Норильск, Назарово, Шарыпово, Железногорск и Канск. В работе [1] авторы указывают на повышенные концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} (твердые частицы с диаметром менее 2,5 и 10 мкм соответственно) в районах, примыкающих к территориям промышленных предприятий. Многочисленные исследования указывают на негативное влияние на здоровье человека повышенных значений PM [2, 3, 4]. В исследовании [5] была установлена взаимосвязь между концентрацией PM и уровнем здоровья населения. Так же в работе [6] сообщалось, что при увеличении концентрации $PM_{2.5}$ на 10 мкг/м^3 приводит к повышению количества респираторных заболеваний примерно на 2 %. Приведённые выше исследования показывают высокую актуальность мониторинга концентрации $PM_{2.5}$ в окружающем воздухе.

Район исследования. Районом исследования выбраны центральные и южный районы Красноярского края, как наиболее населённые. В исследуемую область попадают такие города как Красноярск, Назарово, Шарыпово, Железногорск и Канск. Рельеф исследуемой территории преимущественно холмистый. С юго-восточной и южной стороны в районе исследования располагаться Восточный и Западный Саян, соответственно.

Исходные данные. Данные о пространственном распределении концентраций $PM_{2.5}$ рассчитывались с использованием метеорологических данных модели Global Forecast System (GFS) [7] и измерений спутникового

мониторинга. В качестве спутниковых данных использовались измерения, полученные со спектрофотометра MODIS, продукт MCD19A2. Данный продукт предоставляет ежедневную информацию о аэрозольной оптической толщине (Aerosol Optical Depth(AOD)), с пространственным разрешением 1 км². Параметр AOD пропорционален количеству аэрозольных частиц в воздухе и зависит от их массовой концентрации. Из-за особенностей измерения, основанного на регистрации отраженного сигнала от поверхности, измерения над территорией с высоким коэффициентом отражения (облачность, снег, вода) провести не удаётся. Следовательно, для территории Красноярского края данные по AOD отсутствуют за весь зимний период и в местах, покрытых облачностью. Из-за большого количества облачных дней, ежедневные измерения получаются с большим количеством пропущенных данных. По информации с модели GFS использовались данные о высоте пограничного слоя атмосферы (PBLH) и относительной влажности воздуха (RH). Пространственное разрешение модели составляет 0,25x0,25 градуса, данные предоставляются четыре раза в сутки, в 00, 06, 12 и 18 часов по UTS. В работе были использованы данные за 06 часов по UTS, что для Красноярского часового пояса соответствует 13 часам дня.

Ход работы. Для получения данных о пространственном распределении PM_{2.5} использовалась приведённая ниже формула [8]:

$$PM_{2.5} = \frac{\frac{AOD}{PBLH}}{K \frac{1 - RH^{-\gamma}}{1 - RH_0}},$$

где AOD – значения аэрозольной оптической толщины, полученной по данным продукта MCD19A2, $PBLH$ – величина пограничного слоя атмосферы, RH – относительная влажность воздуха, RH_0 – среднее значение влажности воздуха, для исследуемой области, коэффициенты K и γ отвечают за свойства аэрозоля, характерных для данной территории.

В работе [8] было показано сравнение рассчитанных данных по формуле, приведённой выше и данными с наземных постов наблюдения, расположенных в Красноярске. В ходе работы было установлено, что рассчитанные данные по концентрации PM_{2.5} и значения, полученные с наземных постов мониторинга имеют высокую корреляцию.

Для устранения пропуска данных параметра AOD проводилось ежемесячное усреднение. В результате получаются средние ежемесячные концентрации PM_{2.5}, рис. 1.

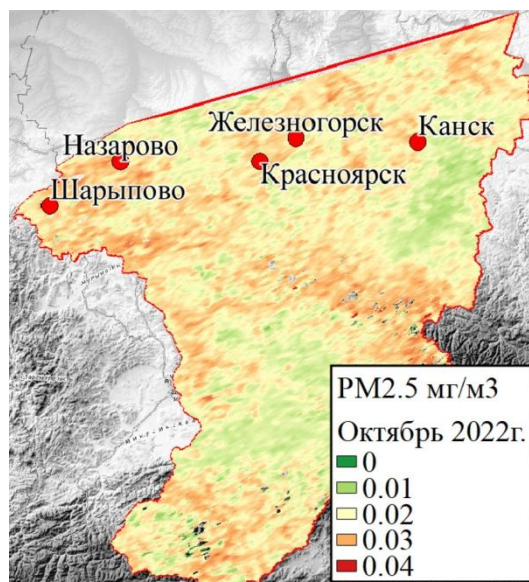


Рис. 1. Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за октябрь 2022 г.

На рис. 1 видно, что с использованием усреднённых данных, получается отобразить показания концентрации $PM_{2.5}$ над территорией центральных и южных районов Красноярского края без пропусков.

В данном месяце наиболее высокие значения $PM_{2.5}$ наблюдаются над территориями Восточного и Западного Саяна, что может быть связано, с уже формирующимся снежным покровом в горной местности и особенностями работы алгоритмов.

По данным среднемесячной концентрации $PM_{2.5}$ можно оценить влияние лесных пожаров на экологическую обстановку в городах. Так в августе 2020 г. на северных территориях Красноярского края были сильные лесные пожары. Как видно на рис. 2, дым от пожаров накрывал такие города как Канск, Железногорск и Красноярск. В тот период в Красноярске стоял сильный смог, видимость составляла несколько сотен метров.

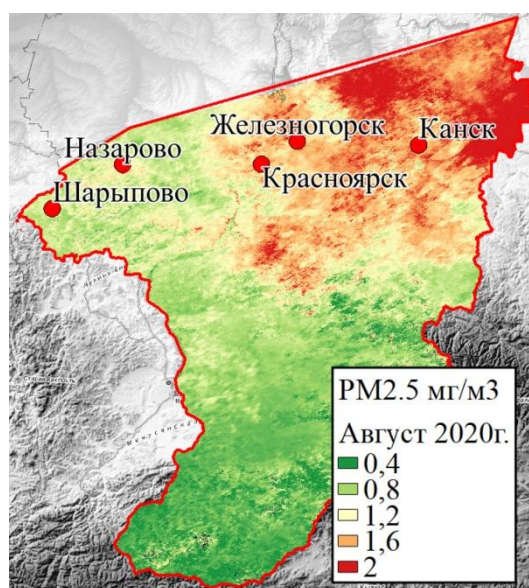


Рис. 2. Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ за август 2020 г.

С использованием данных о среднемесечном пространственном распределении концентрации $PM_{2.5}$ становится возможно оценить негативное влияние экологической обстановки в городе на окружающие территории. Так же появляется возможность оценить влияние внешних факторов (лесные пожары) на экологическую обстановку городов.

Список источников

1. Клейн С. В. и др. Оценка пылевого загрязнения атмосферного воздуха с учётом фракционного состава частиц как фактора риска здоровью населения промышленной территории // *Здоровье семьи-21 век*. 2015. № 4. С. 45–61.
2. Kaufman Y. J., Tanré D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // *Nature*. 2002. Т. 419. № 6 903. С. 215–223.
3. Schwartz J., Laden F., Zanobetti A. The concentration-response relation between $PM(2.5)$ and daily deaths // *Environmental health perspectives*. 2002. Т. 110. № 10. С. 1 025–1 029.
4. Donaldson K., Li X. Y., MacNee W. Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury // *Journal of aerosol science*. 1998. Т. 29. № 5–6. С. 553–560.
5. Seaton A. et al. Particulate air pollution and acute health effects // *The lancet*. 1995. Т. 345. № 8 943. С. 176–178.
6. Dominici, F. et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases // *Jama*. 2006. Т. 295. №. 10. С. 1 127–1 134.
7. The Global Forecast System (GFS) https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numericalforecast_systems/gfs.php (дата обращения 20.06.2023).
8. Lin C. et al. Observation of $PM_{2.5}$ using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // *Atmospheric Environment*. 2020. Т. 227. С. 117 410.
9. Дергунов А. В., Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э. Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации // *Вычислительные технологии*. 2022. Т. 27. №. 3. С. 84–94.

К. В. Krasnoshchekov¹, О. Е. Yakubailik²

¹ Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: krasko@icm.ru

CONSTRUCTION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF $PM_{2.5}$ OVER THE CENTRAL AND SOUTH REGIONS OF THE KRASNOYARSK TERRITORY

Abstract. The paper describes the process of constructing data on the spatial distribution of average monthly $PM_{2.5}$ values for the territory of the central and southern regions of the Krasnoyarsk Territory. PM concentrations were calculated using data obtained from satellite monitoring and data from the Global Forecast System (GFS) meteorological model.

Keywords: particulate matter, air quality, PM, GFS, AOD

О. Ю. Кремнева¹, Р. Ю. Данилов¹, И. И. Середа², М. В. Зимин²

¹ Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: kremenoks@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЕВОВ РАЗНЫХ СОРТОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С УЧЕТОМ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ К ФИТОПАТОГЕНАМ

Аннотация. Изучены особенности изменения спектральных характеристик трех различных по устойчивости к болезням сортов озимой пшеницы на разных стадиях развития патогенов в сопоставлении с данными наземных фитосанитарных обследований посевов. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа было подтверждено влияние сорта и факторов развития болезней. Количественные показатели отражательной способности каждого отдельного сорта определялись его иммунологическим ответом на воздействие патогена и, следовательно, различным характером физиологических процессов в растениях.

Ключевые слова: озимая пшеница, возбудители болезней, диагностика развития болезней, наземная спектрометрия, спектральные характеристики растений

Для организации защитных мероприятий растений от вредных организмов важное место занимает своевременный и точный фитосанитарный мониторинг [1]. Сведения об особенностях спектральных характеристик растений, пораженных патогенами на раннем развитии, полученные методами наземного спектрометрирования имеют особую ценность, так как позволяют сформулировать требования к съемочным системам аппаратов дистанционного зондирования земли, при необходимости их использования для фитопатогенного мониторинга [2].

Целью настоящих исследований являлось выявление информационных признаков для распознавания экономически значимых возбудителей болезней на основе анализа данных наземной спектрометрии с учетом генотипов разных сортов озимой пшеницы.

Исследуемые посевы озимой пшеницы были представлены тремя сортами селекции НЦЗ им. П. П. Лукьяненко (г. Краснодар, Россия), которые отличаются восприимчивостью к фитопатогенам: Гром, Сварог и Безостая 100. Каждый участок был разделен на две зоны: 1 – защищенный от болезней фунгицидами (чистый фон), 2 – с искусственным инфекционным фоном бурой ржавчины (инфицированный). Для развития бурой и желтой ржавчин на экспериментальном участке применяли метод искусственного заражения растений озимой пшеницы спорами данных фитопатогенов [3]. Заражение растений озимой пшеницы осуществляли

16 апреля в фазу «начало выхода в трубку» (фаза Z 30-32). Создание чистого фона (без болезней) осуществлялось путем 2-х кратной обработки выделенной зоны системным фунгицидом Фалькон, КС. Учет развития болезней проводили, начиная с момента первичных проявлений развития болезней, которые были отмечены в фазу «флаг лист» (Z 40-47) и последующие – до фазы «молочно-восковой спелости зерна» (Z 58) с интервалом 10–12 суток. Степень поражения растений болезнями оценивали в процентах по международным методикам [4].

Наземное спектрометрирование исследуемых посевов проводилось в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2 500 нм со спектральным разрешением 1–10 нм (измерение спектральной яркости на определенной высоте перпендикулярно к поверхности Земли) с использованием спектрорадиометра ASD FieldSpec 3 Hi-Res. В качестве эталонной поверхности применялось абсолютно белое тело (мишень) Spectralon (SRM-990) с коэффициентом отражения 0,95–0,99.

Путем учета показателей эталонного отражателя осуществлен переход к абсолютным значениям отражательной способности – коэффициенту спектральной яркости (КСЯ).

Первая серия наземных гиперспектральных измерений посевов пшеницы на тестовых участках осуществлялась 5.05. после прохождения ржавчинными патогенами прогнозируемого периода инкубации (период инкубации ржавчинных болезней составляет 7–14 суток в зависимости от лимитирующих факторов). В период первой серии измерений рост растений озимой пшеницы характеризовался прохождением «флаг лист» (Z 40-47). Последующие измерения проводились в отдельные даты до появления и усиления видимых симптомов заболеваний с учетом основных фаз роста растений озимой пшеницы: 13.05 (фаза «колошение» Z 51-59; период интенсивного развития всех листостебельных инфекций), 25.05. (фаза «молочно-восковая спелость» Z 71-82; период позволяющий прогнозировать урожайность посевов озимой пшеницы в зависимости от степени развития болезней) и 11.06. (фаза «восковая спелость» Z 85; момент возможного проявления заболеваний репродуктивных органов).

Оценка влияния факторов сорта и развития болезни на спектральные характеристики растений озимой пшеницы в разных областях спектра проводилась на основе методов дисперсионного двухфакторного анализа. Для анализа данных из общего рабочего диапазона спектрорадиометра были выбраны следующие спектральные области: 400–490 нм, 490–620 нм, 620–680 нм, 720–800 нм, 800–1 200 нм, 1 445–1 775 нм, 2 040–2 450 нм. В выделенных областях спектра была осуществлена статистическая обработка данных с расчетом среднего значения и стандартного отклонения.

По результатам учетов развития болезней на посевах исследуемых сортов озимой пшеницы патогенный фон был представлен такими болезнями как мучнистая роса, бурая и желтая ржавчины, септориозная и пиренофорозная пятнистости листьев.

Контрольные участки являлись условно чистыми так как несмотря на воздействие фунгицида на них все равно наблюдалось минимальное развитие болезней.

Таким образом, на растительных фонах тестовых участках наблюдалось комплексное развитие нескольких видов болезней поэтому определить характер влияния каждого патогена в отдельности не представлялось возможным. В связи с чем при дальнейшем анализе данных было принято учитывать совокупное влияние показателей развития всех болезней каждого растительного фона.

Первые видимые изменения отражательной способности исследуемых растительных фонов были выявлены по результатам визуального анализа спектральных сигнатур с 10 по 15 мая в период начала интенсивного проявления всех листостебельных болезней и проявились в виде снижения показателей КСЯ на инфицированных делянках всех сортов.

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа было установлено, что в первый вегетационный период статистически значимые различия спектральных характеристик исследуемых сортов определялись их физиологическими и биометрическими особенностями (табл. 1). Достоверных отличий между показателями трех сравниваемых растительных фонов выявлено не было.

Таблица 1

Оценка влияния факторов сорт и развитие болезней на показатели коэффициента спектральной яркости посевов исследуемых сортов озимой пшеницы в разных диапазонах спектра по четырем вегетационным срокам

Диапазоны спектра	Факторы			
	Сорт		Инфекционный фон	
	F	p	F	p
1-й период				
5.05 Фаза Z 40-47 «флаг лист». Первые признаки развития болезней				
400–490 nm	56,488*	0,000000*	6,652*	0,013407*
490–620 nm	53,917*	0,000000*	4,250*	0,045335*
620–680 nm	35,483*	0,000000*	6,046*	0,018040*
720–800 nm	38,442*	0,000000*	3,139	0,083543
800–1 200 nm	14,883*	0,000012*	1,984	0,166187
1 445–1 775 nm	22,234*	0,000000*	2,455	0,124513
2 040–2 450 nm	4,922*	0,011891*	1,655	0,205108
2-й период				
13.05 Фаза Z 51-59 «колошение».				
Начало интенсивного проявления всех листостебельных болезней				
400–490 nm	14,425*	0,000014*	0,255	0,616361
490–620 nm	26,950*	0,000000*	0,318	0,575756
620–680 nm	9,338*	0,000405*	0,396	0,532422
720–800 nm	24,171*	0,000000*	0,337	0,564232
800–1 200 nm	18,895*	0,000001*	0,175	0,677760
1 445–1 775 nm	22,234*	0,000000*	4,252*	0,046094*
2 040–2 450 nm	5,753*	0,005961*	0,327	0,570533

Диапазоны спектра	Факторы			
	Сорт		Инфекционный фон	
	F	p	F	p
3-й период 25.05 Фаза Z 71-82 «молочно-восковая спелость». Возможность прогноза урожайности по степени развития болезней				
400–490 nm	22,400*	0,000000*	9,436*	0,003921*
490–620 nm	13,667*	0,000034*	7,717*	0,008453*
620–680 nm	18,699*	0,000002*	10,393*	0,002599*
720–800 nm	10,778*	0,000196*	6,610*	0,014181*
800–1 200 nm	8,195*	0,001099*	2,577	0,116701
1 445–1 775 nm	9,174*	0,000561*	4,252*	0,046094*
2 040–2 450 nm	3,3363*	0,046248*	1,8961	0,176579
4-й период 11.06 Фаза Z 85 «восковая спелость». Момент возможного проявления заболеваний репродуктивных органов				
400–490 nm	12,567*	0,000073*	2,095	0,156411
490–620 nm	1,414	0,256246	2,348	0,134169
620–680 nm	10,256*	0,000298*	27,966*	0,000006*
720–800 nm	1,498	0,237086	0,100	0,753502
800–1 200 nm	17,987*	0,000004*	14,191*	0,000591*
1 445–1 775 nm	2,088	0,138652	1,870	0,179935
2 040–2 450 nm	1,870	0,179935	5,729*	0,022025*
Примечания: F – фактический показатель критерия Фишера; p – уровень статистической значимости ($p < 0,05$); * - подтверждено математически достоверное влияние фактора на показатели развития болезни				

Далее, во второй, третий и четвертый вегетационные периоды по мере роста растений и развития болезней различия становились более очевидными и подтверждалось совместное влияние факторов сорта и растительного фона.

Таким образом, было установлено, что различия или сходство спектральных признаков отдельных сортов определялись не столько их характеристикой устойчивости к возбудителю и степенью развития болезни, сколько конкретным сортом и, скорее всего, его физиологическими особенностями и биометрическими характеристиками. Количественные показатели отражательной способности каждого отдельного сорта вероятнее всего определялись его иммунологической реакцией на воздействие патогена а, следовательно, и разным характером происходящих в растениях физиологических процессов.

Исследование выполнено в соответствии с Государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-исследовательской работы по теме № FGRN-2022-0001.

Список источников

1. Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Неменуца Л. А. Перспективные технологии диагностики патогенов сельскохозяйственных растений: науч. аналит. обзор: М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 68 с.
2. Данилов Р. Ю., Исмаилов В. Я., Третьяков В. А., Кремнева О. Ю., Шумилов Ю. В., Ризванов А. А., Кривошеин В. В., Костенко И. А. Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 82–86.
3. Анпилогова Л. К., Волкова Г. В. Методы создания искусственных инфекционных фонов и оценки сортов образцов пшеницы на устойчивость к вредоносным болезням (фузариозу колоса, ржавчинам, мучнистой росе): Краснодар ВНИИБЗР, РАСХН, 2000. 28 с.
4. Peterson R. F., Campbell A. B., Hannah A. E. Diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // Canad. J. Rev. 1948. No. 26. P. 495–500.

О. Ю. Кремнева¹, Р. Ю. Данилов¹, И. И. Середя², М. В. Зимин²

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution

«Federal Research Center of Biological Plant Protection», Krasnodar, Russia

² M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

STUDYING THE FEATURES OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF CROPS OF DIFFERENT WINTER WHEAT VARIETIES IN CONSIDERING THEIR RESISTANCE TO PHYTOPATHOGENS

Abstract. The features of the change in the spectral characteristics of three varieties of winter wheat with different resistance to diseases at different stages of pathogen development were studied in comparison with the data of terrestrial phytosanitary surveys of crops. According to the results of a two-way analysis of variance, the influence of the variety and disease development factors was confirmed. Quantitative indicators of the reflectivity of each individual variety were determined by its immunological response to the pathogen and, consequently, by the different nature of physiological processes in plants.

Keywords: winter wheat, pathogens, diagnostics of disease development, ground-based spectrometry, spectral characteristics of plants

Х. Б. Куулар, А. Ф. Чульдун

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия
e-mail: k-k-188@list.ru

ОЦЕНКА ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА ЗА 2020 Г. НА ОСНОВЕ GEE

Аннотация. Пожары растительности относятся к стихийным бедствиям, которые приводят к уничтожению растительного покрова. В данной работе построена карта локализации пожаров растительности на территории Республики Тыва за 2020 г. с использованием Google Earth Engine (GEE). Проведен анализ данных пожаров растительности, связанных с метеоданными и элементами ландшафта. Получено, что наиболее важными факторами возникновения и развития пожаров являются погодные условия и расположения очагов пожаров в определенных элементах ландшафта. На рост пожаров растительности в 2020 г. повлияло аномалия весенней температуры воздуха ($1,3^{\circ}\text{C}$). Максимальные очаги пожаров летом обнаружены на южных экспозициях, весной и осенью – на северных, восточных склонах экспозиции. Полученный результат может оказаться полезным по охране лесов и проведению профилактических работ от пожаров.

Ключевые слова: пожары растительности, наземные и дистанционные данные, GEE

На территории России находит дистанционное зондирование применение для решения разнообразных тематических задач, в том числе для выявления и мониторинга пожаров и их последствий [1]. На территории Сибири с каждым годом растет площадь пожаров растительности и составляет 1–3 млн. га на основе спутниковых данных [3]. Потепление климата в Южной Сибири [4] повлияло на рост пожаров растительности и сокращение лесных площадей [5]. Высокий уровень пожарной активности в Южной Сибири наблюдается в последние десятилетия [3, 4].

Республика Тыва расположена в центре Алтае-Саянского экорегиона. Горно-котловинный рельеф республики на территории оказывает влияние на распределение температуры. Большая часть республики располагается в зоне недостаточного увлажнения. Распределение суммы осадков в течение года крайне неравномерно, ~80 % годовых осадков выпадает за тёплый период года в виде ливней. На территории республики скорость роста среднегодовой температуры в 1961–2020 гг. составила $+0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет, в теплый период года (с апреля по октябрь) составила $+0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Согласно данным Министерства лесного хозяйства и природопользования Республики Тыва в последние десятилетия возникают от 22 до 560 пожаров растительности.

Пожары растительности участились с потеплением климата и в данной работе представлена оценка пожаров растительности в зависимости

от элементов ландшафта на территории республики за 2020 г. на основе платформы GEE.

Материалы и методы. Для исследования использованы спутниковые снимки за 2020 г. Данные были получены с помощью коллекции ESA/CCI/FireCC/5-1 (European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) Programme, Fire ECV) на платформе GEE (Google Earth Engine). Коллекция представляет собой глобальный ежемесячный набор данных с пространственным разрешением ~ 250 м, содержащая характеристики пожаров растительности. Обнаружение гарей основано на отражательной способности поверхности в ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне прибора MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua [2]. Используются наземные данные Министерства лесного хозяйства и природопользования Республики Тыва за 2020 г. Также используются данные метеостанций Тувинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также сведения, имеющиеся в открытом доступе в Интернете.

Обработка и анализ проводили методами статистического анализа с использованием Excel. Пространственный анализ и визуализация результатов выполнены с помощью программы QGIS 3.30.1 и платформы GEE.

Результаты и их обсуждение. Результат ГИС обработки данных показал общую динамику пожаров растительности за исследуемый год. Выявлено, что по наземным данным за 2020 г. сгорело 39 239,6 га, к основной причине можно отнести метеоусловия. По данным метеостанций аномалия весенней температуры составила $+1,5$ °С, годовой – $+4,2$ °С.

Весной в 2020 г. наибольшая площадь возгораний зафиксирована на высоте 975 м над ур. моря, где в основном преобладают степи (рис. 1, а). По графику видно, что площадь пожаров снижается выше и ниже 975 м над ур. моря. Полученные данные показывают совпадение с ранним таянием снега и сухостью растительных горючих материалов и соответствуют с классом природной пожарной опасности (3,3 класс). Распространению весенних пожаров растительности способствуют метеорологические условия. В апреле идет интенсивное испарение снега при резком повышении температуры воздуха и малой относительной влажности. Это приводит к интенсивному высушиванию проводников горения на южных склонах степных и лесостепных поясов. Характерный весенний ветер со средней скоростью 3,3 м/с (максимальная скорость достигает до 35 м/с) способствует активному просыханию почвы и прошлогодней сухой травяной растительности.

Летом наибольшая площадь возгораний зафиксирована на высотах 1 250 м над ур. м. (преобладают степь и лесостепь) действовали 14 пожаров. Пожары уничтожили растительность на площади 11 702 га (рис. 1, б).

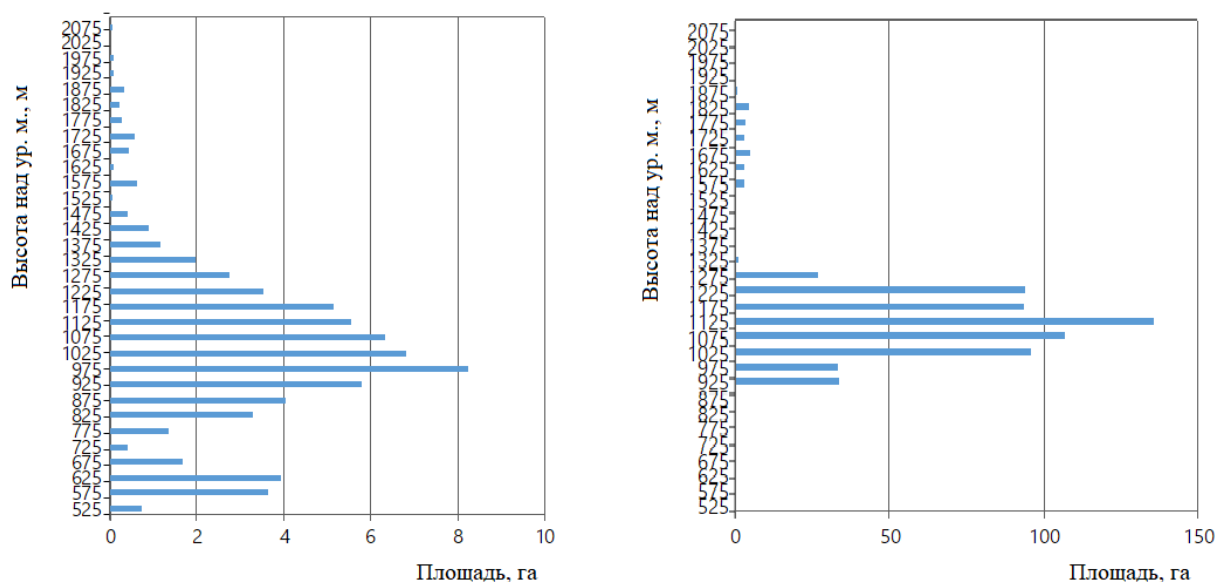


Рис. 1. Распределение площади весенних (а) и летних (б) пожаров растительности по высотным уровням над уровнем моря

Возникновению и распространению летних пожаров растительности летних пожаров способствуют высокая температура воздуха, продолжительные засухи, небольшие осадки, сухие грозы, безответственность населения во время сбора ягод, грибов и орехов. Значение индекса Нестерова более 1 000 является критерием, при котором возникают пожары растительности, при наличии других необходимых условий для возгорания (наличие горючего материала и/или источника). Способствующим фактором возникновения пожаров растительности остается антропогенный фактор.

Анализ данных приуроченности площадей пожаров показывают их распределение к определенным экспозициям склонов (рис. 2). Полученные результаты, свидетельствуют о преобладании пожаров площадей растительности весной, осенью на северных и восточных склонах 45–69 % (суммарно), летом – на южных (63 %).

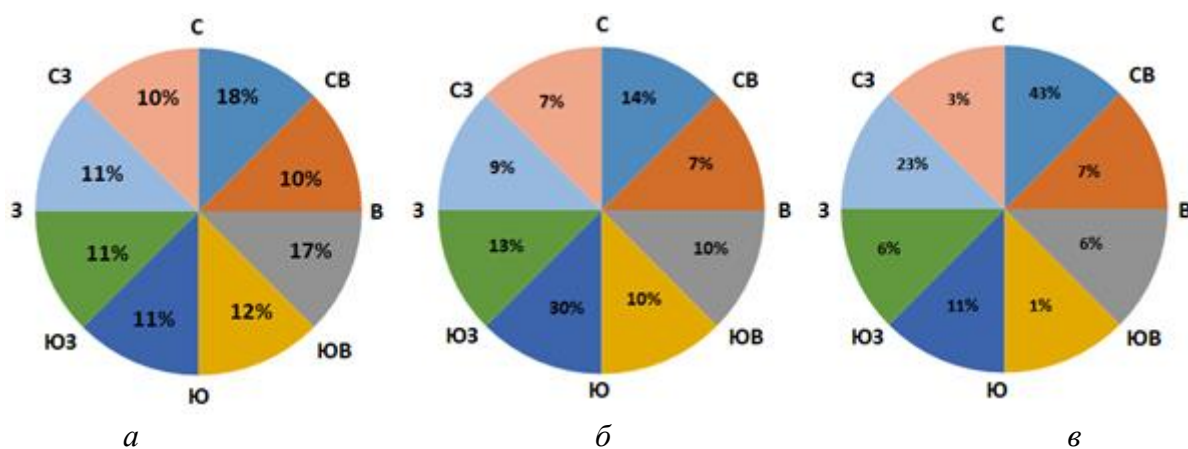


Рис. 2. Распределение площади пожаров в процентах по экспозициям склонов за 2020 г.: а) весенние пожары; б) летние пожары; в) осенние пожары

На рис. 3, а точками обозначены координаты расположения пожаров по наземным данным. Видно, что большая часть пожаров сосредоточена

в восточной части республики, где в основном сосредоточены лесные ресурсы республики. На рис. 3, б представлено пространственное распределение площади гарей в соответствии с коллекцией ESA/CCI/FireCC/5-1 (Modis). Она несопоставима с наземными данными, что составила 39 239,7 га. По приведенным картам видно, что лесные очаги пожаров на небольших участках, которые оперативно ликвидированы, не обнаруживаются космическими снимками Modis.

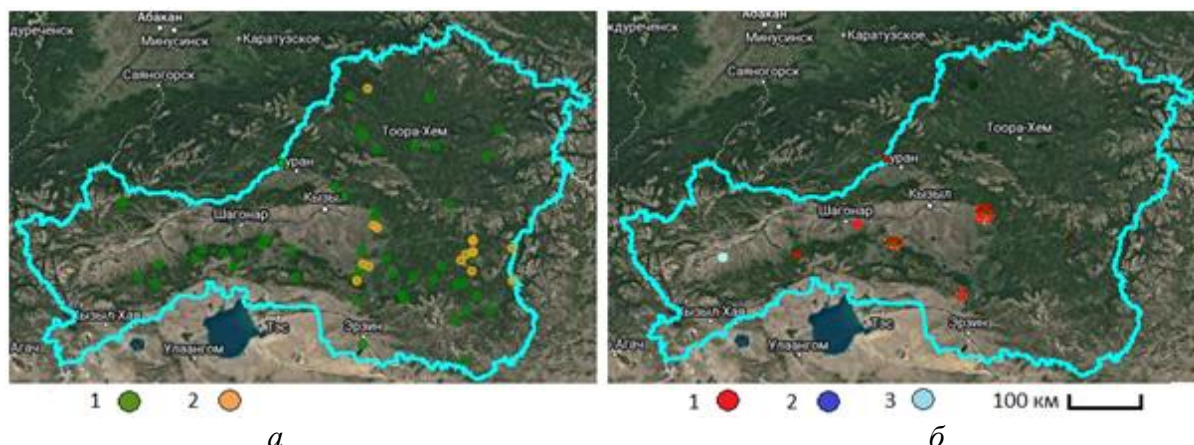


Рис.3. Пространственное распределение пожаров растительности за 2020 г.:
 а) по наземным данным; б) по данным космоснимков Modis
 (1 – весенние, 2 – летние, 3 – осенние пожары)

Выводы. Оценка пожаров растительности показали общую динамику пожаров растительности за 2020 г. на территории республики. Получен детальный анализ возникновения и развития пожаров растительности по высотным зонам и экспозициям склонов. В результате наложения элементов рельефа обнаружено, большая часть весенних и осенних пожаров расположены на южных, северных и восточных склонах экспозиции, летние – на южных (63 %). Анализ пожаров горно-котловинной территории на основе платформы GEE позволят получить качественные результаты. На основе полученных результатов можно прогнозировать, наиболее уязвимые участки склонов. Полученный результат может оказаться полезным по охране лесов и проведению профилактических работ от пожаров.

Список источников

1. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугув И. Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
2. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sens. Environ. 2017. V. 202. P. 18–27.
3. Ponomarev E., Ponomareva T., Zabrodin A. Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index // Fire. 2022. 5(1). P. 19.

4. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Bazhina E. V., Soja A. J., Groisman P. Ya. Droughts are not the likely primary cause for *Abies Sibirica* and *Pinus Sibirica* forest dieback in the south siberian mountains // *Forests*. 2022. V. 13. № 9. P. 1 378.

5. Volokitina A. V., Sofronova T. M. Creation of the Russian wildfire behaviour prediction system // *Science and World*. 2019. V. 41 (68). P. 72–78.

Kh. B. Kuular, A. F. Chuldum

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

e-mail: k-k-188@list.ru

WILDFIRE ASSESSMENT OF THE REPUBLIC TYVA FOR 2020 USING GOOGLE EARTH ENGINE

Abstract. Wildfires are natural disasters that lead to the destruction of vegetation cover. In this paper, a map of wildfire localization in the Tyva Republic for the year 2020 is constructed using Google Earth Engine (GEE). The data of vegetation wildfires related to meteorological data and landscape elements were analyzed. It was obtained that the most important factors of wildfire occurrence and development are weather conditions and location of fire centers in certain landscape elements. The growth of vegetation wildfires in 2020 was influenced by the spring air temperature anomaly (1,3°C). Maximum fire hotspots were found in summer on southern exposures, and in spring and fall on the northern, eastern slopes of the exposures. The obtained result may be useful for forest protection and fire prevention works.

Keywords: wildfire for 2020, ground and remote sensing data, GEE

С. В. Литвинов, Г. А. Милорадов, К. В. Авдеев, О. В. Семёнова
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
e-mail: Litvinov_S@mirea.ru, Miloradov@mirea.ru, Avdeev@mirea.ru,
Semyonova@mirea.ru

ВЛИЯНИЕ ЧАСТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 25 ОКТЯБРЯ 2022 ГОДА НА РЕГИОНАЛЬНУЮ ВОЗМУЩЕННОСТЬ ИОНОСФЕРЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Аннотация. В работе приведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы Западной Сибири ионозондами «Парус-А» во время частного солнечного затмения 25 октября 2022 г. В этом регионе, охватываемым затмением, размещены ионозонды в следующих городах: Салехард, Новосибирск и Подкаменная Тунгуска (Красноярский край). Данные с этих ионозондов показывают, что солнечное затмение вызывает реакцию ионосферы, в частности снижение критических частот отражающих слоев и уменьшение полного электронного содержания. В статье приводятся изменения критических частот и минимальной действующей высоты слоя F2 во время солнечного затмения. Обнаружены интересные явления, связанные с совпадением времени солнечного затмения и времени наступления сумерек.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, частное солнечное затмение, ионосферные эффекты, реакция ионосферы

Введение. Ионизация верхних слоев атмосферы обуславливается в большей степени солнечным излучением. Именно поэтому солнечные затмения оказывают влияние на ионосферу, порой достаточно значительное [1, 2]. Принято считать, что во время таких событий уменьшаются критические частоты, увеличиваются действующие высоты отражений от слоев, уменьшается полное электронное содержание (ПЭС) [3]. При этом отмечено, что максимальная реакция ионосферы может отставать от максимальной фазы затмения до получаса. Во время солнечного затмения, как и с наступлением сумерек, снижается ионизирующая радиация, что влечет за собой соответствующее изменение параметров.

Исследователи со всего мира пристально наблюдают за возмущением ионосферы во время неординарных и нерегулярных ситуаций (солнечные затмения, падения метеоритов, землетрясения, вспышки на Солнце и т. д.) [4].

Исследования осложняются относительно редкой частотой солнечных затмений и наличием средств измерения параметров ионосферы в интересующей области. Несмотря на пристальное внимание к ионосфере во время солнечных затмений, на данный момент отсутствует общепринятая модель реакции среднеширотной ионосферы на такие события. Отмечается большой разброс основных параметров во время солнечных затме-

ний, в том числе величины запаздывания относительно максимальной фазы затмений.

В настоящей работе рассмотрена реакция ионосферы Западной Сибири на частное солнечное затмение 25 октября 2022 г. по данным вертикальных ионозондов «Парус-А» ионосферной сети Росгидромета.

Солнечное затмение 25 октября 2022 г. По данным астрономического ежегодника (<http://planetarium-moscow.ru/about/news/chastnoe-zatmenie-solntsa-25oktyabrya-202/>) частное солнечное затмение 25 октября 2022 г. началось в 11:58 МСК, с восходом Солнца в арктической зоне Атлантического океана вблизи северного побережья Исландии. Далее область видимости частного затмения распространялась на восток и юго-восток, охватывая северо-восток Африки, западную и центральную Азию, практически всю Европу за исключением юго-запада Пиренейского полуострова. Завершилось частное затмение в 16:02 МСК с заходом Солнца в Аравийском море, охватив западную половину Азии, в т. ч. Индию. Карта солнечного затмения, составленная по данным портала TimeAndData (<https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2022-october-25>), приведена на рис. 1.

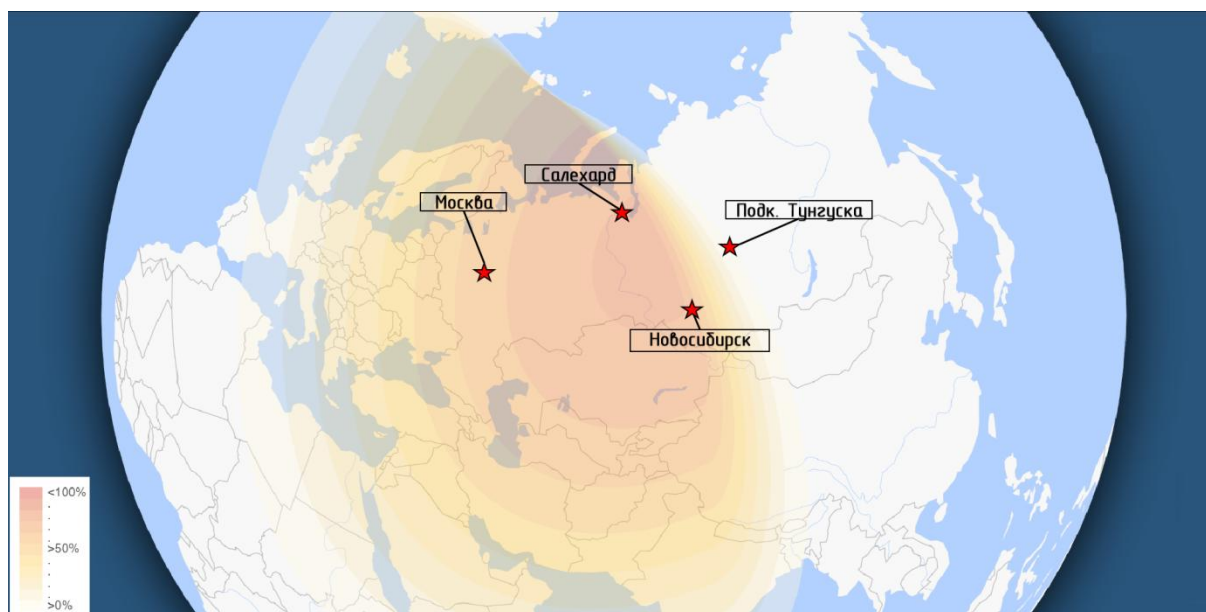


Рис. 1. Карта частного солнечного затмения 25 октября 2022 г.

В область тени попали ионозонды «Парус-А», развернутые в следующих городах Западной Сибири: Салехард, Новосибирск, п. Бор (Красноярский край). Их схематическое расположение показано на рис. 1. Параметры ионозондов, применительно к солнечному затмению представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обстоятельства видимости затмения на ионозондах «Парус-А»

Название	Координаты	Первое касание, UTC	Максимальная фаза, UTC	Размер максимальной фазы	Последнее касание, UTC
Tunguska	61,34 с.ш. 90,02 в.д.	10:00:09	10:12:50	0,7094	10:17:48
Salekhard	66,50 с.ш. 66,50 в.д.	09:38:18	10:46:34	0,8454	11:28:03
Novosibirsk	54,80 с.ш. 83,20 в.д.	10:08:29	11:02:44	0,7509	11:06:45

Ионозонды серии «Парус-А» являются зарегистрированными средствами измерения, внесены в Госреестр СИ под номером 51 425-12 и проходят поверку согласно документу «Инструкция. Станции вертикального радиозондирования ионосферы наземные «Парус-А». Методика поверки. 100 269 МП», утвержденному ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 20 апреля 2012 г. [5].

Результаты наблюдений. В сибирском регионе время наступления максимальной фазы солнечного затмения совпала с заходом Солнца, из-за этого эффекты собственно затмения нивелировались естественным снижением ионизации ионосферы. На рис. 2 приведены изменения критических частот f_{min} и f_oF_2 на ионозонде «Парус-А» (г. Салехард).

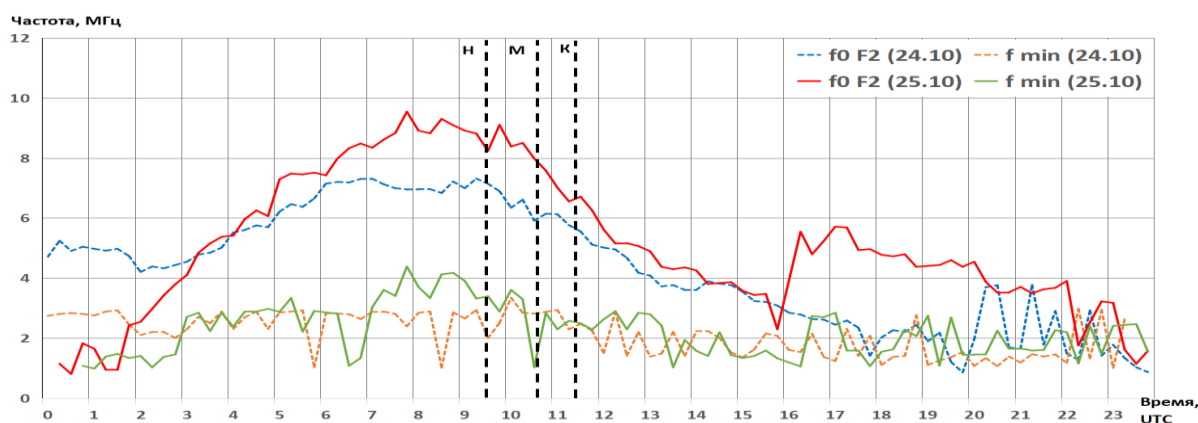


Рис. 2. Изменение критических частот f_{min} и f_oF_2 во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Салехард)

Аналогичная ситуация наблюдалась на ионозондах в г Новосибирск (рис. 3) и в п. Бор Красноярского края (рис. 4), где время между максимальной фазой солнечного затмения и его завершением составило менее 5 минут. Здесь можно отметить лишь увеличенную скорость снижения критической частоты слоя F2 по сравнению с предыдущим днем.

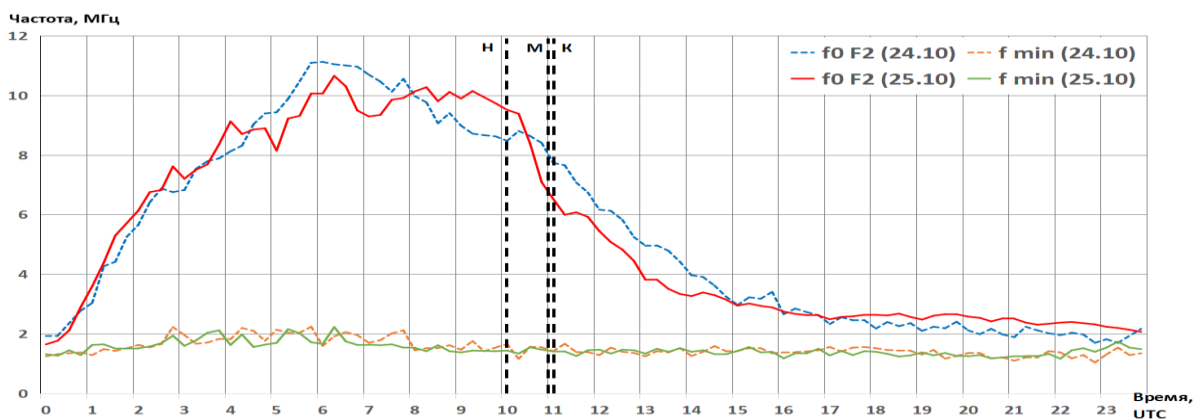


Рис. 3. Изменение критических частот f_{min} и f_oF_2 во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Новосибирск)

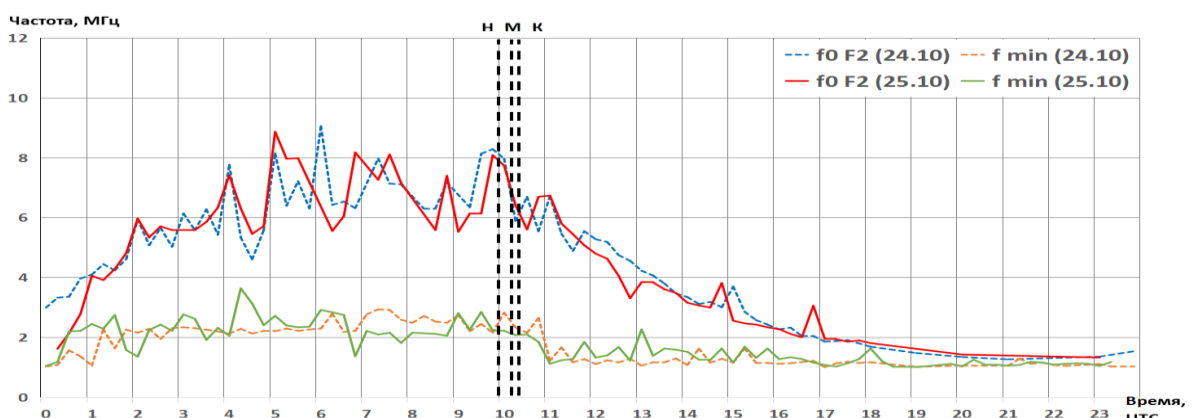


Рис. 4. Изменение критических частот f_{min} и f_oF_2 во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (Красноярский край)

Заключение. Результаты вертикального зондирования ионосферной сети Росгидромета во время частного солнечного затмения 25 октября 2022 г., в целом, подтвердили реакцию ионосферы с ранее проведенными исследованиями. Т. е. снижение критических частот отражающих слоев, характерных для времени захода Солнца. В то же время обнаружены интересные явления отсутствия реакции ионосферы при совпадении времени солнечного затмения с наступлением сумерек в конкретном регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

Список источников

1. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Едемский И. К. Ионосферные эффекты полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. по данным плотной сети GPS в Японии (GEONET) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 94–98.
2. Белинская А. Ю., Хомутов С. Ю. Результаты сравнительного анализа поведения ионосферы во время солнечных затмений в Новосибирске // Солнечно-земная физика. 2010. № 16(129). С. 9–13.
3. Черняков С. М. Проявление атмосферных гравитационных волн в высокоширотной ионосфере во время солнечных затмений // Успехи современного естествознания. 2010. № 1. С. 36–39.

4. Карелин А. В., Скрипачев В. О., Туманов М. В., Жуков А. О. Методика формирования состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 22.

5. Минлигареев В. Т. Описание типа станций вертикального радиозондирования ионосферы наземных «Парус-А» // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 3. С. 71–76.

S. V. Litvinov¹, G. A. Miloradov¹, K. V. Avdeev¹, O. V. Semenova¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
e-mail: Litvinov_S@mirea.ru, Miloradov@mirea.ru, Avdeev@mirea.ru,
Semyonova@mirea.ru

INFLUENCE OF THE PRIVATE SOLAR ECLIPSE OCTOBER 25, 2022 ON THE REGIONAL PERTURBATION OF THE IONOSPHERE OF WESTERN SIBERIA

Abstract. The paper presents the analysis of data of vertical sounding of the ionosphere of Western Siberia by Parus-A ionosondes during the private solar eclipse on October 25, 2022. In this region covered by the eclipse, ionosondes were placed in the following cities: Salekhard, Novosibirsk and Podkamennaya Tunguska (Krasnoyarsk Krai). Data from these ionosondes show that the solar eclipse causes the ionospheric response, in particular, a decrease in the critical frequencies of the reflecting layers and a decrease in the total electron content. The paper presents the changes in the critical frequencies and the minimum effective height of the F2 layer during a solar eclipse. Interesting phenomena related to the coincidence of the time of solar eclipse and the time of twilight onset are found.

Keywords: ionosphere, vertical sounding, partial solar eclipse, ionospheric effects, ionospheric response

В. Г. Маргарян¹, Г. М. Цибульский², А. М. Седракян³, Г. Д. Аветисян⁴

¹ Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

⁴ ГИС лаборатория института Геологии НАН Армении, Ереван, Армения

e-mail: vmargaryan@ysu.am; asedrakyan.phys@gmail.com;

GTsybulsky@sfu-kras.ru; avetisyangorik@gmail.com

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК В СЕВАНСКОМ БАССЕЙНЕ

Аннотация. В современных природно-антропогенных комплексных условиях рассматриваются пространственно-временные закономерности изменения формирования минимального зимнего стока рек в Севанском бассейне с использованием наземных данных. Рассчитаны экстремальные значения минимальных зимних расходов воды для 12 постов на реках, имеющих ряд наблюдений 40 лет и более и выпадающих в оз. Севан. Выявлены зависимости минимального стока рек от средней высоты и площади их водосборов.

Ключевые слова: реки бассейна оз. Севан, экстремальный минимальный сток, зимняя межень, температуры воздуха, пространственно-временные анализ, коэффициент линейного тренда, статистические характеристики

Введение. Формирование минимального зимнего стока рек зависит от комплекса природных физико-географических и антропогенных факторов, особенно от климатических изменений. Закономерные колебания во времени уровня и расхода воды, обусловленные физико-географическими свойствами бассейна, и прежде всего климатическими условиями, объединяют под названием водный режим рек [1–2]. Пространственно-временная изменчивость водного режима затрудняет организацию экономически эффективного и экологически безопасного использования водных ресурсов рек степной зоны [3]. Согласно результатам исследований [4–6], на реках бассейна оз. Севана в последние 30 лет преимущественно наблюдается фаза повышенной водности, характеризующаяся увеличением минимального стока зимней межени. Данные тенденции подтверждаются исследованиями водного режима крупных рек Волга, Дон и Урал [7–9]. Вместе с тем в изучаемом бассейне, также и р. Урал [10] на фоне общих тенденций отмечаются определенные изменения водного режима, обусловленные локальной геолого-геоморфологической спецификой исследуемой территории.

Цель данной работы состоит в исследовании региональных пространственно-временных особенностей изменений формирования мини-

мального стока в холодный период на территории бассейна оз. Севан с использованием наземных данных.

Материалы и методы исследования. Обсуждены и проанализированы соответствующие исследовательские работы [11–13].

Использованы имеющиеся материалы многолетних наблюдений за среднемесячными расходами, суточными и срочными минимальными расходами воды основных рек исследуемой территории на гидрологической государственной наблюдательной сети «Центра гидрометеорологии и мони-торинга» ГНКО Министерства окружающей среды Республики Армения по 2021 г. включительно.

В процессе исследования применены методы гидрологической аналогии, интерполяции, экстраполяции, математической статистики, картографирования.

Результаты и обсуждение. Рассчитан экстремальный минимальный зимний расход воды, который в соответствии с табл. 1, выделяется неравномерным распространением на изучаемой территории. На рассмотренной территории абсолютный минимум расходов воды в зимнюю межень составляет от 0,007 до 1,23 м³/с, а норма экстремальных минимальных расходов воды – от 0,052 до 0,86 м³/с. Как правило, с высотой увеличивается модуль экстремального минимума зимнего стока. До 2 400 м отметки высота модуля экстремального минимального зимнего стока рек составляет 2,0 л/с · км², до 2 500 м отметки высота – 4,0 л/с · км², до 2 600 м отметки высота – 6,0 л/с · км² и более.

Таблица 1

Экстремальные минимальные расходы воды рек бассейна оз. Севан
в период зимней межени

<i>Река – пункт</i>	<i>Дзыкнагет – Цовагюх</i>	<i>Драхтик – Драхтик</i>	<i>Памбак – Памбак</i>	<i>Масрик – Цовак</i>	<i>Карчахпюр – Карчахпюр</i>	<i>Ваденис – Варденик</i>
Абсолютный, м ³ /с	0,024	0,007	0,025	0,86	0,26	0,045
Норма, м ³ /с	0,14	0,052	0,064	2,12	0,80	0,42
<i>Река – пункт</i>	<i>Мартуни – Геховит</i>	<i>Аргичи – Геташен</i>	<i>Цахкашен – Вагашен</i>	<i>Личк – Личк</i>	<i>Бахтак – Цаккар</i>	<i>Гаварагет – Норатус</i>
Абсолютный, м ³ /с	0,17	0,60	0,11	0,82	0,008	1,23
Норма, м ³ /с	0,54	1,69	0,43	1,46	0,061	2,50

Для расчета стока неизученных рек получены корреляционные зависимости между величиной экстремального минимального зимнего стока и уклона реки от наиболее удаленной точки (рис. 1, а), между экстремальным минимальным зимним стоком и площадью водосбора (рис. 1, б). Из рис. 1 видно, что связь между экстремальным минимальным зимним стоком и площадью водосбора линейная и прямо пропорциональная, то есть с увеличением площади водосбора также растут величины экстре-

мального минимального зимнего стока. Связь между экстремальным минимальным зимним стоком и уклоном реки от наиболее удаленной точки обратно пропорциональная, то есть с увеличением уклона реки от наиболее удаленной точки уменьшаются величины экстремального минимального зимнего стока.

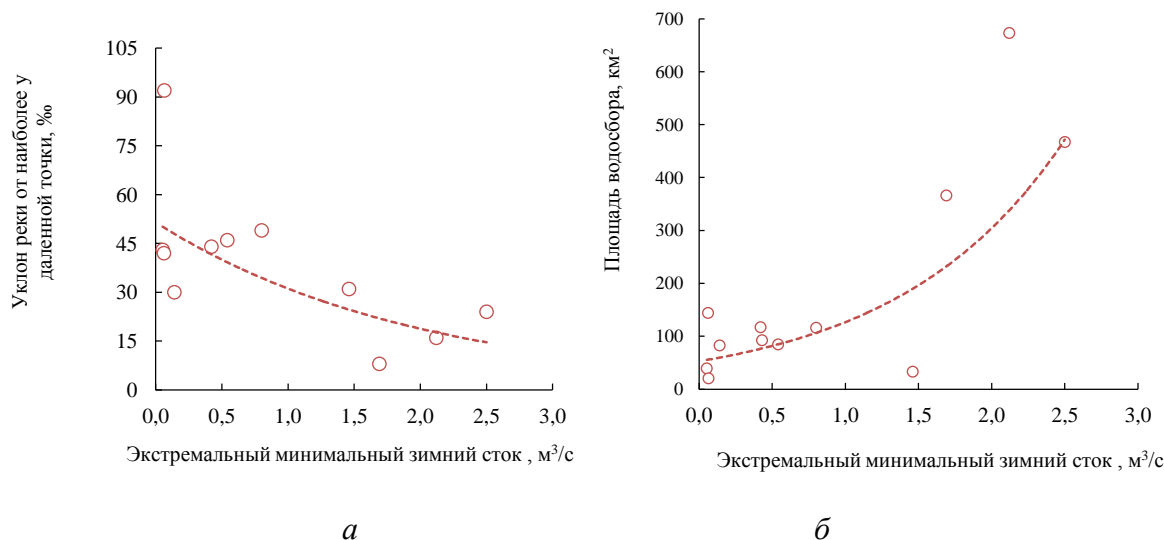


Рис. 1. Корреляционная связь между величиной экстремального минимального зимнего стока

Гидрометеорологических компонентов географического ландшафта, отражающих то соотношение тепла и влаги, свойственно данной географической зоне. Следовательно, изменение климата должно отразиться на динамике гидрологического режима речных систем [14]. Наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения заметно сказываются на формировании речного стока в межень, особенно в зимний период. Явно выраженная тенденция к повышению температуры воздуха и увеличению атмосферных осадков в холодное время года, а также оттепели способствуют росту зимнего стока рек, что отражается и на минимальных расходах [15].

Таблица 2
Статистика зимних климатических параметров бассейна оз. Севан за период 1993–2022 гг.

Климатический параметр	Среднее значение	Тренд / 10 лет
Средняя температура воздуха, °С	-2,70	+0,65
Сумма температура воздуха выше 0 °С, °С	138,4	+21,3
Число дней с положительной температурой воздуха, °С	47	+7,01
Сумма осадков, мм	149	+4,88

Для анализирования сказанных на формировании речного стока в межень климатических изменений, составлена табл. 2. На рис. 2 представлены линейные тренды экстремального минимального зимнего стока ($\text{м}^3/\text{с} / 10 \text{ лет}$)

в ноябре – марте в бассейне оз. Севана за период 1993–2022 гг. Исследования показали, что выявленные тренды экстремального минимального зимнего стока исследуемых рек различаются как по знаку, так и по величине. На всей изучаемой территории бассейна оз. Севан преобладает увеличение стока. Этому способствует рост числа дней и сумма с положительными температурами, температура воздуха, сумма осадков за период ноябрь – март. Изменение количества осадков за зимний период и увеличение «оттепельных» дней отражает условия формирования зимнего стока рек.

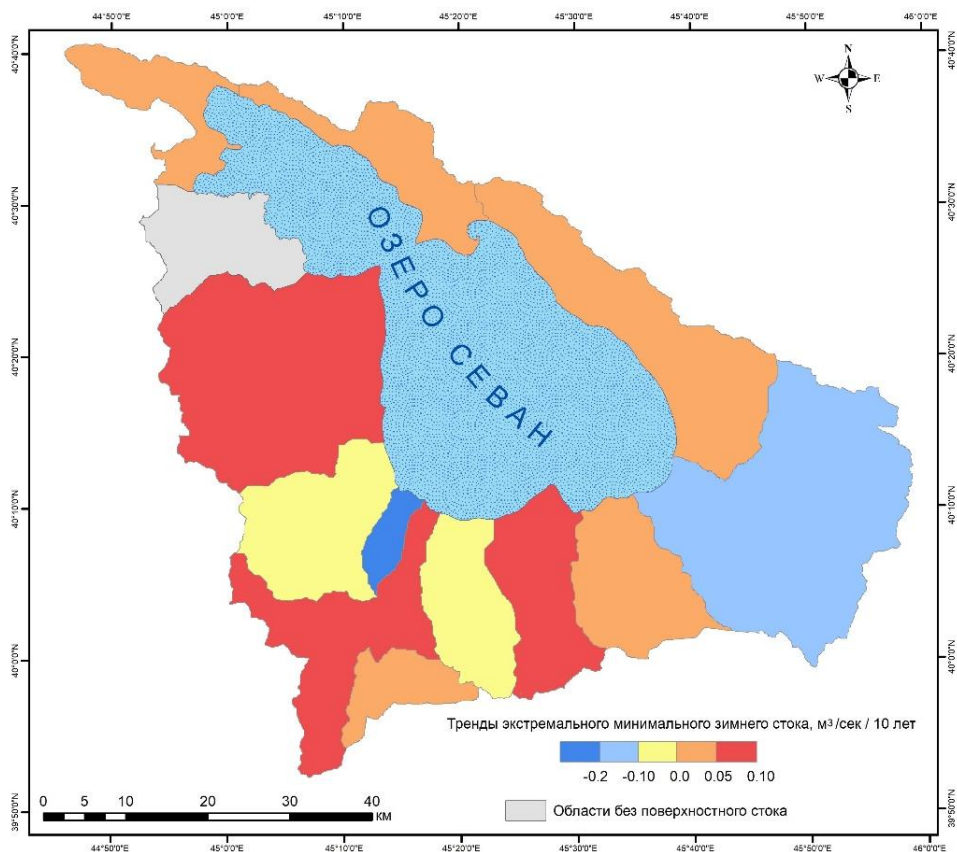


Рис. 2. Тренды экстремального минимального зимнего стока (м³/с / 10 лет) в бассейне оз. Севан за период 1993–2022 гг.

Таким образом, в последние десятилетия происходят существенные увеличения стокообразующих климатических показателей (температуры и осадков), что привело к увеличению зимнего меженного стока. В целом для зимы при отсутствии больших значимых трендов осадков важнейшая роль в образовании зимнего стока принадлежит количеству дней и сумме со среднесуточными положительными температурами и, как следствие, смягчению температурного режима зимы.

Работа выполнена при поддержке гранта Комитета по науке Республики Армения в рамках научного проекта 21Т-1Е215 «Гидроэкологическая оценка характеристик зимнего меженного стока рек, впадающих в озеро Севан».

Список источников

1. Закономерности гидрологических процессов / под ред. Н. И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 736 с.
2. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 305 с.
3. Сивохиц Ж. Т., Павлейчик В. М., Чибилев А. А. Изменения водного режима рек бассейна реки Урал // Доклады Академии НАУК, 2019, том 488, № 5, с. 545–549.
4. Маргарян В. Г. Временные изменения зимнего минимального декадного стока рек бассейна озера Севан // Украинский географический журнал. 2020. № 3(111). С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.020>.
5. Маргарян В. Г., Аветисян Г. Д., Поляков А. В. Закономерности пространственно-временного распределения зимнего минимального декадного стока рек бассейна озера Севан // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. с. 92–108.
6. Margaryan V., Tsibul'skii G., Raevich K. Dynamics of changes in long-term average annual river runoff in the lake Sevan basin // E3S Web of Conferences, Volume 149 (2020), id. 03009. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2019), 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903009.
7. Алексеевский Н. И., Лебедева М. Ю., Соколовский Д. К. Источники питания и изменчивость их вклада в формировании стока рек Европейской территории России // Водные ресурсы, 2007. Т. 34. № 1. С. 5–17.
8. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А. Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 55–78.
9. Дмитриева В. А., Нефедова Е. Г. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. 2018. М.: Изд. дом «Кодекс». С. 285–297.
10. Павлейчик В. М., Сивохиц Ж. Т. Особенности многолетнего и сезонного стока рек бассейна р. Урал (на примере рр. Салмыш и Большой Ик) / Известия Иркутского государственного университета, 2018. Т. 24. С. 70–80.
11. Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Бугров А. А., Григорьев В. Ю., Киреева М. Б., Рец Е. П., Сафронова Т. И., Телегина А. А., Телегина Е. А. Оценка возобновляемых водных ресурсов Европейской части России и пространственно-временной анализ их распределения // Водное хозяйство России № 4, 2016. 18–31.
12. Титкова Т. Б. Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 147–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157.
13. Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Харламов М. А., Самсонов Т. Е., Энтин А. Л., Лурье И. К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26. DOI:10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26.
14. Буренина Т. А., Прысов Д. А., Федотова Е. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на гидрологический режим рек юга Красноярского края // Сибирский лесной журнал. № 2. 2018. 48–60.
15. Сенцова И. И. Оценка минимального речного стока в бассейне верхней Волги в условиях изменения климата // Природообустройство. 2011. № 5. С. 76–80.

V. G. Margaryan¹, G. M. Tsibul'skii², A. M. Sedrakyan³, G. D. Avetisyan⁴

¹ C Department of physical geography and hydrometeorology of the Geographical and Geological Faculty, Yerevan State University, Yerevan, Armenia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Department of Physics, National Polytechnic University of Armenia (NPUA), Yerevan, Armenia

⁴ GIS laboratory of the Institute of Geology of the National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan, Armenia

e-mail: vmargaryan@ysu.am; asedrakyan.phys@gmail.com;
GTsybul'sky@sfu-kras.ru; avetisyangorik@gmail.com

SPATIAL AND TIME REGULARITIES OF FORMATION OF THE MINIMUM RIVER FLOW IN THE SEVAN BASIN

Abstract. In modern natural and anthropogenic complex conditions, spatio-temporal patterns of changes in the formation of the minimum winter runoff of rivers in the Sevan basin are considered using ground data. The extreme values of the minimum winter water discharges are calculated for 12 posts on the rivers with a series of observations of 40 years or more and flowing into the lake. Sevan. This study is devoted to mapping the current state of the distribution of the extreme minimum winter runoff of the rivers of the Sevan basin and its transformation. The distribution maps of the module of extreme values of the minimum runoff for the winter period and their coefficient of change have been obtained. On the basis of maps spatio-temporal tendencies of extreme minimum winter runoff are revealed. The results should be considered when organizing effective and environmentally safe water use in the rivers flowing into the lake Sevan.

Keywords: maximum runoff, distributions, coefficient of variation and row asymmetry coefficient, r. Arpa – p. Jermuk, Republic of Armenia

This work was supported by the RA Science Committee and Russian Foundation for Basic Research (RF) in the frames of the joint research project SCS 20RF-039 Short-term probabilistic forecast of river flow during the spring flood and RFBR № 20-55-05006\20 accordingly.

**В. Г. Маргарян¹, Г. М. Цибульский²,
А. М. Седракян³, К. В. Раевич², Г. Д. Аветисян⁴**

¹ Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

⁴ ГИС лаборатория института Геологии НАН Армении, Ереван, Армения
e-mail: vmargaryan@ysu.am; GTsybulsky@sfu-kras.ru; asedrakyan.phys@gmail.com;
KShatrova@sfu-kras.ru, avetisyangorik@gmail.com

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ 30-СУТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МИНИМАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ЗИМНЕГО ПЕРИОДА РЕК БАСЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН

Аннотация. Работа посвящена оценке основных тенденций изменения минимального 30-суточного зимнего стока рек бассейна оз. Севан. Рассчитаны характеристики минимальных 30-суточных зимних расходов воды для постов на реках, имеющих ряд наблюдений 40 лет и более и впадающих в оз. Севан. Построены кривые обеспеченности, оценены значения минимального 30-суточного стока обеспеченностью 90, 95 и 99,5 % для зимнего периода по 12 створам. Определены значения норм стока, его коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s). Проведен анализ временного распределения исследуемых гидрологических характеристик.

Ключевые слова: Армения, реки бассейна оз. Севан, 30-суточный минимальный сток, зимняя межень, температуры воздуха, коэффициент линейного тренда, статистические характеристики

Введение. Именно зимний сток и его минимальные значения могут служить нижним пределом использования водных ресурсов на территории данного водосбора, что следует учитывать при планировании размещения водоемких производств.

Минимальные расходы воды относятся к категорий основных гидрологических характеристик, широко используемых в практике гидрологических расчетов. При этом чаще всего в расчетах применяются средние 30-суточные (месячные) и суточные расходы воды, хотя иногда используются минимальные 5-, 7- или 10-суточные расходы воды. В случае недопущения каких-либо перерывов или уменьшения подачи воды при водоснабжении промышленных предприятий в расчетах применяется минимальный среднесуточный расход воды. Расчетная обеспеченность назначается обычно в диапазоне 75–97 % [Владимиров, 1990].

Цель данной работы – рассчитать норму минимальных 30-суточных зимних речных расходов воды, коэффициентов изменчивости (C_v) и асимметрии (C_s), минимальные расходы различной обеспеченности, проанализировать и оценить закономерности распределения изменения минималь-

ных 30-суточных зимних расходов рек бассейна оз. Севан в ряду многолетних наблюдений.

Материалы и методы исследования. Изменение величин минимального 30-суточного зимнего речного стока проанализировано по данным многолетних наблюдений в двенадцати створах рек, впадающих в озеро Севан, отличающихся физико-географическими условиями стокоформирования и площадью водосборов.

В качестве исходных данных в работе использованы данные многолетних наблюдений за расходами воды за период со дня открытия гидрологических постов по 2020 г. Выполнена обработка инструментальных данных 12 гидрологических постов «Центра гидрометеорологии и мониторинга» ГНКО Министерства окружающей среды Республики Армения.

При исследовании использованы следующие методы: математико-статистический, экстраполяционный, интерполяционный, корреляционный, картографический, а также методы анализа и аналога.

Результаты и обсуждение. В данной работе обсуждаются минимальные 30-суточные речные расходы воды зимнего периода. Основными определяющими факторами минимального стока являются климатические и гидрогеологические условия, под влиянием которых рассматриваемая территория характеризуется неравномерным распределением речного стока (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики минимального 30-суточного расходы вод рек бассейна оз. Севан за период с XI по III месяц

Река – пункт	Q , м ³ /с	Модуль стока, л/с·км ²	C_v	C_s	Расход воды обеспеченностью %, м ³ /сек		
					90	95	99,5
Дзыкнагет – Цовагюх	0,17	2,06	0,42	2,15	0,111	0,108	0,106
Драхтик – Драхтик	0,065	1,66	0,50	1,20	0,030	0,025	0,016
Памбак – Памбак	0,075	3,68	0,28	0,94	0,052	0,047	0,037
Масрик – Цовак	2,36	3,51	0,19	-0,06	1,801	1,64	1,22
Карчахпюр – Карчахпюр	0,90	7,76	0,17	0,31	0,754	0,705	0,584
Ваденис – Варденик	0,54	4,62	0,29	0,29	0,366	0,305	0,150
Мартуни – Геховит	0,66	7,81	0,29	0,34	0,423	0,365	0,227
Аргичи – Геташен	2,20	6,01	0,25	1,12	1,60	1,49	1,25
Цахкашен – Вагашен	0,49	5,30	0,23	-0,57	0,345	0,305	0,202
Личк – Личк	1,58	47,9	0,34	0,95	0,971	0,866	0,672
Бахтак – Цаккар	0,16	1,11	0,60	0,71	0,043	0,027	0,005
Гаварагет – Норатус	2,77	5,93	0,14	0,20	2,28	2,12	1,71

У девяти рядов величины коэффициентов вариации менее 0,30, а у остальных – от 0,30 до 0,60. Среднее значение коэффициента вариации для всего бассейна оз. Севан составляет 0,31. Для зимних минимальных среднемесячных расходов воды Q рек такие значения вариации довольно небольшие, то есть, можно предположить, что зимние минимальные среднемесячные расходы довольно стабильные и имеют сравнительно небольшие значения рискованности. Коэффициент асимметрии C_s ряда, в отличие от коэффициента вариации, имеет большие значения. Среднее значение коэффициента асимметрии равно 0,65.

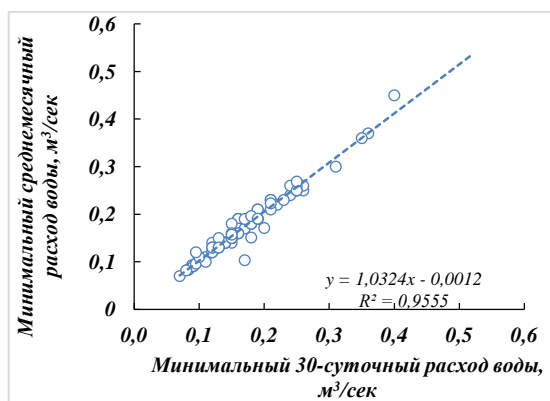


Рис. 1. Корреляционная связь между величинами минимальных среднемесячных расходов воды и минимальных 30-суточных расходов воды зимнего периода, р. Дзыкнагет – п. Цовагюх

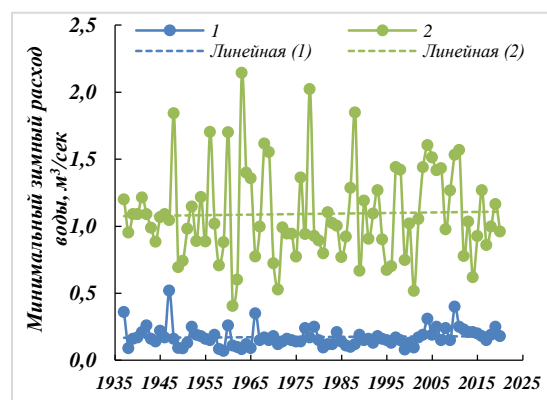


Рис. 2. Изменение величин годового стока (1) и 30-суточного минимального стока зимней межени (2), м³/с: р. Дзыкнагет – п. Цовагюх

Получены тесные корреляционные связи между величинами минимальных среднемесячных расходов воды и минимальных 30-суточных расходов воды зимнего периода (рис. 1). Сопоставление значений годового стока и 30-суточных значений минимального стока зимнего периода иллюстрирует определенную взаимообусловленность в изменениях данных величин (рис. 2).

Расчеты показали, что у большинства рек, впадающих в оз. Севан (более чем на 58 % постов), наблюдается повышение величины зимнего стока, т.е. положительный тренд в его изменении (рис. 3). Значения коэффициента линейного тренда минимального 30-суточного зимнего стока для рек изучаемой бассейна оз. Севан находится в пределах от – 0,162 до + 0,124 м³/сек / 10 лет. В целом увеличение стока зимней межени имеет важное практическое значение, так как величина стока данного периода является лимитирующим фактором гарантированного и устойчивого водопотребления [Sivokhip et al., 2021].

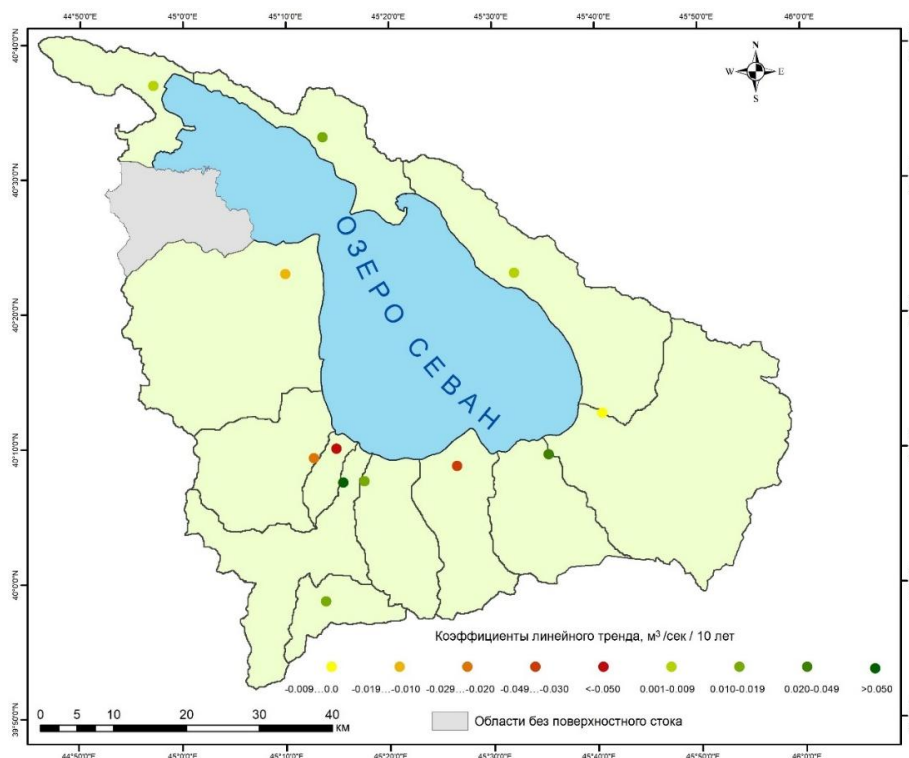


Рис. 3. Распределение коэффициентов линейного тренда минимального 30-суточного зимнего стока в м³/сек / 10 лет за весь период наблюдения (декабрь – март).
Бассейн оз. Севан

Исследования показывают, что рост минимальных зимних расходов воды, наблюдающийся со второй половины 70-х годов, обусловлен увеличением температуры воздуха зимнего периода, то есть изменением климата. Характерные черты изменения климата для бассейна оз. Севан – это повышение температуры воздуха в приповерхностном слое, особенно значительное в ноябре – марте, при незначительных изменениях температуры теплого периода и некотором увеличении количества осадков [Маргарян, 2020а, 2020б; Margaryan et al., 2020]. Как указано в работе [Джамалов и др., 2015], для Европейской части России (ЕЧР) рост приземной температуры воздуха обусловлен, прежде всего, ее многолетним повышением в области отрицательных значений, это также характерно и на изучаемой территории Армении [Маргарян и др., 2020]. С другой стороны, для снежного периода характерно многолетнее увеличение периода с положительными температурами воздуха на фоне роста осадков, что снижает величину снеготпасов и повышает величину зимнего стока. Вследствие климатических изменений в последние 30 лет на большей части Европейской территории России происходит увеличение водности межени [Фролова и др., 2020]. Основным климатическим фактором, обуславливающим наблюдающееся в бассейне Волги увеличение минимального зимнего стока, является рост температуры воздуха зимнего периода [Болгов и др., 2014].

Выводы. В результате проведенных исследований установлена повсеместное неравномерное распределение изменения 30-суточного минимального стока зимней межени в бассейне рек озера Севан. Коэффициент линейного тренда этой характеристики практически для большинства

наблюдательных постов (более чем на 58 % постов) на территории бассейна оз. Севан положителен. Значения коэффициентов линейного тренда минимального 30-суточного зимнего стока для изучаемых рек бассейна оз. Севан находится в пределах от $-0,162 \text{ м}^3/\text{сек} / 10 \text{ лет}$ (Аргичи) до $+0,124 \text{ м}^3/\text{сек} / 10 \text{ лет}$ (Личк).

Работа выполнена при поддержке гранта Комитета по науке Республики Армения в рамках научного проекта 21Т-1Е215 «Гидроэкологическая оценка характеристик зимнего межлетнего стока рек, впадающих в озеро Севан».

Список источников

1. Болгов М. В., Трубецкова М. Д., Филимонова М. К., Филиппова И. А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне реки Волги // Вод. хоз-во России: проблемы. технологии, управление. 2014. № 3. С. 83–99.
2. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 365 с.
3. Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Сафронова Т. И., Телегина Е. А. Основные тенденции изменения зимнего стока рек Европейской части России // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года». Том 1. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 53–60.
4. Маргарян В. Г. Расчет зимнего среднедекадного минимального стока рек бассейна озера Севан и анализ его временной изменчивости // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020. № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-27-35>.
5. Маргарян В. Г. Временные изменения зимнего минимального декадного стока рек бассейна озера Севан // Украинский географический журнал. 2020. № 3(111). С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.020>.
6. Маргарян В. Г., Аветисян Г. Д., Саргсян А. Т., Маргарян П. Н. Закономерности пространственно-временного распределения абсолютных минимальных температур приземного слоя воздуха в бассейне озера Севан // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2022. Т. 86, № 2. С. 232–242. DOI: [10.31857/S2587556622020078](https://doi.org/10.31857/S2587556622020078).
7. Фролова Н. Л., Гельфан А. Н., Киреева М. Б., Рец Е. П., Телегина Е. А. Анализ экстремальных гидрологических явлений в пределах бассейнов равнинных рек Европейской территории России // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.», место издания Карельский научный центр РАН Петрозаводск, т. 2. С. 51–58.
8. Margaryan V., Tsibul'skii G., Raevich K. Dynamics of changes in long-term average annual river runoff in the lake Sevan basin // E3S Web of Conferences, Volume 149 (2020), id. 03009. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2019), 2020. DOI: [10.1051/e3sconf/202014903009](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014903009).
9. Sedrakyan A., Margaryan V., Reshetchenko S., Dmitriev S. Physical meaning of temperature and evaluation of distribution laws (in the area of the lake Sevan basin) // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Geology. Geography. Ecology”, 2023, № 58, P. 231–240. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-18>.
10. Sivokhip Z. T., Pavleychik, V. M., Chibilev A. A. Changes in River Runoff during Winter Low Water Periods in the Basin of the Ural River. Doklady Earth Sciences 499, 2021, 703–707 <https://doi.org/10.1134/S1028334X2108016X>.

V. G. Margaryan¹, G. M. Tsibul'skii²,
A. M. Sedrakyan³, K. V. Raevich², G. D. Avetisyan⁴

¹ C Department of physical geography and hydrometeorology of the Geographical and Geological Faculty, Yerevan State University, Yerevan, Armenia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Department of Physics, National Polytechnic University of Armenia (NPUA), Yerevan, Armenia

⁴ GIS laboratory of the Institute of Geology of the National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan, Armenia

e-mail: vmargaryan@ysu.am; GTsybul'sky@sfu-kras.ru;

asedrakyan.phys@gmail.com; KShatrova@sfu-kras.ru; avetisyangorik@gmail.com

THE MAIN TRENDS IN 30-DAY VALUES OF MINIMUM SURFACE RUNOFF IN THE WINTER PERIOD OF RIVERS OF THE LAKE SEVAN BASIN

Abstract. The work is devoted to the assessment of the main trends in the change of the minimum 30-day winter runoff in the basin of the lake Sevan. The characteristics of the minimum 30-day winter water discharges for the observation points on rivers with a series of observations of 40 years or more and flowing into the lake Sevan are calculated. Reliability curves were constructed, and the values of the minimum 30-day runoff with a probability of 90, 95 and 99,5 % for the winter period were estimated for 12 sections. The values of runoff norms, its coefficients of variation (Cv) and asymmetry (Cs) are determined. An analysis of the time distribution of the studied hydrological characteristics was carried out.

Keywords: Armenia, rivers of the basin of the lake Sevan, 30-day minimum runoff, winter low water, air temperatures, linear trend coefficient, statistical characteristics

This work was supported by the RA Science Committee and Russian Foundation for Basic Research (RF) in the frames of the joint research project SCS 20RF-039 Short-term probabilistic forecast of river flow during the spring flood and RFBR № 20-55-05006\20 accordingly.

Е. В. Матко¹, А. Н. Сафонова^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Санкт-Петербургский электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ematko-ki19@stud.sfu-kras.ru, asafonova@sfu-kras.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА ВЫМИРАНИЯ ЛЕСОВ ОТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕРОЙ ЦАПЛИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БПЛА

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы глубокого обучения для решения задач в области дистанционного зондирования Земли. Особый интерес представляет прогнозирование гибели лесных массивов по данным БПЛА, которую вызывает жизнедеятельность серой цапли. Мы представляем результаты от обучения и тестирования двух инновационных моделей нейронных сетей: U-Net и Deeplabv3+. Также нами был разработан и применен алгоритм предварительной обработки изображений. Результаты, полученные от независимой проверки нейросети имеют практическую ценность для более эффективного контроля и предотвращения гибели лесных экосистем.

Ключевые слова: глубокое обучение, гибель леса, серая цапля, нейронная сеть, прогнозирование, БПЛА

Введение. Лес является возобновляемым ресурсом, однако, ученые со всего мира стараются решить проблему его вымирания. К основным причинам гибели леса можно отнести следующие: в следствии налета насекомых [1], жизнедеятельности животных [2], птиц [3], пожаров [4], болезней [5] и вырубки [6]. Однако, данная работа нацелена на прогнозирование поврежденного леса в результате жизнедеятельности серой цапли (от лат. *Ardea Cineria*). Данная птица может быть значительной угрозой для лесов, особенно для молодых и слабых деревьев, так как она повреждает кору и ветви, что приводит их к гибели. Так, например, в статье [7] были представлены исследования по влиянию жизнедеятельности серой цапли на экосистему леса.

Для локализации зон гибели леса используют различные подходы к мониторингу и наблюдению за окружающей средой с использованием средств дистанционного зондирования Земли. Например, метод случайного леса, k -ближайших соседей, непараметрические методы и другие. Однако, технологии искусственного интеллекта, такие как машинное обучение и глубокое обучение (ГО), преобладают над классическими методами. В основном, это связано с высоким развитием компьютерных мощностей.

Таким образом, цель данного исследования заключается в прогнозировании гибели леса в следствии жизнедеятельности серой цапли по данным БПЛА с использованием технологии ГО.

Тестовая область и материалы исследования. Исследуемый район гнездования птиц представлен на рис. 1. Территория Республики Татарстан, 50 километров к югу от города Казани, вблизи населенного пункта Нармонка, Россия. На полуострове, образованном слиянием Волги и ее крупнейшего притока Камы.

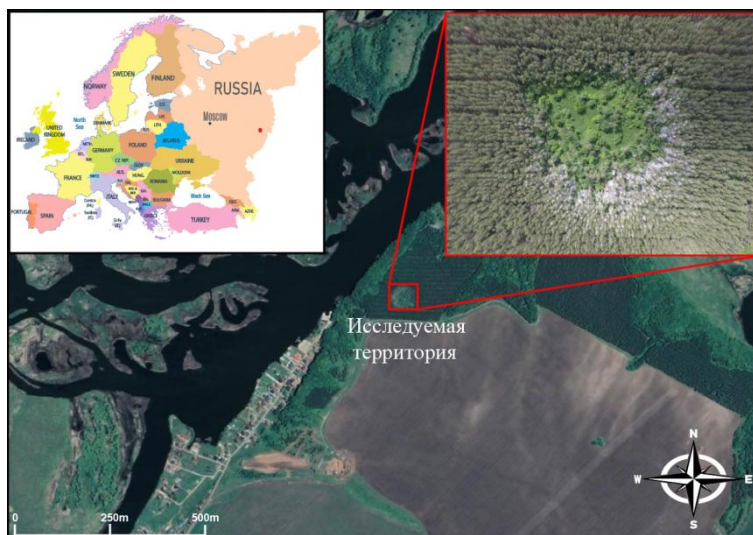


Рис. 1. Тестовая область исследования, Республика Татарстан, Россия

В исследовании использовались изображения, полученные с БПЛА DJI Phantom 4 с RGB (красный, зеленый и синий каналы) камерой с разрешением 4 000×3 000 пикселей. Объектом исследования выступает лесной массив, посаженный в 1983 г., и состоящий исключительно из сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris*). Набор данных был разделен на 2 категории: здоровые деревья (0–75 % повреждений) и поврежденные или мертвые деревья (75–100 % повреждений).

В рамках проведения эксперимента был собран первоначальный набор данных, содержащий 2 000 изображений. Кроме того, была выделена одна крупная сцена с кратером для проведения независимой проверки обученных моделей. Весь набор данных был разделен на обучающую и валидационную выборки – 70 % и 30 %, соответственно.

Методы. Для улучшения качества исходных изображений и повышения производительности обучающих моделей нами был разработан алгоритм для предварительной обработки набора данных. Алгоритм включает в себя несколько последовательных шагов [8]:

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

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

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

Шаг 2: преобразование трёхцветного изображения в цветовое пространство Lab, которое описывает математически все воспринимаемые цвета в трех измерениях L для легкости и a и b для цветовых компонентов зелено-красный и сине-желтый [9].

Шаг 3: выравнивание распределения яркостей в изображении с использованием алгоритма адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) для улучшения контрастности изображения [10].

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

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

В качестве нейронных сетей (НС) для эксперимента были выбраны U-Net и Deeplabv3+ архитектуры, так как они продемонстрировали высокие точности на задачах сегментации в условиях сниженных вычислительных мощностей [11, 12].

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

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

где $|X|$ и $|Y|$ количество элементов в множестве X и, Y соответственно, X – множество размеченных масок, Y – множество предсказанных масок.

На этапе обучения НС была использована стандартная скорость обучения со значением 0,001. Количество пакетов для разбивки обучающей выборки составило 14.

Результаты. Во время обучения архитектур U-Net и Deeplabv3+ точность (DSC) составила 91% и 85%, соответственно. Потери от обучения составили 0,311 для U-Net и 0,19 для Deeplabv3+. Результат независимого тестирования для каждой из моделей составил 96,34 % для U-Net и 89 % для Deeplabv3+. Для наглядности, на рисунке 2 представлены результаты обученных архитектур для прогнозирования поврежденных и мертвых деревьев.



Рис. 2. Сравнительный результат независимой проверки обученных архитектур

После проведения тестирования были получены высокие результаты прогнозирования поврежденного и мертвого леса, что составило 91 % для U-Net и 86 % для DeepLabv3+ в соответствии с представленной наземной истиной. Однако, несмотря на достигнутые результаты, следует отметить, что представленные модели не являются идеальными и существует потенциал для дальнейшего улучшения их производительностей.

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

Список источников

1. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of Fir Trees (*Abies Sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sensing*. 2019, 11, 643, doi:10.3390/rs11060643.
2. Zółkoś K., Kukwa M., Afranowicz-Cieślak R. Changes in the Epiphytic Lichen Biota in Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) Stands Affected by a Colony of Grey Heron (*Ardea Cinerea*): A Case Study from Northern Poland. *The Lichenologist*. 2013, 45, 815–823, doi:10.1017/S0024282913000558.
3. Hryń W., Czarnecka J., Kitowski I., Bartmiński P., Zubel R. Stress or Help, How Does the Grey Heron *Ardea Cinerea* L. Modify the Vegetation Structure of the Forest Floor? *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2019, 88, doi:10.5586/asbp.3625.
4. Tyukavina A., Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. H., Stehman S. V., Turubanova S., Parker D., Zalles V., Lima A., Kommareddy I. Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022, doi: 10.3389/frsen.2022.825190.
5. Zhang P., Wang Z., Rao Y., Zheng J., Zhang N., Wang D., Zhu J., Fang Y., Gao X. Identification of Pine Wilt Disease Infected Wood Using UAV RGB Imagery and Improved YOLOv5 Models Integrated with Attention Mechanisms. *Forests*. 2023, 14, 588, doi:10.3390/f14030588.
6. Altarez R. D. D., Apan A., Maraseni T. Deep Learning U-Net Classification of Sentinel-1 and 2 Fusions Effectively Demarcates Tropical Montane Forest's Deforestation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023, 29, 100887, doi:10.1016/j.rsase.2022.100887.
7. Вишнеvский В. Птицы Европейской Части России; Тайны нашей планеты; Эксмо, 2011. 272 с. ISBN 978-5-699-47452-3.
8. Iiukhin S. A., Chernov T. S., Polevoy D. V., Fedorenko F. A. A Method for Spatially Weighted Image Brightness Normalization for Face Verification. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*; SPIE, March 15, 2019; Vol. 11041, pp. 312–319.
9. Chen Y., Hao P. Optimal Transform in Perceptually Uniform Color Space and Its Application in Image Retrieval. In *Proceedings of the Proceedings 7th International Conference on Signal Processing, 2004*. *Proceedings. ICSP '04*. 2004; August, 2004; Vol. 2, pp. 1 107–1 110 vol. 2.
10. Reza A. M. Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement. *The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology*. 2004, 38, 35–44, doi:10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82.
11. Dutta A., Zisserman A. The VIA Annotation Software for Images, Audio and Video. In *Proceedings of the Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*; ACM: Nice France, October 15, 2019; pp. 2 276–2 279.
12. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv:1505.04597 [cs]. 2015.

E. V. Matko¹, A.N. Safonova^{1,2}

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: ematko-ki19@stud.sfu-kras.ru, asafonova@sfu-kras.ru

APPLYING DEEP LEARNING TO PREDICT FOREST EXTINCTION RISK FROM GRAY HERON ACTIVITY BASED ON UAV DATA

Abstract. This article discusses modern deep learning methods for solving problems in the field of Earth Remote Sensing (ERS). Of particular interest is the prediction of forest mortality caused by gray heron activity based on UAV data. To achieve this goal, and for comparison, we present the results of training and testing two innovative neural network models: U-Net and Deeplabv3+. We also developed an image preprocessing algorithm and applied it to the original dataset. The results obtained from independent testing of the neural networks have practical value for more effective control and prevention of forest loss.

Keywords: Deep Learning, Forest Doom, Gray Heron, Neural Network, Prediction, UAV

А. Н. Нарыкова, А. С. Плотникова, А. П. Гераськина, Н. Е. Шевченко

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

e-mail: narykovaanna@yandex.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru,

angersgma@gmail.com, neshevchenko@gmail.com

ПОДГОТОВКА ПРЕДИКТОРОВ ДЛЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Аннотация. Целью представленного исследования является выявление наиболее информативных природных факторов, обуславливающих пространственное распределение населения дождевых червей в лесах Северо-Западного Кавказа. Данный этап работы посвящен подготовке пространственных переменных-предикторов для построения регрессионных моделей с помощью алгоритма машинного обучения Random Forest. Для проведения моделирования используется обучающая выборка, основанная на полевых исследованиях авторов в период с 2015 по 2019 гг. На основе архива геопространственных данных и инструментов их обработки облачной платформы *Google Earth Engine* было подготовлено 23 предиктора, включая разносезонные композитные изображения спутника Sentinel-2, морфометрические величины рельефа и др. В целях минимизации мультиколлинеарности и получения более точных результатов моделей регрессии следующий этап работы будет направлен на построение матрицы корреляции.

Ключевые слова: дождевые черви, геопространственное моделирование, данные дистанционного зондирования, Sentinel-2, SRTM, Google Earth Engine

Проблема сохранения лесов и биоразнообразия особенно актуальна в связи с глобальным изменением климата и регулярным антропогенным воздействием на природные экосистемы. Горные леса Кавказа являются рефугиумами биоразнообразия и одним из центров видообразования дождевых червей [1]. Ряд исследователей утверждают, что из-за изменения климатических условий вероятно увеличение численности и биомассы дождевых червей, что может привести к усилению почвенного дыхания и эмиссиям парниковых газов из почвы. Другая группа авторов считает, что дождевые черви могут сыграть ключевую роль в адаптации лесных экосистем к изменению климата. Данное исследование направлено на выявление наиболее значимых факторов, влияющих на распространение видов, морфо-экологических и хорологических групп дождевых червей в лесных экосистемах Северо-Западного Кавказа.

Обучающая выборка основана на собственных полевых данных, которые были собраны в период с 2015 по 2019 гг. Выборка содержит более тысячи географических точек на территории Краснодарского края, республик Адыгея и Карачаево-Черкессии. Геопространственное моделирование будет проведено как для общей численности и биомассы морфо-экологических и хорологических групп, так и для отдельных видов дождевых червей.

Подготовка предикторов и проведение геопространственного анализа реализуется посредством онлайн платформы Google Earth Engine (GEE) [2] ввиду возможности работы с большим массивом архивных спутниковых изображений, климатических, почвенных и других данных, а также использования алгоритмов машинного обучения. На данный момент подготовлен набор из 23 пространственных предикторов, характеризующих биоклиматические и почвенные условия, а также высоту над уровнем моря и другие морфометрические характеристики рельефа (табл. 1).

Таблица 1

Представление используемых предикторов для выявления пространственного распределения сообществ дождевых червей

Классы предикторов	Пространственные переменные	Источник данных
Почвы	Содержание азота в почве; содержание глины; содержание песка; содержание ила; крупные фрагменты в почве	Почвенные характеристики глобального набора данных SoilGrids, пространственное разрешение 250 м [3]
	Типы почв и почвообразующих пород	Почвенная карта РСФСР, масштаб 1 : 2 500 000 [4]
Климат	Среднегодовая температура; среднегодовое количество осадков; сезонность осадков; максимальная температура самого теплого месяца; минимальная температура самого холодного месяца	Набор климатических данных WorldClim, пространственное разрешение 1 км [5]
	Температура в почве на разных глубинах; толщина снежного покрова	Атмосферный реанализ ERA5-Land, пространственное разрешение 9 км [6]
	Данные о снежном покрове, характеризующие процент заснеженности территории (от 0 до 100 %)	MODIS Terra Snow Cover Daily Global, пространственное разрешение 500 м [7]
Растительность	Спектральные каналы спутниковых разносезонных изображений	Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument с 2018 по 2021 гг., пространственное разрешение 10–20 м [8]
Рельеф	Высота над уровнем моря; уклон рельефа; экспозиция склонов	Цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), пространственное разрешение 30 м [9]

Для проведения исследования используются изображения спутника Sentinel-2 с сенсором MSI (Multispectral Instrument), который является частью программы Copernicus Европейского Космического Агентства (в оригинале – European Space Agency) [5]. Во время создания композитов был

применен ряд фильтров, которые применялись к коллекции Sentinel-2: по территории исследования, интересующему временному периоду и облачности (рис. 1).

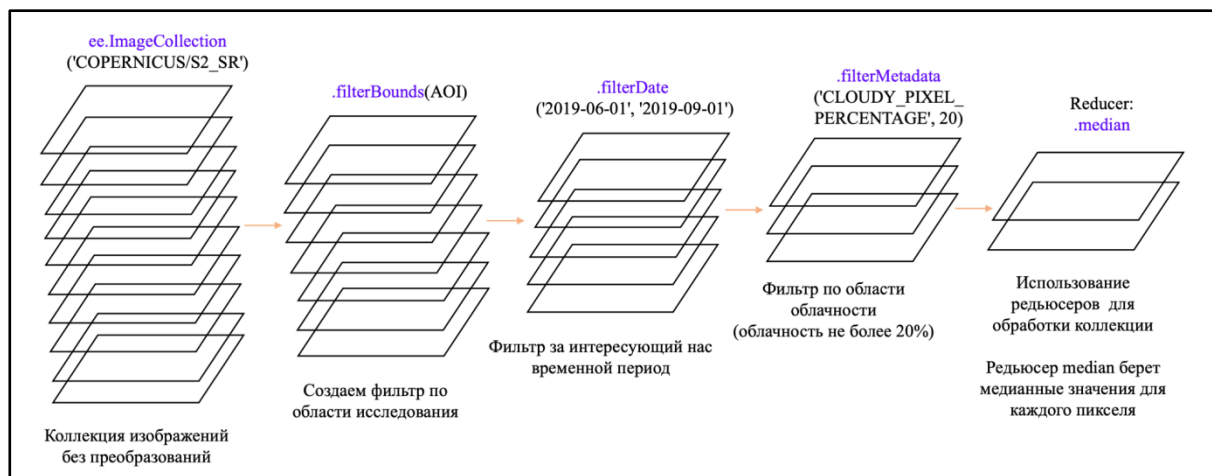


Рис. 1. Преобразование коллекции спутниковых данных Sentinel-2

Важным этапом работы является создание маски для исключения пикселей, находящихся под влиянием облачности и теней. Для этого была создана операция, которая использует канал «QA60» метаданных и функцию *.bitwiseAnd()* для маскирования облачных пикселей. С помощью функции *.map()* данная операция применяется ко всей коллекции снимков Sentinel-2 за разные сезоны года. Стоит отметить, что в процессе обработки коллекции была выявлена проблема высокого процента облачности в зимний период 2019 г., поэтому было решено использовать снимки за 2018–2021 гг. Для всех остальных сезонов года указываются календарные границы времен года.

В качестве источника данных о рельефе используется глобальная цифровая модель рельефа SRTM с пространственным разрешением 30 м. Помимо высоты над уровнем моря вычислены такие морфометрические величины рельефа, как уклон и экспозиция склонов с помощью функций *ee.Terrain.slope()* и *ee.Terrain.aspect()* в GEE.

Таким образом, были подготовлены пространственные предикторы, характеризующие растительный покров и рельеф. Следующим этапом работы является построение матрицы корреляций в целях минимизации проблемы мультиколлинеарности и получения более стабильных результатов геопро пространственного моделирования.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФ № 23-24-00543 «Геопро пространственное моделирование сообществ дождевых червей Северо-Западного Кавказа методами машинного обучения».

Список источников

1. Гераськина А. П., Шевченко Н. Е. Оценка приуроченности морфо-экологических групп дождевых червей (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) к основным типам леса бас-

сейна реки Большая Лаба (Северо-Западный Кавказ) // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. № 1. С. 3–16.

2. Облачная платформа для обработки геопространственных данных Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com/>.

3. Атмосферный реанализ ERA5-Land. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>.

4. Почвенная карта РСФСР / под ред. В. М. Фридланда. Масштаб 1 : 2 500 000. М.: ГУГУК, 1988 (Скорректированная цифровая версия, 2007).

5. Климатическая база данных Worldclim. URL: <https://www.worldclim.org/>.

6. Атмосферный реанализ ERA5-Land. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>.

7. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. // Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 200.

8. Космические снимки Sentinel-2. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>.

9. Цифровая модель Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/>.

A. N. Narykova, A. S. Plotnikova, A. P. Geraskina, N. E. Shevchenko
Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: narykovaanna@yandex.ru, plotnikova-as-cepl@yandex.ru,
angersgma@gmail.com, neshevchenko@gmail.com

PREPARING PREDICTORS FOR GEOSPATIAL MODELING OF EARTHWORM COMMUNITIES IN THE NORTHWESTERN CAUCASUS

Abstract. The aim of this research is to identify the most informative predictors that determine the current distribution of earthworm groups in forest ecosystems of the North-Western Caucasus. This stage of the work is dedicated to preparing spatial predictor variables for building regression models using the Random Forest machine learning algorithm. The modeling is based on a training dataset derived from fieldwork conducted by the authors from 2015 to 2019. We prepared 23 predictors (multi-season composite satellite images from Sentinel-2, morphometric measures of the relief, etc.), using the archive of geospatial data and processing tools of the Google Earth Engine cloud platform. To minimize multicollinearity and obtain more accurate regression model results, the next stage of the work will focus on constructing a correlation matrix.

Keywords: earthworms, geospatial modeling, remote sensing, Sentinel-2, SRTM, Google Earth Engine

А. А. Никитин, И. Л. Цыпышева

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия.
E-mail: aleksandr.nikitin@tinro.ru, irina.tsypysheva@tinro.ru

ТИПИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ И ЕЁ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПЕРИОД 1977–2023 ГГ.

Аннотация. На основе материалов анализа спутниковых ИК- и ТВ-изображений с ИСЗ серии NOAA за 1977–2000 гг. была исправлена и дополнена типизация термической структуры вод Японского моря и продолжена по цифровым данным сканера MODIS/Aqua, Terra с 2000 г. т.е. взаимное расположение холодных вод Приморского течения и теплых вод Цусимского течения, а также фронтов, вихрей, меандров, стримеров и т.д. Анализируются некоторые элементы изменчивости этой структуры.

Ключевые слова: спутниковые ИК- и ТВ-изображения, Японское море, фронты, вихри, меандры, типизация, термическая структура, изменчивость

Введение. Изучение структуры вод относится к одной из основных задач океанографии Японского моря и имеет большое значение в экосистемных исследованиях. Это важно для промысловой океанографии, где изменчивость океанологических характеристик играет важную роль, особенно в области прогнозирования. В последние годы в связи с сезонными и межгодовыми изменениями термического режима вод Японского моря, с появлением новой спутниковой и судовой информации за 2000–2023 гг., появилась настоятельная потребность в детализации типизации и расширении термических условий вод Японского моря, созданной ранее для периода 1977–2000 [1]. А также были рассмотрены основные черты межгодовой и сезонной изменчивости океанологических условий за период 1977–2023 гг.

Материалы и методы. В работе использовался массив спутниковых инфракрасных (ИК) и телевизионных (ТВ) изображений Японского моря за период с 1977 по 2000 гг., сформированных в базу данных на магнитных носителях. В эту базу включены изображения, полученные радиометром высокого разрешения (AVHRR) как в режиме автоматической передачи (АРТ) с пространственным разрешением около 4 км, так и изображения, полученные радиометром высокого разрешения (HRPT) с разрешением 1,1 км в Дальневосточном региональном центре приема и обработки данных (ДВ РЦПОД, г. Хабаровск). С 2000 г. использовались как данные сканера AVHRR спутников NOAA, а также данные сканера MODIS (спутники Aqua и Terra) с пространственным разрешением 1 км в полученные и обработанные в Центре коллективного пользования Регионального

спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (ЦКП). Основные положения методики обработки спутниковых снимков изложены в соответствующих работах [2; 3]. Методика визуализации позволила на основании всех спутниковых данных построить обобщенную схему фронтов Японского моря, на которых представлены как постоянно регистрируемые, так и существующие значительные периоды времени фронты, на которых градиенты температуры превышают $0,03^\circ/\text{км}$ [4]. Под термином термический фронт, или фронтальная зона, подразумеваются районы со значительными горизонтальными градиентами температуры воды, которые выделяются на инфракрасных снимках как зоны со значительными контрастами яркости, а по цифровым данным – по значениям температуры воды [5]. Гидрологические сезоны в Японском море были приняты по классификации [6] с учётом изменчивости вертикальной термической структуры вод: зима (январь – март), весна (апрель – июнь), лето (июль – сентябрь) и осень (октябрь – декабрь).

Несмотря на многообразие типов структуры важно выделить определенные её особенности, по результатам которой предложена типизация термической структуры вод Японского моря, и на фоне этих ситуаций рассмотрены основные черты сезонной и межгодовой изменчивости океанологических условий в рамках указанных лет.

Результаты и обсуждения. Положение и интенсивность ветвей Цусимского и Приморского течений, а также наличие, интенсивность и размеры вихрей в Японском море играют основную роль в межгодовой изменчивости океанологических условий. Основные пути адвекции субтропических вод в северо-западную часть связаны с Восточно-Корейским течением и вихревыми цепочками, расположенными к востоку от 130° в.д. [7]. Наибольшие отклонения в межгодовой изменчивости приходятся на Восточно-Корейское течение, которое в одни годы воды достигает 42° с.ш., а в другие – не далее $37\text{--}38^\circ$ с.ш. В первом случае воды Приморского течения распространяются только до $40\text{--}42^\circ$ с.ш., а во втором – вдоль Корейского полуострова на юг до $37\text{--}38^\circ$ с.ш. [7; 8; 9]. Такая особенность позволила выделить три типа термических условий Японского моря: холодный тип (Х) – с развитым Приморским течением (рис. 1, а), промежуточный (Пр), когда и воды Приморского течения и воды Восточно-Корейского течения проникают примерно до 40° с.ш. (рис. 1, б), и третий тип – теплый тип (Т) – с развитым Восточно-Корейским и Цусимским течениями (рис. 1, в). Условно можно считать, что при первом типе в районе северо-западной части моря, у южного Приморья складываются условия по типу «холодных» лет, при втором – «теплых» лет, а при третьем – промежуточных. Мы говорим «условно», поскольку выделенные типы свидетельствуют лишь о преобладании адвекции либо субтропических вод к северу, либо субарктических к югу. Абсолютные значения температуры поверхности моря могут быть выше или ниже среднемноголетних, и при «теплом» типе по нашей типизации в северо-западной части моря могут отмечаться отрицательные аномалии

температуры или, наоборот, при «холодном» типе – положительные. Кроме выделенных основных трех типов было дополнительно выделено два подтипа: холодный подтип (Ха), когда при сильной адвекции холодного Приморского течения на юг вдоль берегов Кореи и южного Приморья может формироваться теплая область; теплый подтип (Та), когда при значительном развитии Восточно-Корейского течения и, как результат, значительной адвекции тепла на север, вдоль берегов Кореи отмечается узкая, относительно холодная зона. Естественно, что в «чистом» виде эти типы в природе не наблюдаются. Общая картина усложняется вихревой структурой ветвей течений, их меандрированием, а также сезонной и межгодовой изменчивостью условий. В значительной степени тип структуры определяется муссонным климатом. Большое влияние оказывает рельеф дна, а также характер водообмена через три основные пролива. Поэтому конкретная ситуация гидрологических структур в Японском море в значительной степени отличается от предложенной схемы. Для решения некоторых задач промысловой океанографии, связанных с биологическими объектами (изучение изменчивости условий, их прогнозирование, выделение года аналога) такая типизация необходима.

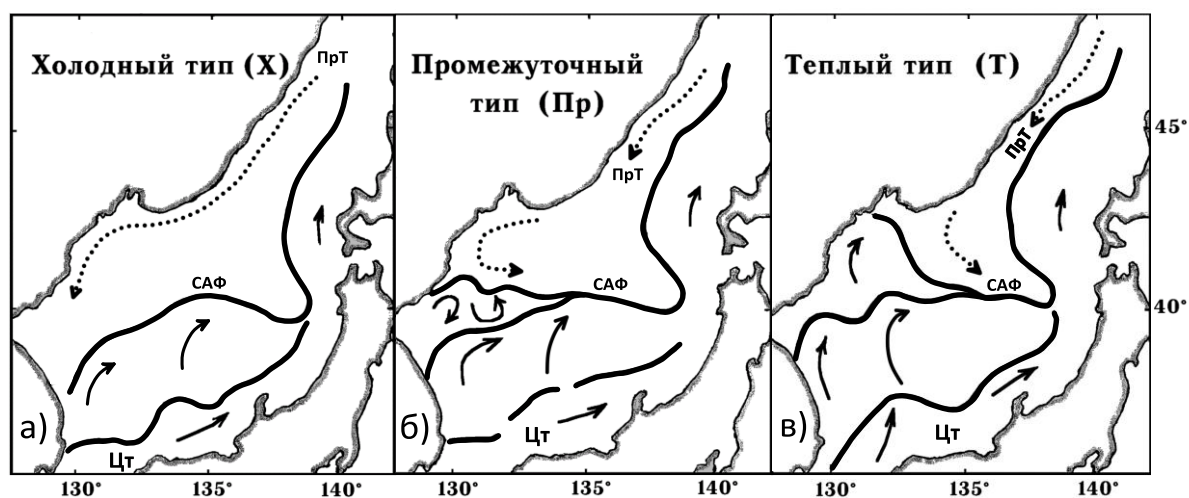


Рис. 1. Схема положения основных фронтов в Японском море (дополненная) [Никитин, Харченко, 2002]. Обозначение: САФ – Субарктический фронт (Полярный); Цт – Цусимское течение; Пр – Приморское течение

Теперь остановимся на факторах, обуславливающих термический режим того или иного сезона. В холодную половину года (зима, весна) в море наблюдается многообразие вихревых образований различных знаков и различных масштабов. Термическая структура моря в этот период хорошо прослеживается, когда основное влияние на термическую структуру моря оказывает адвекция вод. Поэтому различные элементы структуры (фронты, вихри, струи течений) прослеживаются на ИК-снимках довольно хорошо, особенно в весенний и осенний периоды. В теплую половину года (лето и начало осени) за счет радиационного прогрева поверхностного слоя, градиенты температуры воды на

поверхности моря сглаживаются, и на инфракрасных снимках термическая структура прослеживается слабо. В некоторых случаях по отдельным снимкам можно проследить определенные особенности термической структуры и отнести их к определенному типу.

Таким образом, в результате анализа и обработки спутниковых данных, были выделены типы термической структуры моря по сезонам и сведены в общую табл. 1.

Таблица 1

Типизация термической структуры
по сезонам по спутниковой информации в Японском море

N	Сезоны	Тип сезона	Годы
1	Зима	X Ха Пр Т Та	1981, 1983, 1984, 1986, 1988, 2010, 2011, 2013; 1982, 1987; 1991, 2003, 2005, 2006, 2009, 2012, 2014, 2015, 2018; 1985, 1990, 1992, 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2007, 2008, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023; 1979, 1980, 1989, 1994, 2000, 2001, 2002, 2004;
2	Весна	X Ха Пр Т Та	1977, 1981, 1983, 1985, 1987, 1988; 1982, 2010, 2011; 1978, 1991, 2003, 2005, 2009, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 20118, 2020; 1990, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2008, 2019, 2021, 2022, 2023; 1979, 1980, 1984, 1986, 1989, 1992, 1993, 1994, 2000, 2001, 2002, 2004, 2006, 2007;
3	Лето	X Ха Пр Т Та	1986, 1985, 1987; 1982, 1983, 2001; 1990, 1991, 2003, 2004, 2013, 2014, 2015, 2019, 2020; 1980, 1988, 2005, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022, 2023; 1981, 1984, 1989, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2002, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011;
4	Осень	X Ха Пр Т Та	1985; 1982, 1983, 1984, 1987, 2000; 1980, 1981, 1986, 1992, 2002, 2004, 2010, 2013, 2014, 2015, 2019, 2020; 1988, 1989, 1990, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2007, 2008, 2009, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022; 1979, 1991, 1993, 2001, 2003, 2005, 2006, 2011;

Примечание: X – холодный тип; Т – теплый тип; Пр – промежуточный тип; Ха – холодный тип (подтип Ха); Та – теплый тип (подтип Та)

Анализ типов межгодовой изменчивости по всем сезонам в период 1977–2023 гг. показал, что переход (сдвиг) от холодного к теплomu периоду, проявившейся в 1987–1989 гг. наблюдался во всех сезонах. Последствия этой перестройки привело в дальнейшем к значительным изменениям, как в термическом режиме, так и в циркуляции вод, и в целом сказались на биологическом состоянии Японского моря [10]. Далее можно отметить, что после 1989 г. существенных изменений в биоте моря не наблюдалось. Однако незначительные кратковременные сдвиги происходили 2001, 2009–2011 и 2013 гг. [11]. В сезонном аспекте термические условия, относящиеся к определенному типу лет, сохранялись в течение одного-двух сезонов, а в отдельные годы в течение нескольких сезонов или даже в течение всего года и более.

Заключение. С учетом динамики основных течений и положения фронтов в 21 веке была исправлена и дополнена типизация термической структуры вод Японского моря. Выделенные типы термической структуры хорошо отражены в зимне-осенний периоды и связано это в первую очередь с влиянием адвективных факторов. Условное деление на типы свидетельствует о преобладании адвекции либо субтропических вод на север, либо субарктических к югу. Предполагаемый механизм адвекции в первую очередь связан с направлением и мощностью миграционных потоков пелагических рыб (сардина иваси, анчоус, сайра, тихоокеанский кальмар и т.д.), обитающих зимой в южной части Японского моря. Это может являться одним из прогностических признаков при формировании как краткосрочных, так и долго-срочных прогнозов.

Рассмотрены основные черты межгодовой и сезонной изменчивости. Показано, что переломный период (сдвиг или смена), от «холодного» периода к «теплому» приходился на 1988–1989 гг. Незначительные кратковременные сдвиги происходили 2001, 2009–2011 и 2013 гг. В сезонном аспекте термические условия, относящиеся к определенному типу лет, сохранялись в течение одного-двух сезонов, а в отдельные годы в течение нескольких сезонов или даже в течение всего года и более.

Список источников

1. Никитин А. А., Харченко А. М. Типизация термических структур в Японском море и некоторые элементы их изменчивости // Изв. ТИНРО, 2002. № 131. С. 22–40.
2. Булатов Н. В Рекомендации по использованию спутниковых ИК снимков в океанологических исследованиях. Владивосток. ТИНРО. 1984. 43 с.
3. Алексанин А. И., Алексанина М. Г. Мониторинг термических структур поверхности океана по данным ИК-канала спутников NOAA на примере Прикурильского района Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2006. Вып. 3. Том. II. Москва, ООО «Азбука-2000». С. 9–15.
4. Park Kyung-Ae, Chung Jong Yul, and Kim Kuh. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS. 2004. V. 31, L07304, doi: 10.1029/2004GL019424.
6. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.

Гидрометеиздат, 1983. 296 с.

7. Юрасов Г. И. Сезонная изменчивость температуры воды Японского моря // Исследование океанологических полей Тихого и Индийского океанов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 62–69.

8. Никитин А. А., Лобанов В. Б., Данченков М. А. Возможные пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника. Известия ТИНРО. Т. 131. 2002. С. 41–53.

9. Никитин А. А., Харченко А. М. Изменчивость термических фронтов в Японском море по данным ИСЗ. В сб. научн. Трудов ТИНРО «Дистанционные исследования океана» под. ред. Л. Н. Бочарова. 1990. С. 45–54.

10. Onishi M., Ohtani K. Volume transport of the Tsushima warm Current, west Tsugaru Strait bifurcation area. J. Oceanography. 1997. 53. P. 27–34.

11. Зуенко Ю. И., Надточий В. В. Изменения среды в заливе Петра Великого в конце XX века и их последствия для планктона // Материалы конференции по последствиям глобального изменения климата на Дальнем Востоке. Владивосток. 2003. С. 154–171.

12. Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Sergeev A., Tishchenko P., Kaplunenko D., Sagalaev S., Voronin A. Ventilation of the Japan Sea bottom water Abstr. The 6th Program of the East Asian Cooperative Experiments (PEACE), 28–30 November 2012, Nagoya, Japan, 2012. P. 10–14.

A. A. Nikitin, I. L. Tsypysheva

Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia.

e-mail: aleksandr.nikitin@tinro.ru, irina.tsypysheva@tinro.ru

TYPING OF THE THERMAL STRUCTURE OF THE SEA OF JAPANESE WATER AND ITS VARIABILITY ACCORDING TO SATELLITE INFORMATION AND STANDARD SECTIONS 1977–2023

Abstract. On the basis of materials of the analysis satellite IR and TV-images with space of a series NOAA for 1977–2023 is offered typification of thermal structure of waters of the Japanese sea (i.e. positional relationship of fronts, eddeis, meanders, streamers etc.). Some elements of variability of this structure are analyzed.

Keywords: satellite IR and TV-images, Japan Sea, front, eddeis, meander, typification of thermal structure, variability

В. С. Остроумова, Н. Г. Загельский

АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия

АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНОГО ЛЕДОВОГО РЕЖИМА ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМОСЪЕМОК НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА РЕКИ ЕНИСЕЙ

Аннотация. Опасные ледовые явления ограничивают хозяйственную деятельность. Это делает актуальной задачу исследования ледового режима на неизученных территориях. Анализ ледового режима реки Енисей в районе п. Усть-Порт производился по космосъемкам за период с 2000 по 2022 гг. В работе описываются процессы вскрытия и замерзания, приводятся характерные даты ледового режима и размеры льдин, описываются условия протекания ледохода. Представленные результаты иллюстрируют возможность использования космосъемок для описания ледового режима крупных рек.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космоснимки, ледовый режим, ледоход, вскрытие реки, Енисей

Ежегодно наблюдаемые на реках России ледовые явления лимитируют хозяйственную деятельность, определяют условия эксплуатации гидротехнических сооружений и водных путей. От изменения сроков начала и окончания ледостава, размеров льдин, а также проявления таких опасных явлений как заторы или выход льда на пойму зависит продолжительность навигации по открытому руслу и автозимникам. Кроме того, опасные ледовые явления, составляют существенный риск для объектов инфраструктуры.

На широко осваиваемых северных территориях, дальнейшее развитие которых связано с предотвращением рисков влияния опасных явлений на проектируемые объекты, эта проблема осложняется разреженностью наблюдательной сети. Таким образом, становится актуальной задача оценки условий ледового режима на неизученных территориях.

Целью исследования являлась оценка условий ледового режима на участке реки Енисей расположенном в 20 км выше по течению от п. Усть-Порт.

В работе использованы многоканальные оптические космоснимки (КС) со спутников Landsat-4 – Landsat-8 с разрешением 30 метров на пиксель, а также материалы мониторинговых спутников Terra/Aqua MODIS с разрешением 250-1000 метров на пиксель. Анализ снимков для производился для периода с 15 мая по 30 июня и с 1 октября по 15 ноября. Работа осуществлялась в два этапа: первый – оценка размеров льдин и зон возможного выхода ледовых полей на пойму по снимкам Landsat (выполнение работ в сентябре 2021 – январе 2022 гг.) [1], второй – оценка дат и условий замерзания участка реки по снимкам MODIS (февраль – май 2023 гг.) [2].

Со спутников группы Landsat с учетом показательности и облачности был отобран 31 космоснимок за период с 2001 по 2020 гг. Для анализа

использовалась рекомендуемая [3] комбинация «color.infrared», обеспечивающая максимальный контраст между снегом, льдом, водой, растительностью и почвой. Для совместного анализа космоснимков разных лет и топографической основы (ГГЦ, масштаб 1: 50 000) материалы были приведены к единой системе координат.

Ежедневная (при условии допустимой облачности) ледовая обстановка анализировалась по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS методом визуального дешифрирования. Всего проанализировано порядка 250 сцен за период с 2000 по 2022 гг.

Дополнительно для анализа использовались открытые и архивные данные по уровням воды с ближайшего водомерного поста р. Енисей – г. Дудинка, расположенного в 50 км выше по течению от исследуемого участка [4].

В табл. 1 кратко представлены характерные даты ледового режима реки Енисей, определенные в ходе исследования.

Таблица 1

Характерные даты ледового режима реки Енисей выше п. Усть-Порт

Дата	Первые ледовые явления	Ледоход*	Полное очищение ото льда	Первые ледовые явления	Установление ледостава
Средняя	25 мая	2 июня	5 июня	23 октября	30 октября
Ранняя	13 мая	20 мая	21 мая	16 октября	20 октября
Поздняя	1 июня	8 июня	12 июня	5 ноября	8 ноября

*расчёт по 15 годам

Первые ледовые явления в среднем появляются 25 мая и представляют собой закраины у левого берега протоки Леонтьевская (рис. 1), в районе устьев уже свободных ото льда притоков и у островов в основном русле Енисея. Спустя несколько дней происходят первые подвижки, образуются разводья и полыньи. Характерной особенностью этого периода является заполнение льдом русел крупных проток участка и образование пространства чистой воды у правого берега в районе острова Большой Леонтьевский.

Средняя расчётная дата начала ледохода на участке – 2 июня.

В основном ледоход проходит непосредственно в русле реки Енисей. Размеры отдельно плывущих ледовых полей могут достигать 1–2 км по наибольшей стороне. Выход ледохода на пойму на рассматриваемом участке происходит только при половодьях редкой повторяемости. Так ледоход на пойме зафиксирован в 2001 и 2008 гг., когда на водомерном посту г. Дудинка наблюдались максимальные уровни обеспеченностью более 25 %.

Наиболее подвержена ледоходу левая пойма, в которую разгружается протока Леонтьевская. Береговой вал основного русла задерживает особо крупные льдины, однако их части могут попадать на пойму. Размеры наиболее крупных, фактически наблюдаемых на КС, отдельно плывущих

на пойме льдин составляли 150–200 метров в ширину и 200–600 метров в длину (рис. 2). Ледоход на правой пойме зафиксирован не был.

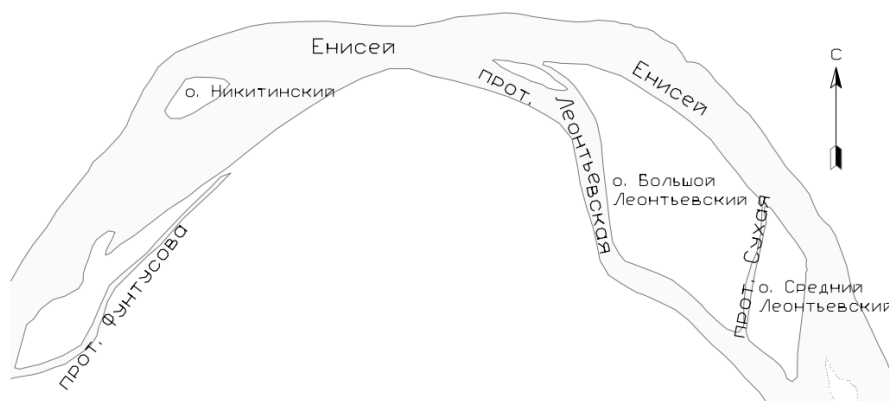


Рис. 1. Схема участка исследования

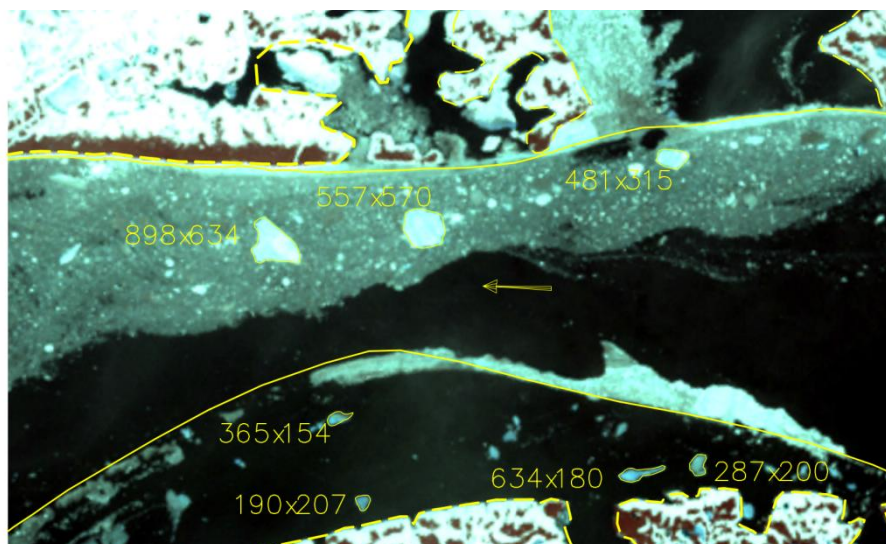


Рис. 2. Ледовая обстановка участка исследования, 04.06.2001, Landsat-7

Полное очищение русла реки Енисей на участке исследований в среднем наблюдается 5 июня. При этом самая ранняя дата очищения ото льда приходится на 21 мая, а наиболее поздняя на 12 июня.

Начало осенних ледовых явлений приходится на третью декаду октября. Процесс замерзания реки на участке исследования характеризуется появлением заберегов в протоках Леонтьевская и Сухая. После замерзания проток в течении нескольких дней на реке устанавливается ледостав. При этом между группой островов Большой и Средний Леонтьевский и правым берегом, а также на участке выше островов в 8 из 22 анализируемых лет фиксировалось образование полыней.

Средняя дата наступления ледостава – 30 октября. Средняя продолжительность ледостава на участке исследования составила 219 суток.

Таким образом, исследуемый участок реки Енисей можно отнести к участкам со спокойным прохождением ледохода. Однако, из-за образования полыней выше по течению, существует риск формирования зазорных и заторных явлений.

Ретроспективный анализ космоснимков позволяет уточнить ледовый режим крупных рек и, таким образом, является очень важным дополнением при натурных наблюдениях на неизученных участках.

Список источников

1. Landsat // EarthExplorer. Washington, 2022. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (access date: 15.01.2022).
2. Aqua/Terra MODIS // Worldview. Washington, 2023. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (access date: 24.05.2023).
3. Р 52.08.874-2018. Определение гидрографических характеристик картографическим способом: рекомендации. СПб., 2018. 169 с.
4. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Новочеркасск, 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 13.05.2023).

V. S. Ostroumova, N. G. Zagelski
JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russia
e-mail: OstroumovaVS1@yandex.ru

LOCAL ICE PROCESSES ANALYSIS OF THE YENISEI RIVER SECTION BASED ON REMOTE-SENSING DATA

Abstract. Business activity limited by hazard ice processes. Thereby ice regime study is important for unexplored area. Analysis of the Yenisei River near Ust-Port was conducted based on remote-sensing data from 2000 to 2022. The paper discusses the break-up and freezing of river processes. It provides the timing of ice regime and ice floe size, ice drift processes was described. The presented results demonstrate the remote-sensing data applicability to study of large rivers ice regime.

Keywords: remote sensing, satellite images, ice regime, ice drift, break-up of river, Yenisei

Е. В. Пикурова¹, В. Б. Кашкин¹, Т. В. Рублева¹, К. В. Симонов²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: vitaelen@gmail.com, rtcvbk@rambler.ru, tvrubleva@mail.ru,

simonovkv50@gmail.com

КАРТИРОВАНИЕ ЭМИССИЙ ДИОКСИДА СЕРЫ В ТРОПОСФЕРЕ ПОЛЯРНЫХ ШИРОТ ПО ДАННЫМ OMPS/SNPP

Аннотация. Работа посвящена изучению эмиссий диоксида серы над Таймырским полуостровом в Арктической и субарктической зоне на основе спутниковых данных OMPS/SNPP. Разработана методика картирования эмиссий диоксида серы в тропосфере. Выполнен анализ эмиссий диоксида серы над г. Норильском весной 2020 г. Приведен пример цифровой карты облака, содержащее диоксид серы, образовавшееся над Норильским районом 28 марта 2020 г. в результате эмиссии диоксида серы в тропосферу. Построенные цифровые карты позволили увидеть общую картину загрязнения тропосферы над исследуемой территорией.

Ключевые слова: космический мониторинг, спутниковые данные, тропосфера, общее содержание озона, диоксид серы, антропогенное загрязнение атмосферы

Введение. Норильский промышленный район, расположенный на территории полуострова Таймыр, относится к территории с экстремальными климато-географическими условиями [1]. Вечная мерзлота, дефицит тепла и замедленное течение обменно-трансформационных процессов в естественных условиях являются причиной неустойчивости природных ландшафтов региона к антропогенному воздействию [2]. Особо остро проблема загрязнения территории техногенными выбросами стоит перед Норильским промышленным районом [3]. Отметим, что на долю Заполярного филиала ГМК приходится 25 % выбросов двуокиси серы (SO₂) от всего объема российской промышленности. Деградация озона здесь может усилить биологические риски, связанные с повышенным УФ облучением подстилающей поверхности и перемещением обедненного озоном воздуха вглубь континента РФ.

Наиболее объективным и независимым методом для контроля за состоянием воздушной среды и распространением основных загрязнителей в *атмосфере* является космический мониторинг. На глобальном и локальном уровне оценка изменения состояния озонового слоя осуществляется с 1978 г. на основе спутниковой информации [4]. Космический мониторинг распределения диоксида серы в атмосфере проводится с 2002 г. [3]. В настоящее время измерения SO₂ осуществляются инструментом OMI (Ozone Monitoring Instrument, спутник Aura, США, 2004) и аппаратурой OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite, спутник SNPP, США) [4, 5].

Целью настоящей работы является изучение эмиссий диоксида серы (SO_2) над Таймырским полуостровом в Арктической и субарктической зоне на основе спутниковых данных OMPS/SNPP.

Аппаратура OMPS/SNPP. Аппаратура OMPS функционирует на космическом аппарате SNPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) с 2011 г. [6]. КА SNPP является низкоорбитальным спутником и движется по солнечно-синхронной полярной орбите высотой ≈ 824 км. Конструктивно OMPS состоит из трех ультрафиолетовых спектрометров LP (Limb Profile), NM (Nadir Mapper) и NP (Nadir Profiler). Общее содержание озона (OCO) и вертикальный профиль O_3 в слое атмосферы определяют с помощью сенсоров NM и NP. Погрешность между данными OMPS и наземными измерениями OCO составляет $\sim 2\%$ [7].

Прибор Nadir Mapper является продолжением серии спектрометров SBUV (Solar Backscattered Ultraviolet), SBUV/2, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) и измеряет уходящее (отраженное и рассеянное) солнечное излучение в УФ диапазоне 300–380 нм со спектральным разрешением 1 нм в надире [8]. Сенсор NM имеет полосу обзора 50×2800 км² поперек движения спутника SNPP и пространственное разрешение 50 км, обеспечивая ежедневное глобальное покрытие от -90° до $+90^\circ$ по широте, частота съёмки – 1 раз в сутки. С помощью спектрометра NM определяется общее содержание озона и диоксида серы в тропосфере. В стратосфере и нижней мезосфере надирные измерения вертикального распределения озона на высотах от 12 км до 60 км в спектральном диапазоне 250–310 нм выполняются сенсором Nadir Profiler [9]. Его ширина полосы обзора составляет 250×250 км², пространственное разрешение 250 км. Третий гиперспектральный спектрометр LP выполняет лимбовые измерения концентрации малых газовых составляющих (мгс) в спектральном диапазоне 290–1 000 нм (UV/VIS/NIR) с разрешением от 0,75 до 25 нм и вертикальном диапазоне 0–80 км с разрешением от 1,9 до 2,5 км [10]. Глобальное покрытие осуществляется за 4 дня. Сенсор имеет разрешение 300 км по горизонтали, полоса обзора составляет 50 км.

Алгоритм восстановления содержания SO_2 в атмосфере основан на методе главных компонент PCA (Principal Component Analysis) с использованием вертикальных модельных профилей озона и диоксида серы, решается обратная задача [5, 11]. Путем варьирования модели минимизируется средний квадрат разности между измеренными и теоретическими параметрами. В результате обработки данных OMPS определяется концентрация SO_2 на 5 высотах 1, 3, 8, 13 и 18 км.

Спутниковые данные. На основе анализа спутниковых данных озона нами разработана методика картирования эмиссий диоксида серы в атмосфере [4]. С учетом [3, 5] введены параметры, определяющие распределение диоксида серы в атмосфере: общее содержание $X(\text{SO}_2)$ и концентрация $N(\text{SO}_2)$. Под общим содержанием $X(\text{SO}_2)$, по аналогии с заданием OCO, понимается толщина слоя диоксида серы в вертикальном столбе атмосферы, выделенного при нормальных условиях (атмосферном

давлении 1 013 гПа и температуре 0°C). Концентрация $N(SO_2)$ – число молекул диоксида серы в вертикальном столбе атмосферы с площадью основания 1 см², выделенном также при нормальных условиях. Для определения общего содержания озона и диоксида серы используются единица Добсона (е.Д. или DU). В атмосфере фоновое значение $SO_2 \leq 1$ е.Д., где 1 е.Д. = $2,69 \cdot 10^{16}$ молекул/см².

Для картирования и анализа эмиссий диоксида серы над г. Норильском использовалась спутниковая база данных [12], в которой содержатся значения $X(SO_2)$ в е.Д. для определенных высот атмосферы, в том числе и для планетарного пограничного слоя (PBL). Отметим, что в [12] над исследуемой территорией значения диоксида серы представлены для временного промежутка от 79 до 270 дней, т. е. с 20 марта по 25 сентября за период 2012–2022 гг. Выполнялась предварительная и статистическая обработка исходной информации. В результате сформирована база данных SO_2 и выполнено цифровое картирование распределения диоксида серы над районом исследования.

Пример цифровой карты распределения SO_2 за 28 марта 2020 г. приведен на рис. 1. Границы исследуемого района: по широте от 68° до 70° с.ш. и долготе от 87° до 90° в.д. Также на рисунке представлена шкала диоксида серы в е.Д., звездочкой показано расположение г. Норильска (69.34° с.ш. и 88.21°). Максимальная концентрация SO_2 в тропосфере в этот день составила 102 е.Д.

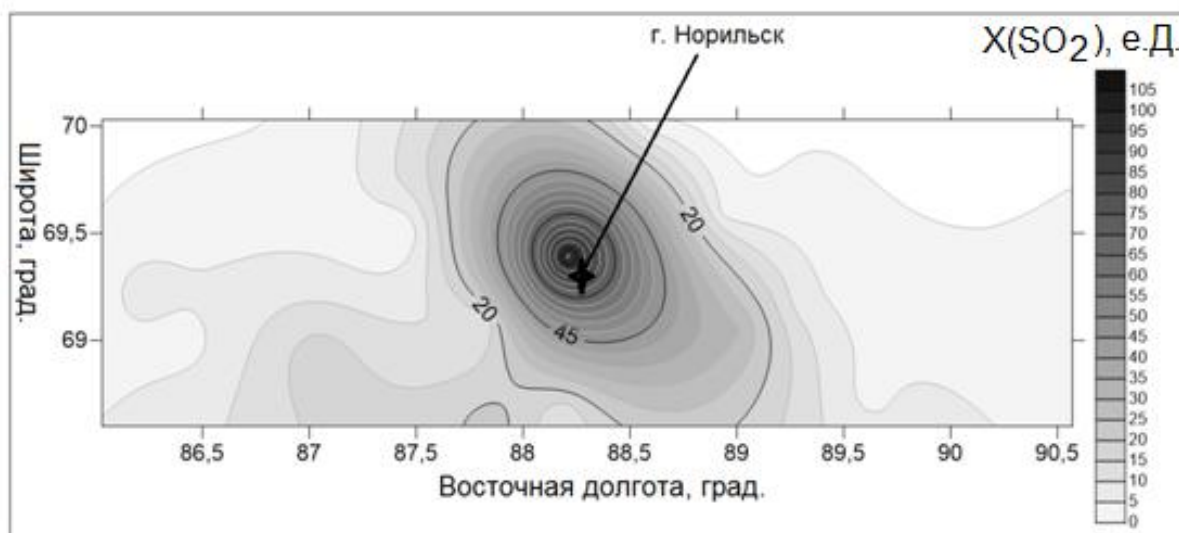


Рис. 1. Облако, содержащее диоксид серы, образовавшееся над Норильским районом 28 марта 2020 г. в результате эмиссии SO_2 в тропосферу

Заметим, что среднее время жизни диоксида серы в атмосфере составляет примерно трое суток. Из анализа спутниковых данных следует, что облако, содержащее повышенные значения концентрации SO_2 , образовавшееся над Норильским районом в результате антропогенной эмиссии SO_2 в тропосферу, просуществовало с 28 по 30 марта 2020 г. Таким обра-

зом, г. Норильск находился в зоне повышенных концентраций диоксида серы в течение трех дней.

Заключение. Спутниковые измерения OMPS/SNPP являются независимыми и объективными источниками информации. Накопленный архив данных является важным материалом для изучения антропогенного воздействия на природную экосистему полуострова Таймыр. Создана методика картирования облаков диоксида серы. Полученные концентрации SO₂ подробно отражают особенности его пространственного распределения. Цифровые карты позволили увидеть общую картину загрязнения тропосферы над исследуемой территорией и изучить направления распространения эмиссий SO₂. Спутниковые данные могут быть использованы для оценки пространственных различий газовых примесей и их сезонных изменений.

Список источников

1. Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Динамика северных экосистем Норильского промышленного района в условиях техногенного воздействия и потепления климата (обзор исследований) / ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 151–170.

2. Телятников М. Ю. и др. Характеристика природных экосистем и основных дестабилизирующих факторов севера Центральной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2014. Т. 21. №. 6. С. 803–806.

3. Зуев Д. В., Кашкин В. Б., Симонов К. В. Использование спутниковых методов мониторинга для оценки экологического состояния северных территорий Красноярского края // Успехи современного естествознания. 2018. №. 2. С. 86–92.

4. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г.. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.

5. Fioletov V. E., McLinden C. A., Krotkov N., Li C., Joiner J., Theys N., Carn S., and Moran M. D. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16, P. 11 497–11 519.

6. Flynn L., Long, C., Wu X., Evans R., Beck C.T., Petropavlovskikh I., et al. Performance of the ozone mapping and profiler suite (OMPS) products // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. № 10. P. 6 181–6 195.

7. Bai K., Liu C., Shi R., Gao W. Comparison of Suomi-NPP OMPS total column ozone with Brewer and Dobson spectrophotometers measurements // Frontiers of Earth Science. 2015. V. 9. P. 369–380.

8. Seftor C.J., Jaross G., Kowitt M., Haken M., Li J., Flynn L.E. Postlaunch performance of the Suomi National Polar orbiting partnership Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) nadir sensors // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. № 7. P. 4 413–4 428.

9. Yang K., Dickerson R. R., Carn S. A., Ge C., Wang J. First observations of SO₂ from the satellite Suomi NPP OMPS: Widespread air pollution events over China // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 4 957–4 962.

10. Jaross G., Bhartia P. K., Chen G., Kowitt M., Haken M., Chen Z., Xu P., Warner J., Kelly T. OMPS Limb Profiler instrument performance assessment // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. № 7. P. 4 399–4 412.

11. Li C., Krotkov N. A., Leonard P. J., Carn S., Joiner J., Spurr R. J., Vasilkov A. Version 2 Ozone Monitoring Instrument SO₂ product (OMSO2 V2): new anthropogenic SO₂

vertical column density dataset // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. № 11. P. 6 175–6 191.

12. https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Suomi_NPP.

E. V. Pikurova¹, V. B. Kashkin¹, T. V. Rubleva¹, K. V. Simonov²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: vitaelen@gmail.com, rtcvbk@rambler.ru, tvrubleva@mail.ru,
simonovkv50@gmail.com

MAPPING OF SULFUR DIOXIDE EMISSIONS IN THE POLAR TROPOSPHERE ACCORDING TO OMPS/SNPP DATA

Abstract. The work is devoted to the study of variations in the total ozone content and sulfur dioxide emissions over the Taimyr Peninsula in the Arctic and subarctic zone based on OMPS/SNPP satellite data. A method for mapping sulfur dioxide emissions in the troposphere has been developed. An analysis of sulfur dioxide emissions over the city of Norilsk in the spring of 2020 was carried out. An example of a digital map of a cloud containing sulfur dioxide formed over the Norilsk region on March 28, 2020 as a result of the emission of sulfur dioxide into the troposphere is given. The constructed digital maps made it possible to see the general picture of troposphere pollution over the study area.

Keywords: space monitoring, satellite data, troposphere, total ozone, sulfur dioxide, anthropogenic atmospheric pollution

Л. А. Пластинин¹, В. П. Ступин¹, В. А. Хамедов^{2,3}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического

приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: irkplast@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КАРТОГРАФО-КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СИБИРИ

Аннотация. Выполнен анализ возможностей использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для идентификации растительного покрова Сибири в интересах картографо-космического мониторинга лесов Сибири. Проанализированы дешифровочные возможности спектральных каналов и их композитов. Получены спектральные кривые разных типов растительности. Выполнена оценка возможностей карт вегетационных индексов для идентификации растительного покрова Сибири.

Ключевые слова: космические снимки, ГИС-анализ, картографирование лесов

Информация спутниковой съемки с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли широко используется при проведении наблюдений за состоянием растительного покрова и оценке степени антропогенной нагрузки территорий регионов. При этом в большинстве случаев используется информация среднего пространственного разрешения с космических аппаратов серии Landsat и Sentinel [1–5]. Актуальность рассматриваемого исследования определяется необходимостью организации картографо-космического мониторинга растительного покрова обширных, труднодоступных и динамичных территорий Сибири.

Целью исследования является методико-технологическое обоснование идентификационных возможностей находящихся в свободном доступе снимков Landsat-8, Sentinel-2 и Sentinel-1 в интересах информационного обеспечения концепции регионального дистанционного картографо-космического мониторинга лесов Сибири. В связи с этим, основной задачей исследования стала отработка методики автоматизированного определения информационных возможностей космических снимков средствами ГИС для выявления и геоинформационного картографирования наличия, состояния и динамики растительного покрова, его нарушения лесными пожарами, вырубками, ветровалами, промышленной и строительной деятельностью.

В основу исследования положены методы геоинформационного моделирования, визуального и компьютерного дешифрирования, анализа

и интерпретации исходных данных и материалов, а также производных от них промежуточных и итоговых ГИС-продуктов.

В процессе исследования были использованы следующие основные исходные и производные данные и материалы:

- спектрзональные снимки и метаданные, полученные КА Landsat-8 (30 м на пиксель), Sentinel-2 (10 м на пиксель) и Sentinel-1 (10 м на пиксель) для визуального изучения, создания композитных и индексных изображений, а также ГИС-анализа в целях идентификации растительного покрова исследуемой территории;

- ЦМР SRTM и ASTER GDEM для топографической и атмосферной коррекции космических снимков, а также для оценки геоморфологической приуроченности и высотного положения исследуемых объектов;

- оцифрованные топографические карты масштаба 1 : 200°000 для определения топографической обусловленности распределения растительного покрова;

- тематические карты и атласы для соотнесения результатов ГИС-анализа с созданными ранее картами природных ландшафтов;

- Интернет-ресурсы, картографические и геоинформационные сервисы, порталы и сайты;

- созданные по спектрзональным снимкам с КА Landsat-8 композитные изображения, спектральные кривые и карты вегетационных индексов.

Исследования проводились в пределах трех широтных лесорастительных зон Сибири, в разной степени подверженных антропогенной нагрузке:

1. Западно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги (участок № 6) зоны притундровых лесов и редкостойной тайги.

2. Средне-Сибирский плоскогорный таежный район (участок № 1), Среднеангарский таежный район (участок № 2), Алтае-Саянский горно-таежный район (участок № 3) и Западно-Сибирский средне-таежный равнинный район (участок № 5) таежной зоны.

3. Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район (участок № 4) лесостепной зоны.

На рис. 1 представлена схема расположения исследуемых ключевых участков. Для территорий участков № 1–3 были созданы композиты космических снимков, полученных сенсорами OLI (Landsat-8) и MSI (Sentinel-2) в синем, зеленом, красном, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах спектра, для территорий участков № 4–6 были созданы композиты космических снимков, полученных сенсором OLI (Landsat-8) и радиолокационного прибора SAR (Sentinel-1).

По снимкам разных каналов были построены спектральные графики типичных представителей растительного покрова территорий исследуемых ключевых участков: хвойных лесов, лиственных лесов, вырубок, гарей, болот, открытой воды.

Совместно с созданием спектрональных композитов на ключевые участки были составлены индексные изображения DVI, NDVI, NRVI, TVI, CTVI, SAVI и RVI [6] и выполнен анализ этих изображений на предмет степени их применимости в интересах картографо-космического мониторинга и картографирования лесов исследуемых территорий.



Рис. 1. Схема расположения исследуемых ключевых участков

Визуальный и ГИС-анализ космических снимков в интересах идентификации распространения, состава и состояния лесов Сибири лучше всего выполнять по композитам в ложных цветах (каналы 5–7 сенсора OLI Landsat-8), которые в силу специфики отображения компонентов растительного покрова (лесной растительности, вырубок, гарей) в разных диапазонах электромагнитного спектра информативнее изображений в натуральных цветах (каналы 2–4).

Характер спектральных кривых для разных типов и состояний растительного покрова существенно изменяется в зависимости от длины волны. Отмечается тенденция уменьшения отражательной способности растительности в синем и красном диапазонах спектра и к увеличению в красном, и особенно в ближнем инфракрасном, диапазонах. Количественные

показатели изменения полученных спектральных графиков позволяют выполнить идентификацию типов растительного покрова с учетом топографических и почвенных эффектов.

Slope-based вегетационные индексы наиболее просты в использовании и дают числовые результаты, которые легко интерпретировать. Наиболее предпочтительным из них является NDVI, поскольку он в наилучшей степени способен минимизировать топографические эффекты в процессе идентификации растительности [1]. В то же время следует отметить, что все slope-based индексы не способны свести к минимуму фоновые эффекты почвы. Несмотря на большое количество вегетационных индексов, используемых в настоящее время, среди них пока нет ни одного универсального, который был бы одинаково хорош при применении в идентификации разных типов растительного покрова в разных географических условиях.

Интерпретация индексных карт выполнялась экспертным способом с опорой на описательные и картографические материалы, полученные на территории эталонных участков. При этом, в ряде случаев были получены неоднозначные результаты. Неоднозначность интерпретации сходных по NDVI ареалов растительности разных типов возникает вследствие эффектов рельефа и почв, а также ограниченности диапазона градаций яркостей шкалы NDVI (от -1 до $+1$). Более тонкую градацию яркостей и, соответственно, более дробную градацию типов растительного покрова можно получить, применив, например, индекс DVI (NIR-R), который будучи безразмерным, может принимать практически любые значения в пределах 16-битного радиометрического диапазона снимков Landsat-8. В качестве дополнительного критерия идентификации служит приуроченность (локация) выявленных ареалов растительности к разным типам рельефа.

Проведенный анализ исходных и полученных данных и материалов дистанционного зондирования Земли из космоса показал, что они позволяют создать систему идентификационных признаков для разных типов растительного покрова в интересах регионального картографо-космического мониторинга и картографирования лесов Сибири. Качество полученных результатов существенно повышается при опоре на надежные данные по ключевым участкам (эталонам) дешифрирования и другую дополнительную информацию.

Дальнейшие направления и перспективы исследования видятся в анализе разносезонных изображений, в частности для разделения хвойных и лиственных лесов, изучении многолетних рядов снимков для выявления динамики нарушенности и восстановления растительных сообществ (вырубок, гарей, ветровалов, болезней, зарастания и т. д.), изучении закономерностей оптической генерализации снимков, а также в получении количественных показателей.

Список источников

1. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко [и др.]; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). М.: Институт космических исследований Российской академии наук, 2016. 208 с. ISBN 978-5-00015-006-1. EDN YOBJAV.
2. Аксенов Д. Е. Космические снимки для задач лесного хозяйства / Д. Е. Аксенов, А. Ю. Ярошенко // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2009. № 1. С. 10–15. EDN MТIAУВ.
3. Пластинин Л. А. Картографо-космический мониторинг природных и антропогенных процессов и явлений Байкальского региона / Л. А. Пластинин, В. П. Ступин, Б. Н. Олзоев // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 1, № 2. С. 178–184. DOI 10.33764/2618-981X-2019-1-2-178-184. EDN IУННNQ.
4. Концепция и программа создания цифровых специализированных топографических карт сибирской зоны Арктики (Таймыр-Путорана) / Л. А. Пластинин, А. Н. Зализнюк, В. П. Ступин [и др.] // Тематические карты и атласы: современные концепции научного содержания, новые технологии создания и использования: материалы XI международной научной конференции по тематической картографии, Иркутск, 28 ноября – 02 2022 года. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. С. 193–194. EDN ZTRMTO.
5. Клевцов Е. В. Космический мониторинг таежных геосистем Байкальского региона / Е. В. Клевцов, А. В. Коптев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11(58). С. 63–67. EDN ОКВІТН.
6. Хамедов В. А. Применение радарных данных Sentinel-1 для оценки состояния растительного покрова / В. А. Хамедов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года / науч. ред. Е. А. Ваганов, отв. редактор Г. М. Цибульский. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. С. 155–158. EDN FAHVVQ.

L. A. Plastinin¹, V. P. Stupin¹, V. A. Khamedov^{2,3}

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

³ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: irkplast@mail.ru

METHODOLOGY AND METHODOLOGICAL RATIONALE CARTOGRAPHIC AND SPACE MONITORING VEGETATION COVER OF SIBERIA

Abstract. An analysis of the possibilities of using Earth remote sensing data from space to identify the vegetation cover of Siberia in the interests of cartographic and space monitoring of Siberian forests has been carried out. The decoding capabilities of spectral channels and their composites are analyzed. Spectral curves of different types of vegetation have been obtained. An assessment of the possibilities of maps of vegetation indices for identifying the vegetation cover of Siberia was carried out.

Keywords: remote sensing data, GIS-analysis, mapping forest

Е. И. Пономарёв^{1,2}, А. Н. Забродин^{2,3}, Е. Г. Швецов¹

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия
e-mail: evg@ksc.krasn.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В СВЯЗИ С РОСТОМ ПРЯМЫХ ПОЖАРНЫХ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация. Исследована динамика интенсивности пожаров растительности в Сибири за 2002–2022 гг. по данным спутникового мониторинга. На основе рядов мощности теплоизлучения пожаров (Fire Radiative Power) выявлен положительный тренд высокоинтенсивных пожаров на ~30 % территории Сибири и Арктики. Удельные эмиссии высокоинтенсивных пожаров повысились с 15,4 до 38,8 т С/га. При прогнозируемом на 2022–2027 гг. объёме ~325 Тг С/год, пожарная составляющая эмиссий парниковых газов в РФ достигает 5–20 %. Регулярная повторяемость экстремальных пожарных эмиссий позволит рассматривать часть лесов Сибири как источник углерода.

Ключевые слова: спутниковые данные, пожар растительности, мощность теплоизлучения, интенсивность, пожарные эмиссии

На территории Сибири фиксируется устойчивый рост числа и площадей пожаров растительности [1]. Вероятно, следует ожидать формирование качественно новых пожарных режимов региона в ближайшей перспективе. Как следствие, прогнозируется увеличение пожарных эмиссий углеродосодержащих соединений в атмосферу. В меняющемся климате в регионе тренд роста эмиссий дополнительно будет обусловлен повышением интенсивности пожаров. В современных оценках показана широкая вариативность годового поглощения углерода лесами Сибири в пределах от 200 до 700 Тг С/год [2; 3; 4]. При этом, с начала 2000-ых гг. ежегодные пожарные эмиссии углерода для территории Сибири фиксировались на уровне ~100–150 Тг С/год [5] и до >500 Тг С/год – по завышенным оценкам [6]. Можно ожидать, что дальнейший рост эмиссий от пожаров может быть причиной перехода таёжных лесов Сибири из стока атмосферного углерода в источник.

Для оценки пожарных эмиссий используют мультипликативное соотношение Сейлера-Крутцена [7]. Как показывает практика, достоверные оценки и прогноз эмиссий от пожаров растительности не могут быть получены без учёта энергетических характеристик и интенсивности горения, как параметра, определяющего удельные эмиссии с единицы площади. Инст-

рументальная оценка интенсивности горения возможна на основе спутникового мониторинга с применением технологии Fire Radiative Power (FRP) [8].

В данной работе рассмотрены характеристики пожаров на территории Сибири за период 2002–2022 гг. по материалам банка пожаров, реализованного на основе спутникового мониторинга в ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, Россия). Значения FRP доступны в стандартных продуктах каталога данных со спутников Terra и Aqua – MOD14/MYD14, коллекции 6 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>, дата обращения 01.07.2023).

Пороговым методом выполнялась классификация «пожарных» пикселей с выделением категорий интенсивности горения (рис. 1). Пороговые значения, разделяющие категории интенсивности, определяли из статистических данных – среднее по полигону пожара FRP_{cp} и стандартное отклонение (σ) [9]. Суммарные эмиссии определяли по модернизированному [9] соотношению Сейлера-Крутцена с учётом интенсивности горения:

$$C = CE \times \sum Si (FRP) \times \beta_i (FRP) \times Bi (FRP),$$

где C – прямые эмиссии углерода (г); $Si (FRP)$ – суммарная площадь пожаров (m^2), представленная как сумма площадей фаз пожара с учётом интенсивности горения; коэффициент полноты сгорания $\beta_i (FRP)$; $Bi (FRP)$ – запас растительных горючих материалов ($кг/m^2$), CE – коэффициент пересчёта массы сгоревших материалов в чистый углерод (г/кг). Входные параметры рассматривались, как функции от мощности теплоизлучения (FRP) для каждого i -го участка пожара.

Получены следующие результаты. Для территории Сибири на временном интервале 2002–2022 гг. выявлена тенденция роста доли пожаров высокой интенсивности в терминах FRP. Усреднение по двум последним десятилетиям позволяет говорить, что площади высокоинтенсивных пожаров возросли в три раза с $0,63 \pm 0,31$ млн га/год (за период 2002–2011 гг.) до $1,70 \pm 0,49$ млн га/год в 2012–2019 гг. и до $2,5 \pm 0,92$ в 2020–2021 гг. Значительное перераспределение наблюдается между площадями пожаров с низкой интенсивностью и высокоинтенсивным горением в сторону последних. Интерполяция на регулярной сети с ячейкой $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ суммарной интенсивности горения (рис. 1) демонстрирует в период 2013–2022 гг. значительный рост FRP на ~30 % территории Сибири. Зона роста интенсивности локализуется севернее 60° с.ш. преимущественно в ареале произрастания лиственничных (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) лесов и редколесий. Кроме того, интенсивность имеет тенденцию роста в зоне тундры ($>67^\circ$ с.ш.), которая потенциально может дать значительную аддитивную добавку в годовой выход эмиссий от пожаров, как это было зафиксировано в сезон экстремальной горимости Арктики в 2020 году [10].

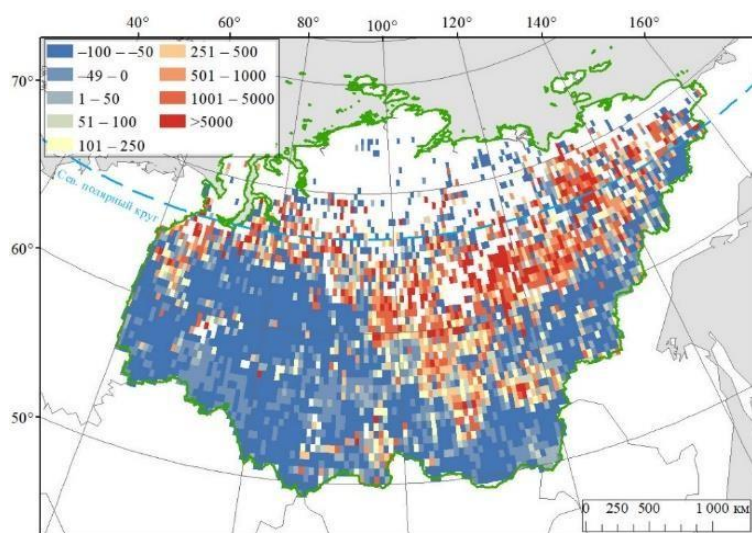


Рис. 1. Изменение суммарных значений FRP (в %) для пожаров Сибири за период 2013–2022 гг. по отношению к 2002–2012 гг. Интерполяция выполнена в ячейках регулярной сети размером $0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$

Ранее было показано [8], что участки пожаров в Сибири низко-, средней высокоинтенсивного горения имеют характерные удельные значения эмиссий с единицы площади $\sim 8,7$, $12,0$ и $15,4$ т С/га, соответственно. Решение для временного интервала 2020–2022 гг. даёт эти характеристики в диапазоне $10,0$, $14,5$ и $38,8$ т С/га, соответственно. Среднемноголетний уровень пожарных эмиссий увеличился с $60,0 \pm 25,8$ Тг/год в 2002–2011 гг. до $137,0 \pm 60,0$ Тг/год в 2012–2019 гг. и до $296,0 \pm 102,0$ Тг/год в последние три сезона 2020–2022 гг. Можно заключить, что в последнее десятилетие 2012–2022 г. объём пожарных эмиссий определяется не только увеличением площадей пожаров растительности, но и ростом значений удельных эмиссий в условиях повышения интенсивности пожаров. В целом, в интегральном объёме эмиссий парниковых газов в РФ, который оценивается в $1\,584$ Тг С/год [11], пожарная составляющая может достигать от 5 % в сезоны низкой горимости до 20 % в экстремальные сезоны, как это продемонстрировано в 2020, 2021 гг. (~ 350 Тг/год). В перспективе известных климатических сценариев регулярная повторяемость экстремальных эмиссий позволит говорить о части лесов Сибири, как об источнике углерода в будущем.

Работа выполнена по темам № 0287-2021-0008 (ИЛ СО РАН) и FWES-2022-0001 (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Список источников

1. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. # 50(11). P. 1 953–1 974. doi: 10.1007/s13280-020-01490-x.
2. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Честных О. В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // *Вопросы лесной науки*. 2018. Т. 1(1). С. 1–24.

3. Сергиенко В. Г. Влияние ожидаемого изменения климата на баланс углерода и продуктивность экосистем в лесном секторе Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2018. № 1. С. 74–90. doi: 10.21178/2079–6080.2018.1.74.
4. Ваганов Е. А., Порфирьев Б. Н., Широков А. А., Колпаков А. Ю., Пыжёв А. И. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 109–119.
5. Ponomarev E. I., Yakimov N. D., Ponomareva T. V., Yakubailik O.E., Conard S. G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. Vol. 12(5). 559. doi: 10.3390/atmos12050559.
6. Soja A. J., Cofer W. R., Shugart H. H., Sukhinin A. I., Stackhouse Jr. P. W., McRae D. J., Conard S. G. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998–2002) // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. P. 1–22.
7. Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. № 2. P. 207–247.
8. Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г., Харук В. И. Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология, 2018. № 6. С. 1–8.
9. Пономарёв Е. И. Способ расчёта прямых пожарных эмиссий углерода с учётом пороговой классификации интенсивности пожара растительности по спутниковым съёмкам в ИК диапазоне // Патент на изобретение. RU 2755936 C1. 2021. 7 с.
10. Conard S. G., Ponomarev E. I. Fire in the North – The 2020 Siberian Fire Season // Wildfire. 2020. 29.4. P. 26–32.
11. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года // Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021. № 3052-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111010022>.

E. I. Ponomarev^{1,2}, A. N. Zabrodin^{2,3}, E. G. Shvetsov¹

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Federal Research Center “Krasnoyarsk Science center SB RAS”, Krasnoyarsk, e-mail: evg@ksc.krasn.ru

SATELLITE MONITORING OF VEGETATION FIRE INTENSITY IN RELATION TO RISING OF DIRECT FIRE EMISSIONS OF CARBON

Abstract. The dynamics of Siberian fire intensity has been performed based on satellite monitoring data for 2002–2022. Using the Fire Radiative Power (FRP) technique, a positive trend of high-intensity fires was revealed on ~30 % of Siberia and Arctic zone. Specific emissions of high intensity fires increased from 15.4 to 38.8 t C/ha. With the forecast of ~325 Tg C/year for 2022–2027, Siberian fires are responsible for 5–20 % of the greenhouse gas emissions of Russia. Regular occurrence of extreme fire emissions will turn part of Siberian forests into a source of carbon.

Keywords: satellite data, vegetation fire, fire radiation power, intensity, direct fire emissions

**К. В. Раевич¹, Е. И. Герасимова¹,
И. В. Зеньков¹, Чинь ле Хунг², Б. И. Нефёдов³**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам

³ Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru , egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ США ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования состояния открытых горных работ на угольных месторождениях Монтана, Вайоминг, Северная Дакота в США. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлено количество горных и транспортных машин, работающих в угольных карьерах, а также определен годовой объем экскавации вскрышных пород и угля на территории каждого штата. По результатам спутниковой съемки выявлен тренд в увеличении объемов открытой угледобычи на исследуемой территории США.

Ключевые слова: Соединенные штаты Америки, угольные месторождения, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, дистанционное зондирование Земли

Введение. В структуре мировой добычи угля одно из лидирующих мест принадлежит Соединенным штатам Америки. Основной объем добычи угля открытым способом сконцентрирован в трех штатах (Монтана, Вайоминг и Северная Дакота) в центральной части Североамериканского континента. Изучение экономической географии и основ мировой экономики всегда было связано с изучением размещения производительных сил в мировом формате, важнейшей частью которых является топливно-энергетический комплекс. Изучать мировые центры горной промышленности можно по информации, представляемой в научной литературе, в интернет-источниках. При этом степень достоверности фактического состояния той или иной отрасли горной промышленности будет существенно различаться.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Монтана. На территории штата Монтана мы выделили три центра открытой угледобычи с координатами на местности $45^{\circ} 46' 59''$ с.ш. и $107^{\circ} 02' 27''$ з.д., $45^{\circ} 51' 30''$ с.ш. и $106^{\circ} 52' 16''$ з.д., $45^{\circ} 05' 15''$ с.ш. и $106^{\circ} 52' 16''$ з.д. По снимкам из космоса установлено, что угольные пласты мощностью до 25 м залегают горизонтально или с небольшими углами наклона в пределах $2-3^{\circ}$. Толща горных пород, покрывающих

угольные пласты, состоит из двух слоев: верхний слой рыхлых отложений из горных пород четвертичного возраста, представленных глинами, суглинками, песками и др., имеет мощность до 15 м. Между этим слоем и угольным пластом находятся крепкие песчаники мощностью до 40 м, перед выемкой которых необходимо их рыхление с использованием буровзрывного способа. Отметим, что горно-геологическое строение угольных месторождений в двух других штатах отличается от вышеописанного в сторону увеличения мощности толщи вскрышных пород.

Добыча угля производится в 12 карьерах. Суммарная протяженность фронта добычных работ составляет 37 500 м. Выемка угольного пласта производится блоками протяженностью от 600 до 900 м. Половина выемочных блоков находится в затопленном состоянии. В карьерах с небольшой протяженностью фронта горных работ перемещение горной массы производят в карьерных автосамосвалах грузоподъемностью до 360 т. В карьерах, где расстояние между флангами более 2 км на вскрышных работах используют драглайны на перевалке пород выработанное пространство карьера.

Драглайны вскрывают угольный пласт шириной до 90 м за одну заходку. Мехлопаты с канатным приводом рабочего оборудования и гидравлические экскаваторы с емкостью ковша в диапазоне 30–40 м³ работают на выемке вскрышных пород в торцах карьера и на экскавации той толщи вскрышных пород, которая по технологическим параметрам не входит в вертикальную зону работы драглайнов. Аналогичными экскаваторами производится выемка угля одним уступом. В угольных карьерах в этом штате на транспортировке угля используют углевозы с донной разгрузкой грузоподъемностью 260 т и классические автосамосвалы грузоподъемностью до 360 т. Фрагмент выполнения вскрышных работ на опережающем уступе и добычных работ показан на рис. 1.

На рис. 1 в кольце красного цвета мехлопата отгружает песчаники из развала, созданного взрывными работами. Высота забоя экскаватора не менее 20 м. Кольцами оранжевого цвета обведены автосамосвалы грузоподъемностью 240 т,двигающиеся на погрузку к экскаватору. В кольце синего цвета поливочная машина с емкостью водяного бака 80 м³ через четыре форсунки производит увлажнение технологической автодороги. В кольцах зеленого цвета находятся бульдозеры Caterpillar D11T со сферическими отвалами. Ниже уровня установки вскрышной мехлопаты по вертикали геологического строения месторождения находится слой крепких песчаников серого цвета, покрывающий угольный пласт. Этот слой впоследствии после его рыхления буровзрывным способом будет перевален в выработанное пространство карьера драглайном.

В нижней части рис. 1 в кольце желтого цвета мехлопата с емкостью ковша 40 м³ отгружает уголь из развала в автосамосвал грузоподъемностью 360 т. Высота добычного экскаваторного забоя не менее 22 м.



Рис. 1. Фрагмент космоснимка вскрышных и добычных работ в угольном карьере на территории штата «Монтана» (США)

Направление движения экскаваторов в ходе отработки вскрышного и добычного уступа показано на рис. 1 стрелками. В кольце белого цвета находится погрузчик на автомобильном шасси для выемки нижней пачки угля и недоборов от мехлопаты в приоткосной части экскаваторного забоя.

Расстояние транспортировки угля до пяти стационарных углепогрузочных складов и до тепловой станции с четырьмя энергоблоками общей мощностью 2 600 МВт составляет 3–3,5 км. Уголь отгружают в железнодорожные составы из трех мощных магистральных тепловозов (два в голове состава и один в хвосте) и 114 вагонов. Общая масса угля в составе 9 000 т. Одновременная погрузка составов может производиться на пяти территориально рассредоточенных складах, оборудованных накопительными емкостями силосного типа. Железнодорожные пути, уложенные вдоль силосных башен, имеют в плане форму петли, что обеспечивает непрерывную подачу поездов под погрузку и их сквозное движение. Все это способствует наивысшей производительности погрузочно-транспортных работ и достижению максимальных логистических показателей железнодорожного транспорта.

В угольных карьерах работает следующий парк горнотранспортного оборудования: 10 буровых станков, 9 драглайнов с ковшем емкостью 100 м³ и длиной стрелы 100 м, 11 гусеничных одноковшовых карьерных экскаваторов с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м³, 27 углевозов и 38 карьерных автосамосвалов. На выемке угля используют 6 погрузчиков на автомобильном шасси с емкостью ковша 20 м³. По нашей оценке технологически и технически возможный суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Монтана составляет 85 млн. т. Годовой объем вскрышных работ выполняется в объеме не менее 195 млн. т.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Вайоминг. На территории штата Вайоминг добыча угля производится в 25 карьерах в полосе шириной 16–25 км и протяженностью с севера на юг 115 км с координатами вершин на местности 44° 29' 36" с.ш. и 105° 36' 38" з.д., 44° 29' 48" с.ш. и 105° 23' 45" з.д., 43° 26' 22" с.ш. и 105° 25' 48" з.д., 43° 26' 45" с.ш. и 105° 07' 57" з.д. Рельеф местности, на которой производится разработка угольных месторождений пологий с высотными отметками в диапазоне 1 250–1 500 м.

Суммарная протяженность фронта добычных работ составляет 79 320 м. Выемка угольного пласта производится блоками протяженностью от 670 до 1 800 м. В одном из карьеров протяженность фронта работ по добычному уступу составляет 14,5 км. Менее половины выемочных блоков находится в затопленном состоянии. Горные работы в карьерах этого штата производятся по аналогии их производства в штате Монтана. В карьерах с небольшой протяженностью фронта горных работ перемещение вскрышных пород и угля производят карьерными автосамосвалами грузоподъемностью до 360 т и в автоуглевозах грузоподъемностью 240 т. В карьерах, где расстояние между флангами более 1,5 км на вскрышных работах используют драглайны с длиной стрелы 100 м и емкостью ковша 100 м³ для перевалки пород в выработанное пространство карьера.

Рассмотрим технологические аспекты производства вскрышных работ в одном из угольных карьеров на территории штата Вайоминг (рис. 2).

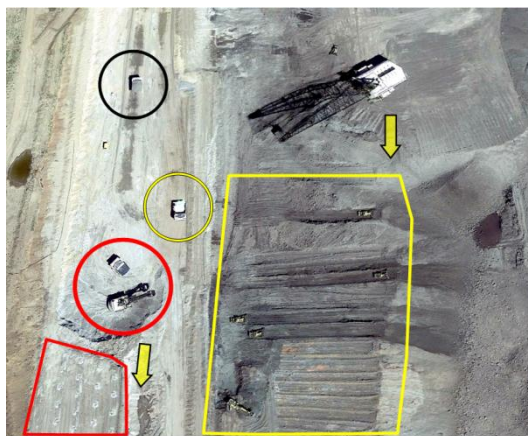


Рис. 2. Фрагмент космоснимка горных работ по вскрытию угольного пласта в карьере на территории штата «Вайоминг» (США)

В левой части рисунка мы видим горнотранспортное оборудование, работающее на передовом вскрышном уступе. В момент получения снимка из космоса мехлопата (в кольце красного цвета) находится с поднятой рукоятью с полным ковшом в ожидании порожнего автосамосвала. К экскаватору под погрузку задним ходом двигается автосамосвал (в этом же кольце). В кольце желтого цвета находится порожний автосамосвал. Грузеный автосамосвал,двигающийся в направлении породного отвала, обведен кольцом черного цвета. На снимке хорошо видно, что мехлопата в ближайшие часы закончит экскавацию развала. По ходу ее движения в секторе находится взрывной блок. Взрывные скважины пробурены по диагональной сетке с размерами 10×12 м. Устья взрывных скважин обведены линией красного цвета. В правой части рисунка в секторе, обведенном линией желтого цвета, работают четыре бульдозера Caterpillar D11T со сферическими отвалами и один гидравлический экскаватор типа «обратная лопата» на понижении высоты развала вскрышных пород после взрывных работ.

Направление движения экскаватора, установленного на отработке вскрышного уступа, и драглайна показано на рис. 2 стрелками.

Расстояние транспортировки угля до 16 стационарных углепогрузочных складов и до трех тепловых станций с шестью энергоблоками общей мощностью 1 500 МВт составляет 4–5,5 км. Уголь отгружают в железнодорожные составы общей грузоподъемностью 9 000 т. Одновременная погрузка составов может производиться на 16 территориально рассредоточенных складах, оборудованных накопительными емкостями силосного типа.

В угольных карьерах работает следующий парк горнотранспортного оборудования: буровые станки – 35 ед., драглайны с емкостью ковша 100 м^3 и длиной стрелы 100 м – 15 ед., гусеничные одноковшовые карьерные экскаваторы с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м^3 – 68 ед., углевозы – 12 ед. и 376 карьерных автосамосвалов. На выемке угля в секторах его недобора мехлопатами используют 12 погрузчиков на автомобильном шасси с емкостью ковша 20 м^3 . По нашей оценке технологически и технически возможный суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Вайоминг составляет 290 млн. т. При этом годовой объем вскрышных работ должен составлять не менее 610 млн. т.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Северная Дакота. На территории штата Северная Дакота выделено шесть центров открытой угледобычи и переработки угля с координатами на местности $47^\circ 20' 10''$ с.ш. и $101^\circ 50' 05''$ з.д., $47^\circ 25' 46''$ с.ш. и $101^\circ 44' 53''$ з.д., $47^\circ 20' 30''$ с.ш. и $101^\circ 13' 45''$ з.д., $47^\circ 28' 17''$ с.ш. и $101^\circ 04' 36''$ з.д., $47^\circ 11' 27''$ с.ш. и $101^\circ 50' 58''$ з.д., $47^\circ 05' 22''$ с.ш. и $101^\circ 20' 11''$ з.д. Отметим, что практически весь добытый уголь на территории этого штата перерабатывается на месте. По данным спутниковой съемки выявлено 8 угольных карьеров с общей протяженностью фронта работ по добычному уступу 18 800 м. В непосредственной близости от угольных карьеров производят выработку электрической энергии 4 тепловые станции с установленной мощностью энергоблоков не менее 2 000 МВт. Рядом с электростанциями работают два химических завода по выпуску минеральных удобрений с разной годовой мощностью, запитанных с электростанций. Внешним потребителям уголь отгружают в железнодорожные составы на одном стационарном складе, оборудованном силосными накопительными емкостями.

В технологиях открытой разработки угольных месторождений используют аналогичное горнотранспортное оборудование, на котором базируется открытая разработка месторождений угля в штатах Монтана и Вайоминг. В угольных карьерах на территории штата Северная Дакота работает такой парк горнотранспортного оборудования: 9 буровых станков, 8 драглайнов с емкостью ковша 100 м^3 и длиной стрелы 100 м, 25 гусеничных одноковшовых карьерных экскаваторов с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м^3 , 28 углевозов и 58 карьерных автосамосвалов. На выемке угля используют 4 погрузчика на автомобильном шасси с емкостью ковша

20 м³. По нашей оценке технологически и технически достижимый суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Северная Дакота находится на уровне 70 млн. т. При этом годовой объем вскрышных работ должен быть не менее 145 млн. т.

Как показал обзор архива космоснимков, на исследуемых территориях выявлено четырехкратное увеличение масштаба добычи угля открытым способом за последние 30 лет.

Заключение. По результатам спутниковой съемки, как средства объективного контроля, освобожденного от субъективистских оценок, определен технологически и технически достижимый уровень производственных мощностей по добыче угля в трех штатах США – Монтана, Вайоминг и Северная Дакота. По нашей оценке, общий объем добычи угля в карьерах на территории этих штатов исходя из технологий производства горных работ и производительности горной техники находится на уровне 445 млн. т в год. При этом необходимо обеспечить объем вскрышных работ на уровне 950 млн. т. Вместе с тем фактический объем добычи угля будет регламентироваться рыночным спросом.

Исследование проведено в рамках международного сотрудничества в области расширения сферы использования технологий дистанционного зондирования Земли.

Список источников

1. URL: <https://earth.google.com>.

K. V. Raevich¹, E. I. Gerasimova¹,
I. V. Zenkov¹, Chin Le Hung², B. I. Nefyodov³

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Technical University. Le Quy Don, Hanoi, Vietnam

³ Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru, egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

STUDY OF OPEN MINING IN COAL DEPOSITS IN THE CENTRAL PART OF THE USA FROM REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents the results of a study of the state of open mining in the coal fields of Montana, Wyoming, North Dakota in the USA. During remote monitoring and analytical calculations, the number of mining and transport vehicles operating in coal pits was identified, as well as the annual volume of overburden and coal excavation in each state was determined. According to the results of satellite imagery, a trend was revealed in an increase in the volume of open-pit coal mining in the study area of the United States.

Keywords: *United States of America, coal deposits, open pits, annual coal production, mining and transport vehicles, remote sensing of the Earth*

**К. В. Раевич¹, Е. И. Герасимова¹,
И. В. Зеньков¹, Чинь ле Хунг², Б. И. Нефёдов³**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам

³ Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru , egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ И ТЕПЛОВЫХ СТАНЦИЙ КАНАДЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угольных разрезов и тепловых станций в Канаде. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлено количество горных и транспортных машин, работающих в угольных карьерах, а также определен годовой объем экскавации вскрышных пород и угля. По результатам спутниковой съемки выявлен тренд в сокращении доли угольной генерации электрической энергии.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс Канады, угольные месторождения, угольные карьеры, дистанционное зондирование Земли, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины

Введение. В структуре энергетической отрасли Канады угольная генерация по разным информационным источникам занимает одно из последних мест. По некоторым интернет-источникам в стране в последние годы наметилось устойчивое движение к сокращению количества тепловых угольных станций. По данным спутниковой съемки основной объем добычи угля открытым способом сконцентрирован в южных частях двух провинций Альберта и Саскачеван. Изучение экономической географии любого государства связано с исследованием размещения производительных сил и выделением основных объектов топливно-энергетического комплекса.

Исследование производственной деятельности объектов топливно-энергетического комплекса (угольная генерация) на территории Канады. По данным дистанционного зондирования добыча угля открытым способом осуществляется в двух провинциях Альберта и Саскачеван. Открытые горные работы на угольных месторождениях масштабно производились с конца 1960-х, начала 1970-х гг. В настоящее время в этих провинциях угольная генерация электрической энергии на восьми тепловых станциях осуществляется за счет деятельности 12 угольных разрезов.

На территории провинции Альберта в 60 км на запад, в 47 и 50 км на юго-запад от г. Эдмонта работают три тепловые станции с установленной суммарной мощностью энергоблоков 3200 МВт. Общая протяженность фронта горных работ на четырех угольных разрезах составляет 9,5 км. В строении месторождений угольные пласты мощностью до 12 м имеют горизонтальное залегание. Мощность покрывающих угольные пласты вскрышных горных пород находится в диапазоне 60–90 м. Отметим, что горно-геологическое строение разрабатываемых открытым способом угольных месторождений предполагает использование технологий разработки с установкой на вскрышных работах драглайнов с длиной стрелы 100 м и емкостью ковша 100 м³. Эти машины отработывают вскрышные уступы мощностью до 50 м с укладкой в выработанное пространство карьера. Ширина вскрышных заходок 65–70 м, небольшая мощность угольных пластов, конструктивные параметры драглайнов позволяют размещать вскрышные породы во внутренних отвалах без переэкскавации. Весь объем угля и вскрышных пород, находящихся выше уступа, разрабатываемого драглайном, отработывают мехлопатами с емкостью ковша 40 м³ и гидравлическими экскаваторами с емкостью ковша 12 м³. На транспортировке угля используют углевозы с донной разгрузкой грузоподъемностью 180 т, а на транспортировке вскрышных пород – автосамосвалы грузоподъемностью 240–360 т.

На юго-восток от г. Эдмонта в 136 км работает одна тепловая станция и два угольных разреза и в 248 км еще одна станция, уголь для которой добывают в трех угольных разрезах. Общая мощность двух тепловых станций 1 800 МВт. Общая протяженность добычных уступов в карьерах составляет 10,5 км. В провинции Саскачеван в его южной части, практически на границе с США работают три угольные тепловые электростанции. Два угольных разреза находятся на северо-восток в 11 км от поселка энергетиков Коронак, а тепловая станция мощностью 800 МВт – в 6 км на юго-восток [1]. Взаиморасположение объектов ТЭК на исследуемой местности показано на рис. 1.

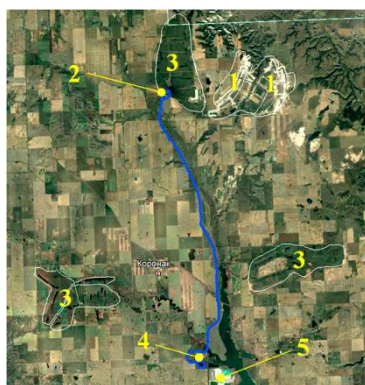


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с расположением объектов ТЭК вблизи пос. Куранак на юге провинции Саскачеван на территории Канады: 1 – карьерные поля действующих угольных разрезов; 2 – поверхностный угольный склад для отгрузки угля в железнодорожные составы; 3 – отработанные карьерные поля; 4 – тепловая станция; 5 – золошлаковый накопитель

Вскрышные работы производят драглайнами. На отработке угольных пластов установлены мехлопаты с емкостью ковша 20 м^3 . На транспортировке угля из забоев используют углевозы грузоподъемностью 180 т. В этом звене (угольные разрезы – тепловая станция) весь добытый уголь доставляют на поверхностный склад, расположенный на запад от карьеров. К этому складу подведена однопутная железная дорога. Уголь со склада отгружают в железнодорожный состав из одного магистрального тепловоза и 24 вагонов. Общая масса транспортируемого угля в составе 2 400 т. Контур железной дороги протяженностью 20 км показан на рисунке линией синего цвета. Вдоль прикарьерного угольного склада и склада угля на тепловой станции движение поезда организовано по петлевой схеме без смены направления движения. Перепад высотных отметок между конечными пунктами составляет 40 м.

В южной части этой же провинции в 185 км на восток от пос. Куранак и на запад в 415 км от г. Виннипега находится г. Эстеван, вблизи которого более 60 лет работают две тепловые станции суммарной мощностью 1 700 МВт и три угольных разреза. Общая протяженность добычных работ равна 8,7 км. На одном из разрезов уголь добывают для внутреннего потребления в других провинциях Канады. Вскрышные работы производят с использованием драглайнов, а угольный пласт обрабатывают фронтальными погрузчиками на автомобильном шасси и гидравлическими экскаваторами. Транспортировку угля производят в углевозах и автосамосвалах грузоподъемностью 160–180 т.

Всего по данным спутниковой съемки на исследуемой территории Канады на вскрышных и добычных работах в угольных карьерах установлены 16 драглайнов с длиной стрелы 100 м и емкостью ковша 100 м^3 , четыре мехлопаты с емкостью ковша $20\text{--}40 \text{ м}^3$, девять гидравлических экскаваторов с емкостью ковша 12 м^3 и шесть фронтальных погрузчиков на автомобильном шасси с емкостью ковша 16 м^3 . На транспортировке вскрышных пород и угля задействованы 32 углевоза с донной разгрузкой грузоподъемностью 180 т и 38 карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 180–360 т. В одном звене ТЭК поверхностную логистику угля обслуживает один тепловоз (аналог российского ТЭМ-7) и 24 железнодорожных вагона грузоподъемностью 100 т каждый. Это горнотранспортное оборудование по нашим расчетам обеспечивает годовой объем вскрышных работ на уровне 490 млн. т и объем добычи угля не менее 40 млн т.

Отметим, что на территории Канады по данным дистанционного мониторинга в 2007, 2016 и в 2018 г. установлен вывод из эксплуатации трех тепловых станций на участках, прилегающих к озерам Онтарио, Уобамун, Эри, с координатами соответственно $43^\circ 34' 32'' \text{с.ш.}$ и $79^\circ 33' 27'' \text{з.д.}$, $53^\circ 33' 30'' \text{с.ш.}$ и $114^\circ 29' 17'' \text{з.д.}$, $42^\circ 47' 53'' \text{с.ш.}$ и $80^\circ 03' 06'' \text{з.д.}$ По данным спутниковой съемки линии электропередач, идущие от тепловых станций, включенных в план наших исследований, охватывают территорию центральной части Канады – крупные и мелкие населенные пункты. Тепловые

станции расположены таким образом, что протяженность ЛЭП не превышает 500 км до самого отдаленного населенного пункта.

Заключение. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольных карьерах в двух провинциях Канады (Альберта и Саскачеван), технологический объем вскрышных работ и объем добычи угля, который необходим для работы восьми тепловых станций. По нашей оценке, добыча угля в карьерах на территории этих провинций характеризуется большими коэффициентами вскрыши на уровне 12 т/т. Исходя из спроса со стороны тепловых станций на энергетический уголь, применяемых технологий производства горных работ и производительности горной техники, объем перерабатываемой горной массы (вскрышные породы и уголь) находится на уровне 530 млн. т. В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории Канады наблюдается понижающийся тренд в объемах угольной генерации электрической энергии.

Исследование проведено в рамках международного сотрудничества в области расширения сферы использования технологий дистанционного зондирования Земли.

Список источников

1. URL: <https://earth.google.com>.

K. V. Raevich¹, E. I. Gerasimova¹,
I. V. Zenkov¹, Chin Le Hung², B. I. Nefyodov³

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Technical University. Le Quy Don, Hanoi, Vietnam

³ Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru, egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

STUDY OF THE DYNAMICS AND PERFORMANCE INDICATORS OF COAL PITS AND THERMAL STATIONS IN CANADA ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents the results of a study of the activities of coal mines and thermal power plants in Canada. In the course of remote monitoring and analytical calculations, the number of mining and transport vehicles operating in coal pits was revealed, and the annual volume of overburden and coal excavation was determined. According to the results of satellite imagery, a trend in the reduction of the share of coal-fired electricity generation was revealed.

Keywords: *Canada's fuel and energy complex, coal deposits, open pits, remote sensing of the Earth, annual coal production, mining and transport vehicles*

**К. В. Раевич¹, Е. И. Герасимова¹,
И. В. Зеньков¹, Чинь ле Хунг², Б. И. Нефёдов³**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам

³ Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru , egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

УГОЛЬНЫЕ РАЗРЕЗЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОЙ СУМАТРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ. ТЕХНОЛОГИИ И КОМПЛЕКСНАЯ МЕХАНИЗАЦИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угольных карьеров на территории Южной Суматры. В ходе обработки спутниковых снимков выявлено количество горнотранспортного оборудования, задействованного на открытых горных работах на угольных месторождениях, а по результатам аналитических расчетов установлен годовой объем добычи угля и вскрышных работ. Определены показатели сухопутной логистики угольных потоков от мест добычи угля до морских угольных терминалов.

Ключевые слова: Южная Суматра, угольные месторождения, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, экспорт угля, дистанционное зондирование Земли

Введение. В Юго-Восточной Азии в настоящее время весьма мощным угледобывающим потенциалом обладает Индонезия, занимающая по праву одно из лидирующих положений по открытой угледобыче не только в этом регионе, но и в мировом энергетическом пространстве. Основные производственные мощности по добыче угля находятся на восточном побережье острова Калимантан и примерно 10 % от общего объема приходится на остров Суматра. По данным спутниковой съемки основной объем добычи угля открытым способом на этом острове сконцентрирован в одной провинции Южная Суматра. Изучение современного состояния угледобывающей промышленности в масштабах мировой экономики предполагает включение в план исследований всех без исключения территорий с размещением отраслевых предприятий. Проведение исследовательских работ в этом направлении на территории острова Суматра является актуальным в плане получения новых знаний об угольных карьерах, работающих в зоне экваториальных лесов. Наш коллектив в исследованиях пользуется результатами научно-технического прогресса в области космических технологий дистанционного зондирования Земли из космоса.

Исследование технологических аспектов угольных разрезов на территории Южной Суматры. По данным дистанционного зондиро-

вания добыча угля открытым способом осуществляется на острове с середины 1970-х гг., а масштабная разработка месторождений угля производится с середины 2000-х гг. [1]. По нашей оценке объем угля 35 млн. т ежегодно отправляют на экспорт, а 24 млн. т угля сжигают на одиннадцати тепловых электростанциях, расположенных в разных частях острова. Практически весь уголь добывают открытым способом в провинции Южная Суматра в многоугольнике с координатами вершин в точках $3^{\circ} 43' 31''$ ю.ш. и $103^{\circ} 33' 12''$ в.д., $3^{\circ} 40' 12''$ ю.ш. и $103^{\circ} 40' 05''$ в.д., $3^{\circ} 44' 11''$ ю.ш. и $103^{\circ} 51' 16''$ в.д., $3^{\circ} 47' 47''$ ю.ш. и $103^{\circ} 51' 24''$ в.д., $3^{\circ} 53' 06''$ ю.ш. и $103^{\circ} 48' 40''$ в.д., $3^{\circ} 53' 38''$ ю.ш. и $103^{\circ} 41' 25''$ в.д., $3^{\circ} 51' 59''$ ю.ш. и $103^{\circ} 35' 59''$ в.д. В исследуемом секторе находятся три сельских поселения *Lahat*, *Muara Enim* и *Tandjung*. Вблизи поселений возделывают значительные по площади пальмовые плантации. Угледобывающие предприятия работают в полном компромиссе с местным населением, что подтверждается приведением нарушенных земель (породных отвалов) практически в первоначальное состояние с высадкой пальмовых деревьев на поверхности отвалов общей площадью 4 200 га [1].

Отметим, что собственниками карьеров в период до 2017 г. на выемке небольшого объема вскрышных пород и угля были задействованы роторные экскаваторы (российские аналоги ЭР-1600) в комплексе с конвейерным транспортом и отвалообразователями на породных отвалах. В настоящее время горные работы производят с использованием только экскаваторно-автомобильных комплексов в двух комбинациях. На выемке горных пород используют гидравлические экскаваторы с емкостью ковша 4 м^3 и 12 м^3 . Первые работают в комплексе с автосамосвалами общего назначения грузоподъемностью 30 т и колесной формулой 6×4 , а последние – с карьерными автосамосвалами грузоподъемностью 60–90 т [1].

В настоящее время на угленасыщенных участках месторождений работает 28 карьеров с различной протяженностью фронта горных работ и концентрацией горнотранспортного оборудования. Общая протяженность фронта горных работ по нижнему добычному уступу равна 14 760 м [1]. Горно-геологическое строение угольных пластов при горизонтальной мощности до 150 м характеризуется вертикальным или крутонаклонным расположением в толще вмещающих пород. Мощность покрывающих угольные пласты вскрышных горных пород находится в диапазоне 15–25 м. Такое расположение пластов в недрах обуславливает постоянную углубку горных работ и размещение вскрышных пород во внешние отвалы.

По данным спутниковой съемки при разработке участков месторождений в карьерах отмечается высокая концентрация горных и транспортных машин (см. рис. 1). В границах разрабатываемого участка размером 600×680 м в работе находятся 23 гидравлических экскаватора и 44 автосамосвала. На участке производится разработка трех крутонаклонных угольных пластов с суммарной горизонтальной мощностью 160 м. Отметим, что на о. Суматра в открытой разработке угля буровзрывной способ подготовки горных пород к выемке не используют. Расстояние транспортировки

вскрышных пород до внешних отвалов находится в диапазоне от 1,5 до 3 км. Вскрышные породы укладывают также на место отработанных угольных пластов. В этом случае вскрытие пластов производят капитальными траншеями внешнего заложения на глубину до 30 м. Далее вскрывающую трассу располагают на временно нерабочем борту карьера, противоположный борт карьера находится в разноске. По мере отработки запасов угля рабочий борт карьера устанавливают во временно нерабочее положение с одновременным переносом и обустройством вскрывающей трассы на него, а горные работы переносят на противоположный борт. Глубина карьеров после прекращения работ по добыче угля не превышает 180 м. По нашей оценке конечная глубина карьеров регламентируется устойчивостью бортов карьера в условиях влажного экваториального климата с количеством осадков 1 800 мм в год.



Рис. 1. Фрагмент космоснимка открытых горных работ на угленасыщенном участке месторождения с тремя мощными пластами крутонаклонного залегания

Весь объем угля, добываемый в исследуемых границах, концентрируется на двух стационарных поверхностных складах, которые расположены между карьерами [1]. На склады уголь поступает по конвейерам общей протяженностью 15,8 км. К каждому складу подведены железнодорожные пути в виде петли, что обеспечивает сквозное движение составов из 60 вагонов и двух тепловозов в голове состава. Уголь доставляют к терминалам,

находящимся на правом берегу р. *Musi*, где его отгружают в балкеры-сухогрузы грузоподъемностью до 10 000 т. Далее суда с помощью буксиров двигаются к месту впадения реки в море и вдоль береговой линии до тепловых электростанций. Объем экспортного угля направляют по железной дороге на крупный морской терминал, находящийся в бухте южнее г. *Bandar Lampung* [1].

Также уголь в объеме 2 млн. т в год добывают западнее населенного пункта *Kulu* в провинции *Aceh*. Весь объем добытого угля транспортируют на расстояние 16 км до расходного склада на морском берегу для погрузки в баржи класса река-море грузоподъемностью 10 тыс. т.

Всего по данным спутниковой съемки на исследуемой территории Южной Суматры на вскрышных и добычных работах в угольных карьерах задействовано следующее горнотранспортное оборудование: 253 гидравлических экскаватора типа «обратная лопата» с емкостью ковша 4 м³, 36 и 69 гидравлических экскаваторов с емкостью ковша 12 м³ соответственно «прямая лопата» и «обратная лопата», 896 автосамосвалов грузоподъемностью 30 т и 469 карьерных автосамосвала грузоподъемностью 60–90 т. В состав автотранспортного парка входит 162 шарнирно-сочлененных автосамосвала повышенной проходимости грузоподъемностью 30 т. В последние годы около половины этого парка находится в резерве. По нашим расчетам парк горных и транспортных машин, находящийся в работе в карьерах, может технологически обеспечить годовой объем вскрышных работ на уровне 380 млн. т и объем добычи угля не менее 59 млн. т. Из этого объема 24 млн. т угля сжигают на тепловых электростанциях, составляющих основу топливно-энергетического комплекса острова, а остальной объем отправляют на экспорт.

Заключение. Итоги научно-исследовательской работы, посвященной исследованию производственной деятельности угольных карьеров в Юго-Восточной Азии на территории острова Суматра, обозначили весьма значимое присутствие предприятий недропользования, развивающихся параллельно с не менее масштабным сектором экономики, как туризм. Горно-геологическое строение месторождений угля, используемые технологии открытых горных работ и количественный состав горнотранспортного оборудования позволяют обеспечить объем добычи угля на уровне 59 млн. т в год. Результаты дистанционного мониторинга территории Южной Суматры высвечивают стабильный тренд в ежегодно добываемых объемах добычи угля открытым способом.

Исследование проведено в рамках международного сотрудничества в области расширения сферы использования технологий дистанционного зондирования Земли.

Список источников

1. URL: <https://earth.google.com>.

K. V. Raevich¹, E. I. Gerasimova¹,
I. V. Zenkov¹, Chin Le Hung², B. I. Nefyodov³

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Technical University. Le Quy Don, Hanoi, Vietnam

³ Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: kshatrova@sfu-kras.ru, egerasimova@sfu-kras.ru, izenkov@sfu-kras.ru

COAL SECTIONS ON THE TERRITORY OF SOUTH SUMATRA ACCORDING TO SATELLITE IMAGE DATA. TECHNOLOGIES AND INTEGRATED MECHANIZATION OF OPEN MINING

Abstract. The article presents the results of a study of the activities of coal pits in South Sumatra. During the processing of satellite images, the number of mining and transport equipment involved in open-cast mining at coal deposits was revealed, and based on the results of analytical calculations, the annual volume of coal production and stripping was established. The indicators of land logistics of coal flows from coal mining sites to sea coal terminals are determined.

Keywords: South Sumatra, coal deposits, open pits, annual coal production, mining and transport vehicles, coal export, remote sensing of the Earth

**А. Н. Романов, И. В. Хвостов,
Д. Н. Трошкин, И. В. Рябинин, Д. А. Романов**
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
e-mail: romanov_alt@mail.ru

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСА

Аннотация. Обсуждается новый подход к дистанционному микроволновому мониторингу лесов, основанный на учете радиального градиента температуры в стволе живого дерева, а также фазового состава и диэлектрических характеристик древесной воды. Описаны некоторые закономерности поведения диэлектрических характеристик веток живого дерева. Установлены зависимости показателей преломления и поглощения веток сосны и березы от объемной влажности (W). Исследована сезонная динамика радиоярких температур лесного массива (Алтайский край).

Ключевые слова: лес, диэлектрические свойства, радиояркая температура, микроволновое зондирование, спутник SMOS

Леса оказывают большое влияние на условия жизнедеятельности человека на планете, поддерживают экологический баланс, влияют на глобальный углеродный цикл. Деревья чувствительны к различным природным факторам (сезонность, гидрологические и климатические изменения, лесные пожары, засухи, подтопления, наводнения) и антропогенным воздействиям на экосистемы (загрязнение воздуха, кислотные дожди, деградация почвы). Состояние леса контролируют с помощью традиционных наземных методов и дистанционного зондирования в разных диапазонах электромагнитных волн [1].

Для оценки экологического состояния лесов, своевременного выявления опасностей и угроз используют спутниковые измерения радиоярких температур ($T_{\text{я}}$) в микроволновом диапазоне на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях [2]. Значения $T_{\text{я}}$ леса зависят от температуры деревьев (кроны, стволов), биомассы и содержания воды в дереве, температуры и влажности лесной подстилки и нижележащей почвы, оказывающих влияние на их диэлектрические и радиоизлучательные характеристики.

В [3–5] приведены модели микроволнового излучения леса, учитывающие диэлектрические и радиоизлучательные свойства лесной подстилки, почвы, древесины, хвои, листьев. В [6] показано, что в зависимости от сезона в ветках живых деревьев существует 2 или 3 категории воды с разными диэлектрическими характеристиками. Соответственно, микроволновое излучение леса будет зависеть от фазового состава и диэлектрических свойств древесной влаги.

На рис. 1 приведена сезонная динамика $T_{ян}$ (1), $T_{яв}$ (2), T (3) для Приобского бора (Алтайский край), основными породами деревьев которого являются береза, сосна, осина. $T_{ян}$, $T_{яв}$ определяли по данным спутника SMOS (продукт L1C), привязанным к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (размер ячейки 16 км, площадь 195 км²). На графике выделяются 4 периода с разным поведением $T_{я}$, связанным с переходом температуры окружающей среды через 0°C, а также фенологией растительности (в частности, с облиственением и осыпанием листьев).

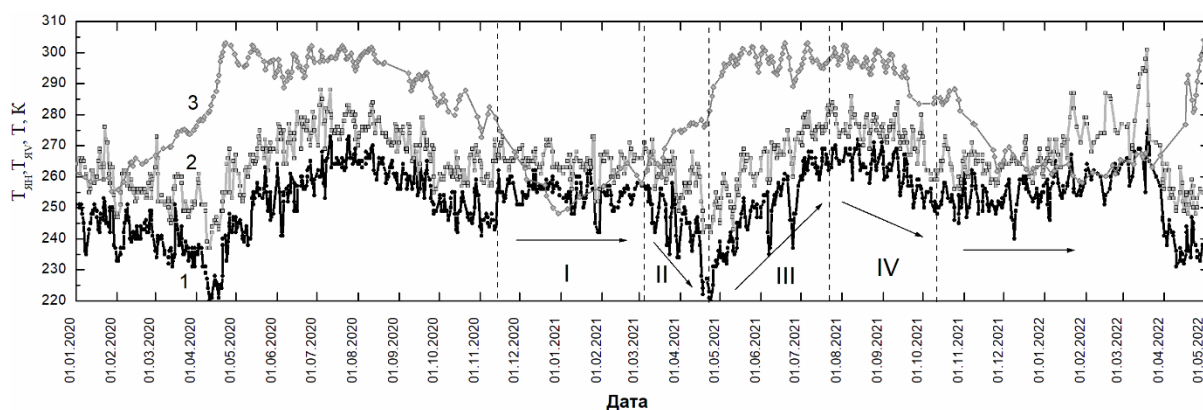


Рис. 1. Сезонная динамика $T_{ян}$ (1), $T_{яв}$ (2), T (3) для Приобского бора (Алтайский край), I–IV – периоды с разным поведением $T_{ян}$, $T_{яв}$

T определяли по данным MODIS (с разрешением 1 км). Алгоритмы MODIS основаны на сканировании восходящего излучения с длиной волны 10–12 мкм. Поэтому T относится к поверхностным слоям подстилающей поверхности. В то же время известно, что в стволе дерева существует радиальный градиент T , достигающий 10–12°C [7] (рис. 2). Соответственно, реальные значения T в дереве могут заметно отличаться от T (MODIS).

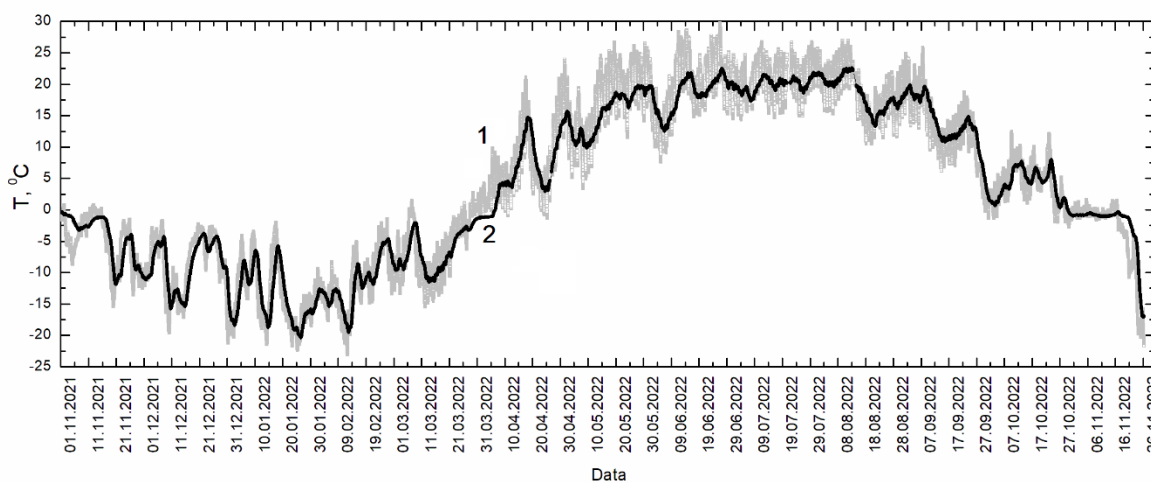


Рис. 2. Вариации T на поверхности (1) и внутри (2) (15 см) ствола (сосна)

$T_{ян}$ и $T_{яв}$ также зависят от диэлектрических характеристик воды, присутствующей в живом дереве. В лабораторном эксперименте измеряли

показатели преломления (n) и поглощения (κ) свежесрезанных веток, хвои, листьев сосны и березы при разных значениях W (описание лабораторной установки, диэлектрических измерений, алгоритма расчета n , κ разных категорий древесной воды приведены в [6]). Величины n , κ связаны с действительной (ϵ'), мнимой (ϵ'') частями комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ) соотношениями: $\epsilon = \epsilon' + i \times \epsilon''$, $(\epsilon)^{1/2} = n + i \times \kappa$, $\epsilon' = n^2 - \kappa^2$, $\epsilon'' = 2n\kappa$. Объемная влажность $W = (\rho_{\text{влаж}}/\rho_{\text{воды}}) \times W_M [\text{см}^3/\text{см}^3]$, где $W_M = M_{\text{воды}}/M$ [г/г] – массовая влажность, $M = M_{\text{сух}} + M_{\text{воды}}$, M , $M_{\text{сух}}$, $M_{\text{воды}}$ – массы влажной, сухой древесины и воды; $\rho_{\text{влаж}} = 0.45 \pm 0.05 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{воды}} = 1 \text{ г/см}^3$ – плотности влажной, сухой древесины и воды: $\rho_{\text{влаж}} = \rho_{\text{воды}} + (0.98 \pm 0.05) \times W$.

На рис. 3, а–б приведены зависимости (n , κ)(W) для веток сосны и березы. Из графиков видно, что при W_1 и W_2 происходит изменение поведения n , κ . Это может быть вызвано существованием в живом дереве трех фаз воды, с разными значениями n и κ .

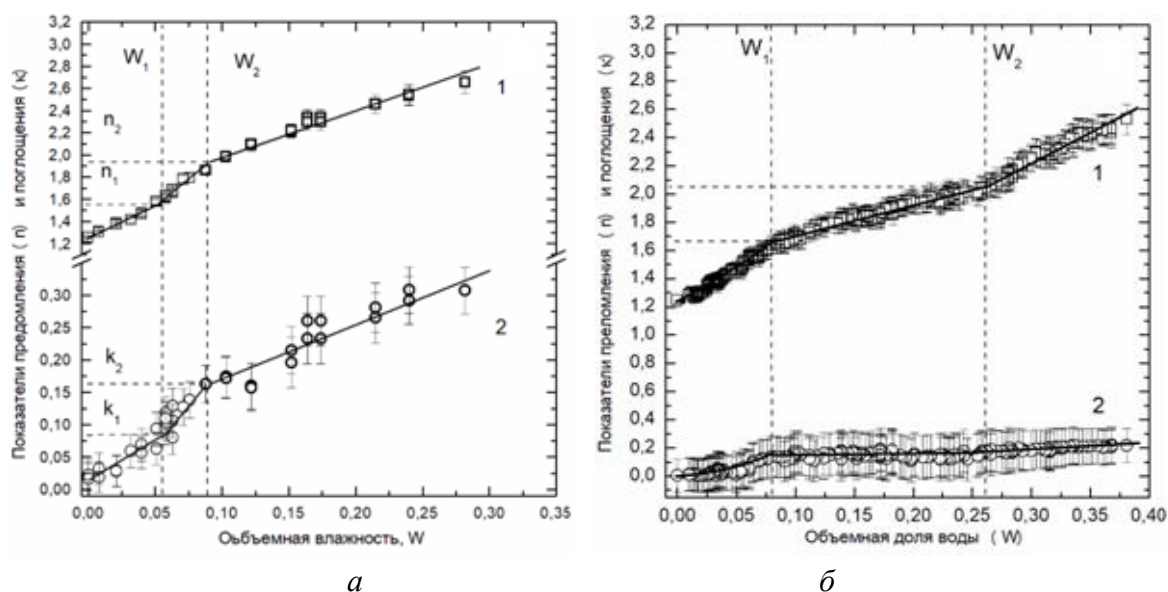


Рис. 3. Зависимости n (1) и κ (2) от W для сосны (а) и березы (б)

Из анализа приведенных графиков следует вывод о необходимости учета температуры, фазового состава и диэлектрических характеристик воды в живом дереве, что позволит повысить точность оценки $T_{\text{ян}}$, $T_{\text{яв}}$ и надежность методов дистанционного микроволнового мониторинга леса.

Исследование поддержано грантом РНФ № 22-17-20041, <https://rscf.ru/project/22-17-20041>.

Список источников

1. Лозин Д. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301.

2. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the SMOS Level 2 Soil Moisture Processor Development Continuation Project, ESA No.: SO-TN-ARG-L2PP-0037, Issue: 4.0 ARGANS no.: ASC_SMPPD_037, 9th Sept. 2019.

3. J.-P. Wigneron, X. Li, F. Frappart, et al. SMOS-IC data record of soil moisture and L-VOD: Historical development, applications and perspectives // *Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 254. Art. 112238.

4. Гранков А. Г., Мильшин А. А., Чухланцев А. А. Моделирование радиотеплового излучения лесов при спутниковых наблюдениях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Т. 2. № 2. С. 256–261.

5. Чухланцев А. А., Шутко А. М. Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 2. С. 3.

6. Romanov A. N. Some Behavior Features of Dielectric Properties of Water in Birch Wood at a Frequency of 1.41 GHz // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022. Vol. 60. P. 1–8, 2022, Art no. 4409208, doi: 10.1109/TGRS.2022.3157642.

7. Романов Д. А., Рябинин И. В., Романов А. Н. Сезонные изменения температуры в стволе живого дерева (на примере сосны) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т.19. №2. С. 142–154.

A. N. Romanov, I. V. Khvostov, D. N. Troshkin, I. V. Ryabinin, D. A. Romanov⁵
Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
e-mail: romanov_alt@mail.ru

SOME ASPECTS OF REMOTE MICROWAVE FOREST MONITORING

Abstract. A new approach to remote microwave monitoring of forests is discussed, based on considering the radial temperature gradient in the trunk of a living tree, as well as the phase composition and dielectric characteristics of tree water. Some regularities in the behavior of the dielectric characteristics of the branches of a living tree are described. The dependences of the refractive and absorption indices of pine and birch branches on the volumetric moisture content (W) have been established. The seasonal dynamics of radiobrightness temperatures in a forest area (Altai Territory) has been studied.

Keywords: forest, dielectric properties, radiobrightness temperature, microwave sensing, SMOS satellite

Л. Г. Свердлик^{1,2}, С. А. Имашев¹

¹ Научная станция РАН в Бишкеке, Кыргызстан

² Кыргызско-Российский Славянский Университет, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследования атмосферных эффектов, которые наблюдались в области тропопаузы за несколько суток до сильного землетрясения с магнитудой $M = 7,3$ в Китае (21 мая 2021 г.) и основаны на данных глобального реанализа MERRA-2. Применение разработанного алгоритма позволило установить, что аномалии сейсмогенного происхождения, характеризующиеся высокими значениями интегрального параметра $\Theta T_C (\geq 2,0)$, проявлялись в виде хорошо выраженных возмущенных областей. Максимумы ΘT_C наблюдались за 1–2 суток непосредственно вблизи эпицентра землетрясения. Событие $M = 7,3$ происходило в условиях низкой солнечной активности, поэтому пространственные и временные распределения аномалий температуры дают основание предполагать вероятную связь с процессами подготовки крупного сейсмического события.

Ключевые слова: землетрясение, атмосфера, спутниковые измерения, температура, аномалия, геомагнитная активность

Введение. Изучение закономерностей изменения пространственно-временного распределения геофизических полей, основанное на использовании технологии спутникового дистанционного зондирования, является важной составной частью анализа взаимосвязи между возмущениями в атмосфере и динамикой сейсмической активности. В качестве параметра, позволяющего проследить процессы формирования и пространственно-временной трансформации возмущений, использовались изменения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS). Выделение и идентификация предсейсмических тепловых аномалий получили широкую поддержку во всем мире [1]. Несмотря на то, что атмосфера представляет собой сложный объект для наблюдения, тепловые аномалии перед сильными землетрясениями отмечались на разных уровнях, начиная от поверхности земли до верхней границы облаков, и неоднократно регистрировались многими исследователями с помощью спутников, оснащенных тепловыми датчиками [2]. Достаточно большое количество проанализированных сильных землетрясений позволило выделить общую для всех событий тенденцию, заключающуюся в использовании данных спутникового мониторинга для обнаружения предсейсмических аномалий, которые обычно определяют, как отклонение текущего значения от долгосрочного среднего уровня [3].

Материалы и методы. Обработка данных спутниковых измерений (MERRA-2) [4] выполнялась с использованием разработанного ранее алгоритма [3, 5], который позволяет выделять короткопериодные аномальные изменения пространственно-временного распределения температуры. Результаты обработки представлены на примере землетрясения магнитудой $M = 7,3$ в Китае (18:04 UTC; 21 мая 2021 г.) [6].

Временная динамика аномалий температуры ($\Theta T(t)$) на 12 изобарических уровнях от 500 до 40 *hPa* рассчитывалась как отклонение текущего значения температуры от среднемесячного уровня (ΔT), нормированное на среднеквадратичное отклонение (σ_T). Диагностирование возмущений температуры было основано на расчетах интегральных параметров D (D_{CORR}), равных произведению скользящих дисперсий временных рядов аномалий температуры в верхней тропосфере и в области тропопаузы [3].

Анализ и интерпретация результатов. Для исследования предсейсмических изменений вертикальной структуры верхней тропосферы и нижней стратосферы и определения высот наиболее возмущенных слоев, в которых происходят интенсивные и противофазные колебания, были построены вертикальные распределения аномалий температуры $\Theta T(h)$ (рис. 1, *a*). Графики эволюции высотных профилей $\Theta T(h)$ перед землетрясением $M = 7,3$ отражают медленные волнообразные изменения температуры со сменой фазы колебаний, происходящей примерно через 40–48 часов.

Профили аномалий температуры позволяют оценить характерные параметры волновых процессов. Ограниченное вертикальное разрешение спутниковых измерений не позволяет рассматривать весь спектр атмосферных волн. Тем не менее данные дистанционного зондирования позволяют выделить часть спектра длинноволновых возмущений [7]. Длина волны температурного возмущения, наблюдаемого за 1 сутки (00:00 UTC; 20 мая 2021 г.) до землетрясения $M = 7,3$, составляла $\sim 5,0$ км (рис. 1, *a*), что может являться признаком активности гравитационных волн.

Наиболее интенсивные изменения ΔT происходили на изобарических уровнях 400–350 *hPa* ($h \sim 7,0$ –8,0 км) в верхней тропосфере (Upper Troposphere, UT) и 150–100 *hPa* ($\sim 14,0$ –17,0 км) в области тропопаузы (Tropopause Layer, TL).

Предсейсмические возмущения проявлялись, как правило, в виде симметричных относительно нуля вариаций, характеризующихся близкими по величине амплитудами положительных и отрицательных аномальных изменений (рис. 1, *b*).

Видно, что значения D_{CORR} , заметно превышающие фоновые значения ($D_{CORR} > 1.0$) и означающие аномальные изменения термической структуры UTLS, наблюдались примерно за сутки до землетрясения $M = 7,3$ и продолжали оставаться на высоком уровне на протяжении немногим более 3 часов после события (рис. 1, *b*).

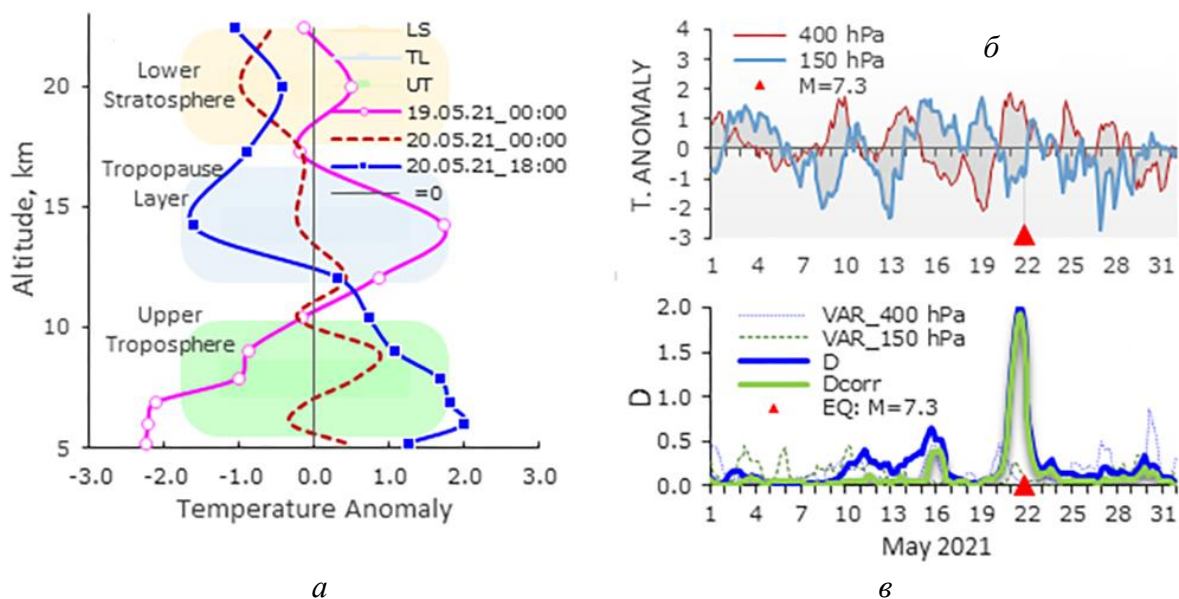


Рис. 1. Вертикальные профили аномалий температуры (а); временные ряды ΘT на уровнях 400 и 150 hPa (б) и вариации параметров D и D_{CORR} (в) в мае 2021 г. Красным маркером показан момент землетрясения $M=7,3$ (21 мая 2021 г.)

Основным условием, приводящим к росту параметра D_{CORR} , являлось одновременное увеличение амплитуды короткопериодных вариаций над и под тропопаузой и противофазного характера этих изменений [8]. Оценка взаимосвязи между изменениями временных рядов аномалий температуры (ΘT) на уровнях 400 и 150 hPa, рассчитанными для каждого момента времени в трехдневном скользящем окне, показала, что перед сейсмическим событием локальные коэффициенты корреляции достигали значений $R=-0,96$ (рис. 2, а). Сразу после землетрясения, следовало заметное снижение амплитуды вариаций температур.

Оценка уровня геомагнитной активности (индекс Dst) проводилась по данным Всемирного центра по геомагнетизму Киотского университета (Япония) [9]. В предшествующий сейсмическому событию период уровни Dst-индекса оставались в пределах умеренных значений, изменяющихся от -25 nT до $+10$ nT (рис. 2, б).

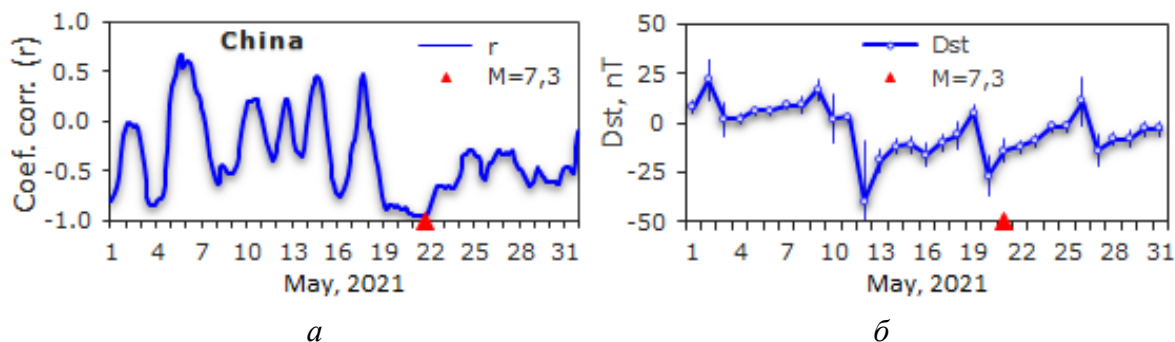


Рис. 2. Временные ряды коэффициента корреляции между аномалиями температуры на уровнях 400 и 150 hPa (а) и вариации среднесуточных значений индекса геомагнитной активности Dst (б) в мае 2021 г.

Основанные на данных спутникового дистанционного зондирования результаты расчета пространственно-временного распределения возмущений температуры в верхней тропосфере / нижней стратосфере, характеризующиеся значениями $D_{CORR} > 0,3$, приведены на рис. 3. Как видно, области наиболее высоких значений параметра $D_{CORR} > 2,0$ практически совпадали с расположением эпицентра рассматриваемого события.

В общем случае эти области соответствовали более интенсивным и коррелированным колебаниям в разделенных тропопаузой слоях атмосферы.

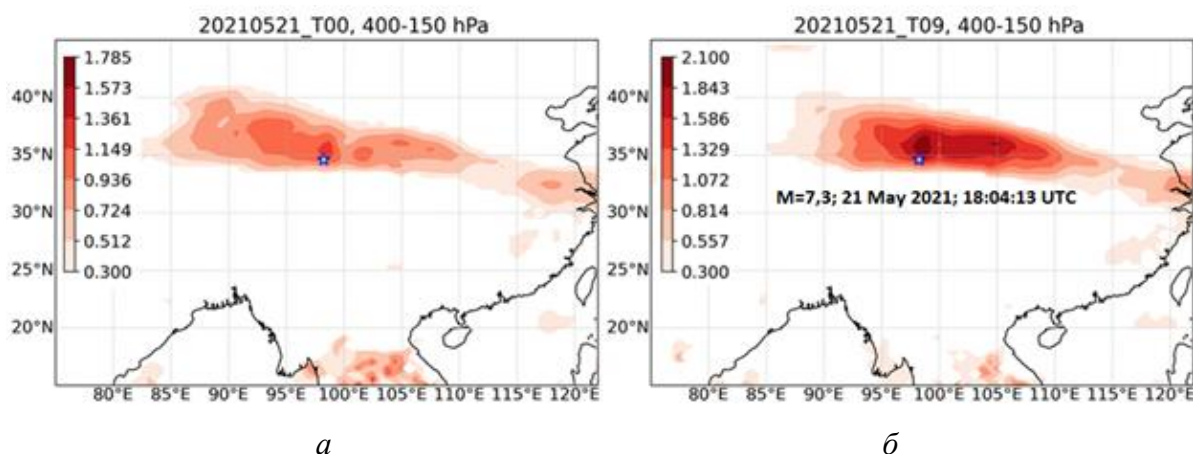


Рис. 3. Эволюция пространственного распределения интегрального параметра D_{CORR} в период подготовки землетрясения $M = 7,3$: а) 00:00 UTC; б) 09:00 UTC (21.05.2021)

Заключение. В настоящей работе проанализированы вариации температуры в верхней тропосфере / нижней стратосфере, основанные на данных спутникового дистанционного зондирования и предшествующие землетрясений магнитудой 7,3 в Китае (21 мая 2021 г.; 18:04:13 UTC) Применение разработанных алгоритмов обработки спутниковых данных позволило диагностировать предшествующие сильным землетрясениям короткопериодные аномальные изменения пространственно-временного распределения температуры. В качестве главных признаков, характеризующих поведение температуры атмосферы перед сильными землетрясениями, рассматривались противоположные по знаку аномальные изменения амплитуды вариаций температуры, происходящие ниже и выше тропопаузы. Возмущения температуры, горизонтальный размер которых составлял нескольких сот километров, наблюдались примерно за сутки до сейсмического события.

Авторы выражают благодарность сотрудникам NASA GES-DISC и USGS за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер темы: 1021052806454-2-1.5.1.

Список источников

1. Jiao Z-H., Zhao J., Shan X. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2018. V. 18. No. 4. P. 1 013–1 036.
2. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сильных землетрясений в 2003–2014 гг. // *Наука, новые технологии и инновации*. 2015. № 3. С. 16–19.
3. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // *MAUSAM*. 2020. V. 71. No. 3. P. 481–490.
4. The NASA GES-DISC. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>.
5. Имашев С. А., Свердлик Л. Г. Атмосферные и ионосферные аномалии, предшествующие сильному экваториальному землетрясению на Суматре // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 4. С. 318–327.
6. The United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>
7. Meyer C. I., Ern M., Hoffmann L., Trinh Q.T., Alexander M. J. Intercomparison of AIRS and HIRDLS stratospheric gravity wave observations. *Atmos. Meas. Tech*. 2018. 11. P. 215–232.
8. Свердлик Л. Г., Имашев С. А. Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 114–122.
9. The World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, Japan. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

L. G. Sverdlik^{1,2}, S. A. Imashev¹

¹ Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan

² Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

PRESEISMIC TEMPERATURE DISTURBANCE IN THE LOWER ATMOSPHERE

Abstract. This paper presents the results of a study of atmospheric effects that were observed in the tropopause region a few days before a strong earthquake with a magnitude of $M = 7,3$ in China (May 21, 2021) and are based on the data of the MERRA-2 global reanalysis. The application of the developed algorithm made it possible to find out that anomalies of seismogenic origin, characterized by high values of the integral parameter ΘT_C ($\geq 2,0$), appeared in the form of well-defined disturbed areas. The ΘT_C maxima were observed 1–2 days before near the earthquake epicenter. The $M = 7,3$ event occurred under conditions of low solar activity, so the spatial and temporal distributions of temperature anomalies give grounds to assume a probable connection with the preparation of a strong seismic event.

Keywords: earthquake, atmosphere, satellite measurements, temperature, anomaly, geomagnetic activity

Л. Г. Свердлик

Научная станция РАН в Бишкеке, Кыргызстан
Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РЕГИОНАХ АЗИИ

Аннотация. Проанализированы аномальные изменения метеопараметров (температуры, зональной и меридиональной скорости ветра) в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS) во время экстремальных сейсмических событий магнитудой $M=7,3$ в Ираке (12 ноября 2017 г.) и Китае (21 мая 2021 г.). Данные дистанционного зондирования (реанализ MERRA-2) позволили проследить процессы формирования и пространственно-временной трансформации возмущений, совпадающих по времени с процессами подготовки и прохождения землетрясений. Установлено, что аномальные вариации параметров наблюдались не только за $\sim 1-2$ суток до исследуемых событий, но и в пост-сейсмические периоды. Важным результатом проведенных исследований является большое сходство возмущений, которые были обнаружены в периоды подготовки двух землетрясений, что, вероятно, может служить подтверждением взаимодействия литосферы и атмосферы в периоды сильной сейсмической активности.

Ключевые слова: спутниковые измерения, температура, скорость и направление ветра, землетрясение, UTLS, критерий STA/LTA, интегральный параметр, аномалия

Введение. Одним из проявлений сейсмоатмосферных возмущений являются тепловые аномалии, наблюдаемые на различных уровнях атмосферы от приземного слоя и нижней тропосферы [1] до стратосферных высот, что подтверждается экспериментами, проведенными в разных географических регионах. Область верхней тропосферы / нижней стратосферы (UTLS) является наименее изученной с точки зрения установления взаимосвязи между динамикой изменчивости различных ее параметров и сейсмичностью. Особенность термической структуры UTLS, которая заключается в смене знака вертикального градиента температуры, позволяет более эффективно реализовать выделение сейсмогенных вариаций температуры, используя многоуровневый подход [2]. Среди возможных причин развития предсейсмических возмущений температуры в UTLS наряду с гравитационными волнами могут рассматриваться циркуляционные процессы, в частности, струйные течения. Эти важные элементы динамики атмосферы во многом определяют распределение термодинамических параметров.

Целью данного исследования является анализ термической и ветровой структуры UTLS по данным спутниковых измерений [3], выделение пространственно-временных аномалий метеопараметров и их сопоставле-

ние с сейсмическим процессом в Ираке (землетрясение магнитудой $M = 7,3$; 12 ноября 2017 г.) и Китае ($M = 7,3$; 21 мая 2021 г.) [4].

Анализ и интерпретация результатов. Интенсивность возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере оценивалась путем вычисления интегральных параметров δT_C (δT) [2]. Как видно, максимальные значения δT_C , предвещающие основные сейсмические события, четко выделялись на фоне более слабых возмущений (рис. 1).

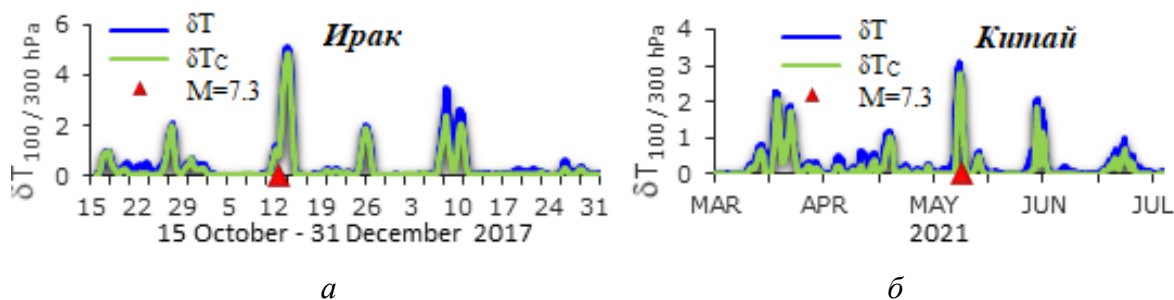


Рис. 1. Динамика изменения параметров δT и δT_C :
 а) в Ираке (с 15 октября по 31 декабря 2017 г.); б) в Китае (март–июль 2021 г.).
 Красные маркеры – момент землетрясений

Результаты расчета карт распределения параметра δT_C до, вовремя и после землетрясения в Китае показали, что область с максимальными значениями δT_C была локализована вблизи эпицентра предстоящего землетрясения $M = 7,3$ (рис. 2) и наблюдалось в течение двух-трех дней (20–22 мая 2021 г.). Горизонтальные размеры аномальной области составляли порядка нескольких сот километров, что соответствует радиусу области подготовки землетрясения [2].

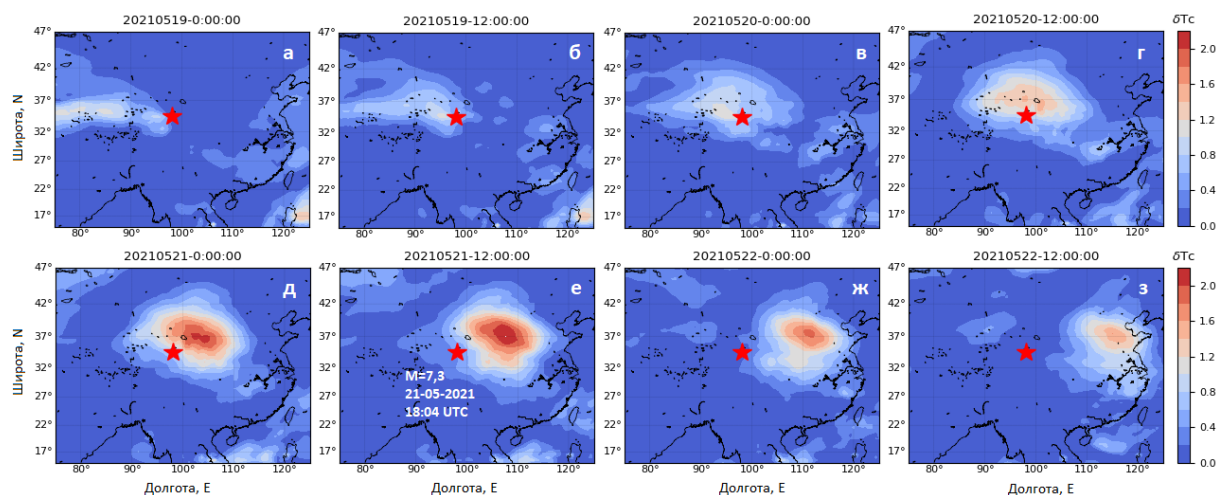


Рис. 2. Карты пространственного распределения интегрального параметра δT_C , рассчитанные для моментов времени 00:00 и 12:00 UTC в период с 19 по 22 мая 2021 г. Маркером показан эпицентр землетрясения $M = 7,3$ ($34,60^\circ$ с.ш.; $98,25^\circ$ в.д.)

Для анализа ветрового режима над эпицентральной областью землетрясения в Китае (март–июль 2021 г.) было построено распределение всех 3-часовых значений модуля вектора скорости ветра (V_R) для различ-

ных его направлений (α) на уровне 200 гПа (~12,0 км), содержащие 1 240 точек данных (рис. 3, *а*). Этот уровень соответствовал горизонтальной оси струйного течения с максимальной скоростью ветра (рис. 3, *б*).

Видно, что за 3–30 часов до землетрясений наблюдалось увеличение модуля вектора скорости ветра до 60–70 м/с, обусловленное ростом меридиональной (V_N) составляющей скорости ветра, о чем свидетельствует изменение направления V_R на $\sim 10\text{--}15^\circ$. Точки данных, характеризующие изменения ветра в пятидневный пред сейсмический период (16–21 мая 2021 г.), выделены цветными маркерами.

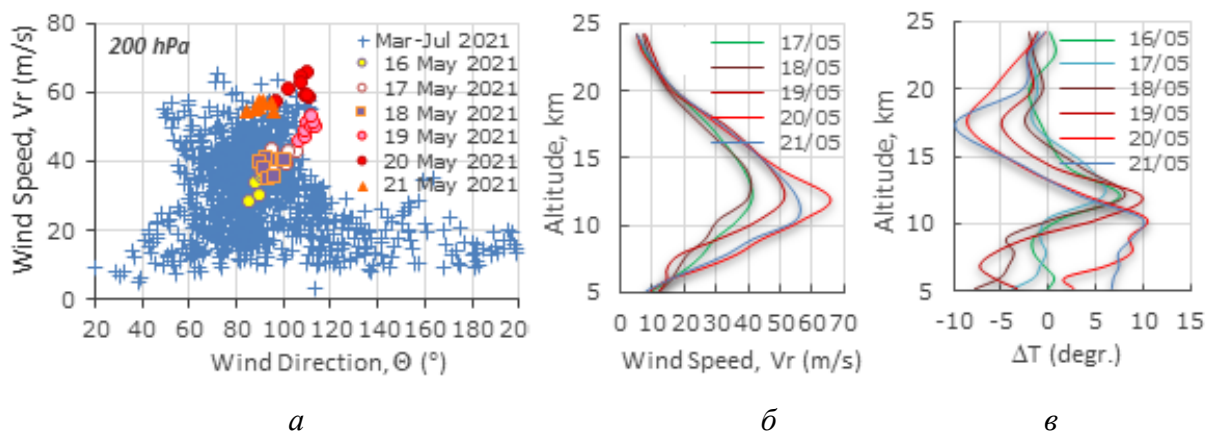


Рис. 3. Распределение значений модуля скорости ветра для различных его направлений на уровне 200 гПа: *а*) над эпицентрными областями землетрясений марте – июле 2021 г.; *б*) вертикальные профили $V_R(h)$; *в*) ΔT в предшествующие 5–6 дней

Карты пространственного распределения зональной компоненты скорости ветра (200 гПа) показали, что перед землетрясениями струйные течения пересекали весь исследуемый регион (рис. 4). За 2 суток до землетрясения в Китае (19 мая 2021 г.) и за сутки до события в Ираке (12 ноября 2017 г.) области наиболее высоких скоростей ветра примерно указывали на расположение эпицентральных областей землетрясений.

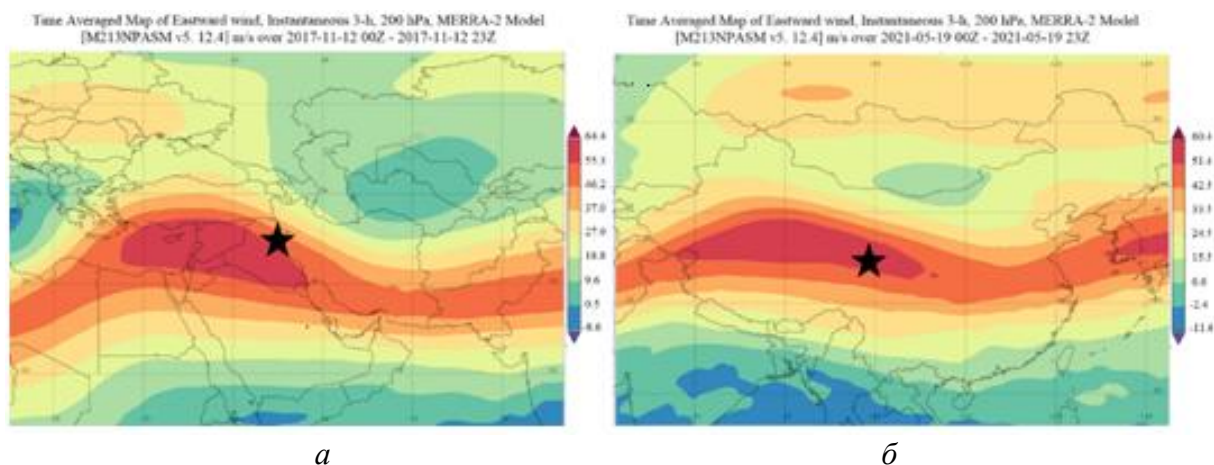


Рис. 4. Пространственные распределения среднесуточной скорости зонального ветра (200 гПа) перед землетрясениями: *а*) в Ираке (12 ноября 2017 г.); *б*) в Китае (19 мая 2021 г.). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M=7,3$

Анализ корреляционной связи между вариациями меридиональной $V_N(t)$ и зональной $V_E(t)$ составляющими скорости ветра показал, что непосредственно перед сильными событиями в области высот 9–17 км, которая соответствует максимальным скоростям ветра ($V_R > 30$ м/с), наблюдались противофазные изменения, а, соответственно, высокие отрицательные коэффициенты корреляции ($r = -0,95$ – $-0,96$) (рис. 5).

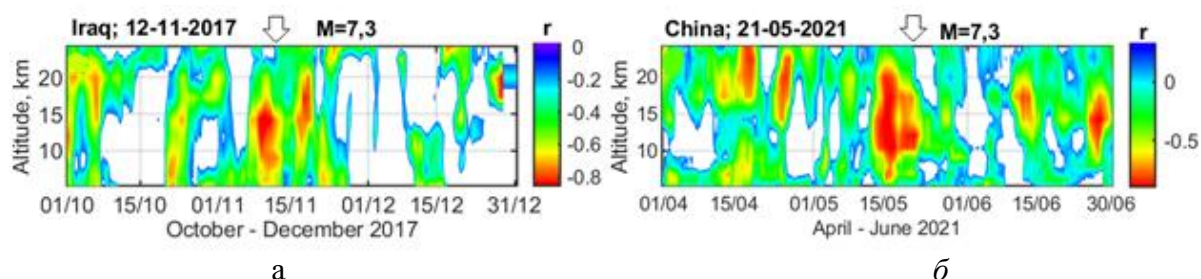


Рис. 5. Высотно-временные распределения отрицательных значений коэффициента корреляции: а) в Ираке (октябрь–декабрь 2017 г.); б) в Китае (апрель–июнь 2021 г.)

Заключение. Таким образом, пространственно-временная эволюция возмущений температуры и скорости ветра в верхней тропосфере достаточно хорошо согласуется с сейсмичностью. Это может означать, что возникающие на поверхности Земли предсейсмические эффекты приводят к изменению параметров атмосферы [2]. Под действием этих процессов изменяется скорость воздушного потока над эпицентральной областью или вблизи нее. Формирование возмущенных областей температуры вблизи эпицентров сейсмических событий, сохраняющих свою форму, размер и положение в течение 12 часов вместе с аномалиями струйного течения могут, вероятно, служить одними из признаков сильного землетрясения.

Автор благодарен сотрудникам NASA GES-DISC за доступ к данным.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН ИС РАН в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер: 1021052806454-2-1.5.1.

Список источников

1. Zhang Y., Meng Q., Wang Z., Lu X., Hu D. Temperature Variations in Multiple Air Layers before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 5. P. 884. DOI: 10.3390/rs13050884.
2. Свердлик Л. Г. Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
3. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>.
4. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.

L. G. Sverdlik

Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan
Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ABNORMAL CHANGES IN METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE LOWER ATMOSPHERE IN SEISMICALLY ACTIVE REGIONS OF ASIA

Abstract. Abnormal changes in meteorological parameters (temperature, zonal and meridional wind speeds) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) during extreme seismic events of magnitude $M = 7.3$ in Iraq (November 12, 2017) and China (May 21, 2021) were analyzed. Remote sensing data (reanalysis of MERRA-2) made it possible to trace the processes of formation and spatial-time transformation of perturbations coinciding in time with the processes of preparation and passage of earthquakes. It was established that abnormal parameter variations were observed not only ~1-2 days before the studied events, but also during post-seismic periods. An important result of the studies is the large similarity of perturbations that were detected during the preparation periods of two earthquakes, which can probably serve as confirmation of the interaction of the lithosphere and the atmosphere during periods of strong seismic activity.

Keywords: satellite measurements, temperature, wind speed, direction, earthquake, upper troposphere, lower stratosphere, STA/LTA criterion, integral parameter, and anomaly

О. А. Томшин, В. С. Соловьев

Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
e-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ЭПИЗОДОВ БЫСТРОГО РОСТА ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Аннотация. В работе проведён анализ пространственно-временной динамики параметров атмосферы во время эпизодов быстрого роста площади (БРП) лесных пожаров в Восточной Сибири. Показано, что события БРП наблюдаются на фоне характерных метеорологических условий – положительных аномалий Z500, дипольной картины циркуляции в меридиональной компоненте ветра V300, положительных аномалий температуры приземного воздуха, отрицательных аномалий осадков и, как итог, общей повышенной пожароопасности. Наблюдаемая картина соответствует антициклонической циркуляции. Установлено, что атмосферные параметры начинают нарастать/снижаться относительно среднесезонных значений за 4–8 дней до событий, достигают максимума/минимума примерно в день события и постепенно возвращаются к среднесезонным значениям. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании возникновения подобных событий.

Ключевые слова: лесные пожары, атмосферные параметры, Восточная Сибирь

Введение. В последние десятилетия потепление климата приводит к формированию более благоприятных условий для возникновения и развития природных пожаров как в региональном, так и в глобальном масштабе [1]. Восточная Сибирь (ВС) является самым пожароопасным регионом России на территории которого ежегодно регистрируются большое количество лесных пожаров [2]. Возникновение и скорость распространения лесных пожаров зависят от нескольких факторов: наличия горючего материала, погодных-климатических условий и источников возгорания.

В данной работе проведён анализ пространственно-временной динамики параметров атмосферы во время эпизодов быстрого роста площади (БРП) лесных пожаров в Восточной Сибири за период 2001–2021 гг. по данным атмосферного реанализа и спутниковых наблюдений.

Данные. Для анализа пожарной активности использованы данные спектрорадиометра MODIS (продукты MOD14A1 C6.1 и MCD64A1 C6) [3, 4], установленного на спутниках Terra и Aqua. Продукт MOD14A1 C6.1 содержит ежедневные сведения об очагах активного горения с пространственным разрешением 1 км. Продукт MCD64A1 C6.1 содержит сведения о пройденных огнём территориях с пространственным разрешением 500 м.

Для определения типа растительности на повреждённых огнём участках использовались данные о типах подстилающей поверхности из продукта MODIS MCD12Q1 C6 [5].

Среднесуточные значения аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа ($\Delta Z500$), меридиональной компоненты ветра на уровне 300 гПа ($V300$), аномалий температуры приземного воздуха (ΔT), аномалий осадков (ΔP) получены из NCEP-DOE реанализа [6], пространственное разрешение данных $2,5^\circ$. Ежедневные данные об облачном покрове получены из продукта MODIS MOD08D3 C6.1 [7]. Данные по индексу пожароопасности по метеоусловиям (FWI) получены из Global Fire WEather Database (GFWED, <https://data.giss.nasa.gov/impacts/gfwed/>). Аномалии рассчитывались как отклонения значений от среднесезонных, рассчитанных за период 1980–2010 гг.

Методы. Для обнаружения и анализа событий БРП в работе используются модифицированные варианты методов, описанных в работе [8]. На первом этапе осуществлялся отбор очень крупных гарей пожаров с площадью >10 тыс. га, тип растительности которых относился к лесным классам. Затем для каждой гари на основе спутниковых данных об изменении площадей пожаров в течение периода горения с помощью приближения о равномерном, круговом распространении пожаров, находилась ежедневная скорость продвижения фронта пожара. После этого, осуществлялся отбор событий БРП по каждой гари, определяемых как день, в течение которого скорость распространения фронта превышала 480 м/день. Далее для каждого события находились значения метеорологических параметров в диапазоне $\pm 50^\circ$ по долготе и $\pm 30^\circ$ по широте относительно центра соответствующей гари за период ± 20 дней относительно даты события. На заключительном этапе осуществлялось усреднение по относительно дню по всем событиям.

Результаты. Всего за рассмотренный период на территории ВС было обнаружено 1 249 событий, большинство из которых пришлось на летние месяцы июнь–июль–август. На рис. 1 представлены усреднённые по относительно дню карты пространственного распределения $\Delta Z500$ (рис. 1а) и $\Delta V300$ (рис. 1б) по всем событиям. Как видно из рис. 1, а, примерно за 8 дней до нулевого дня начинает нарастать величина $\Delta Z500$, которая достигает своего максимума примерно в $-2-0$ день относительно даты события. Аномалия $Z500$ в день максимума имеет чётко выраженную округлую форму, с максимумом, расположенным близко к относительно центру событий. В усреднённом пространственном распределении меридионального ветра $V300$ (рис. 1, б) примерно за 4–6 дней до нулевого дня начинает проявляться дипольная конфигурация, которая наиболее ярко проявляется в $-2-0$ день относительно даты события. Положительные значения скорости меридиональной компоненты ветра расположены западнее относительно центра событий, отрицательные – восточнее. Характер наблюдаемых картин в $\Delta Z500$ и $V300$ свидетельствует о том, что значитель-

ная часть событий БРП наблюдается на фоне интенсификации антициклонической циркуляции. Это подтверждается вариациями облачного покрова, приземной температуры и осадков (рис. 2) – в день событий БРП наблюдается уменьшение облачности и количества осадков, сопровождаемые ростом приземной температуры воздуха и, как следствие, ростом пожароопасности и интенсификацией очагов горения.

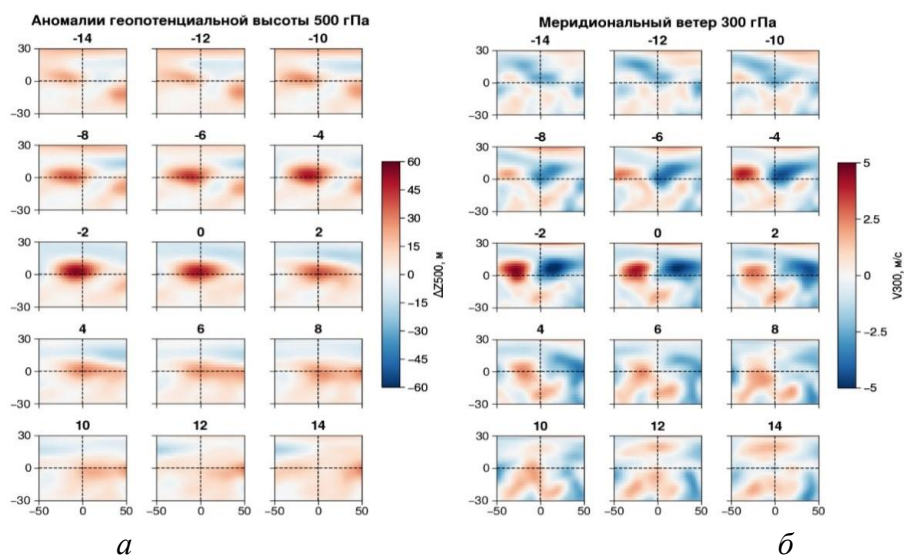


Рис. 1. *а)* усреднённые карты пространственного распределения $\Delta Z500$ по относительным дням от дат событий; *б)* то же самое, но для $V300$

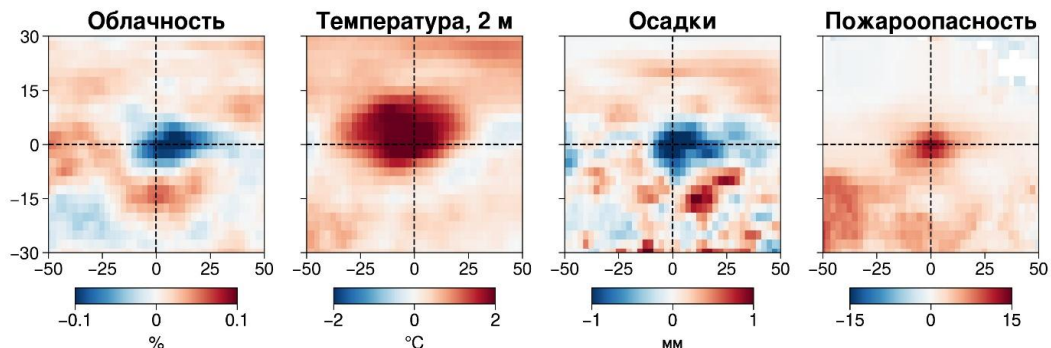


Рис. 2. Усреднённые карты пространственного распределения аномалий облачности, приземной температуры, осадков и индекса пожароопасности FWI в день «0»

Заключение. В работе проведён предварительный анализ метеорологических условий во время событий быстрого расширения площади лесных пожаров в Восточной Сибири.

События БРП наблюдаются на фоне характерных метеоусловий – положительных аномалий $Z500$, дипольной картины циркуляции в меридиональной компоненте ветра $V300$, положительных аномалий температуры приземного воздуха, отрицательных аномалий осадков и, как итог, общей повышенной пожароопасности. Наблюдаемая картина соответствует антициклонической циркуляции.

Метеорологические параметры начинают нарастать/снижаться относительно среднемноголетних значений за 4–8 дней до событий, достигают

максимума/минимума примерно в день события и постепенно возвращаются к среднемноголетним значениям. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании возникновения подобных событий.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

Список источников

1. Abatzoglou J. T., Williams A. P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 326–336. doi: 10.1029/2018GL080959.
2. Tomshin O. A., Solovyev V. S. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020 // *Geocarto International*. 2021. doi: 10.1080/10106049.2021.1973581.
3. Giglio, L., Schroeder, W., and Justice, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. № 178. P. 31–41.
4. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85.
5. Friedl M., Sulla-Menashe D. Data from: MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua land cover type yearly L3 global 500m SIN grid V006” (dataset). NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2020.
6. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. P. 1 631–1 643.
7. MODIS Atmosphere Science Team. MOD08_D3 MODIS/Terra Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Daily L3 Global 1Deg CMG. NASA Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, 2015.
8. Jain P., Flannigan M. The relationship between the polar jet stream and extreme wildfire events in North America // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. № 15. P. 6 247–6 265.

O. A. Tomshin, V. S. Solovyev

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF ATMOSPHERIC PARAMETERS DURING WILDFIRE SPREAD EVENTS IN EASTERN SIBERIA

Abstract. In this work, an analysis of spatio-temporal dynamics of atmospheric parameters during wildfire spread events in Eastern Siberia was carried out. It is shown that such events are associated with characteristic meteorological conditions – positive anomalies in Z500, dipole pattern of circulation in the meridional wind component V300, positive surface air temperature anomalies, negative precipitation anomalies and, as a result, elevated fire weather conditions. It has been established that the meteorological parameters begin to increase/decrease relative to the long-term average values 4–8 days before the events, reach a maximum/minimum approximately on the day of the event and gradually return to the long-term average values.

Keywords: forest fires, atmospheric parameters, Eastern Siberia

Е. В. Федотова^{1,2}, Н. А. Пучкова², О. В. Савицкая²

¹ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия-e-mail: elfed@ksc.krasn.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ В СРЕДНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ПОВРЕЖДЕННЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Аннотация. Цель исследования – разработка автоматизированного способа индикации поврежденного лесного покрова. Известно, что на участках поврежденных темнохвойных лесов уменьшается отражение в среднем ИК диапазоне. Используя продукт MOD09GA_NDWI и облачную платформу Google Earth Engine, показано уменьшение значений NDWI на участках поврежденных (усыхающих) темнохвойных лесов. Построение растровых слоев коэффициентов линейного тренда NDWI позволяет локализовать участки поврежденных лесов.

Ключевые слова: повреждение лесов, средний ИК диапазон, MOD, Google Earth

Определение площади лесов и их состояния является важной задачей для определения вклада территорий в баланс углерода на планете. Уменьшение площади лесного покрова происходит в результате антропогенного (рубки) и природного воздействия (пожары, насекомые- вредители). Также в связи с изменением климата наблюдается ухудшение состояния и гибель лесов в результате повреждения инвазивными насекомыми, изменения температурных и влажностных параметров атмосферного воздуха и почвы. Увеличение лесной площади происходит в результате восстановления лесов после рубок и пожаров, повреждений насекомыми-вредителями.

В этой связи оценка актуального состояния лесов, динамики их повреждения или восстановления – одна из важнейших задач, как исследовательских, так и практических. Для лесного покрова Сибири для решения этих задач используются материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Усыхание темнохвойных древостоев на территории южной тайги, особенно в горах Восточного Саяна, горных хребтов Байкала отмечается в публикациях как по результатам наземных исследований [1], так и по данным ДЗЗ [2]. На рис. 1 приведены фрагменты снимков Landsat с визуализируемыми участками повреждения темнохвойных лесов в бассейне реки Большая Белая, Восточный Саян (указаны стрелками).

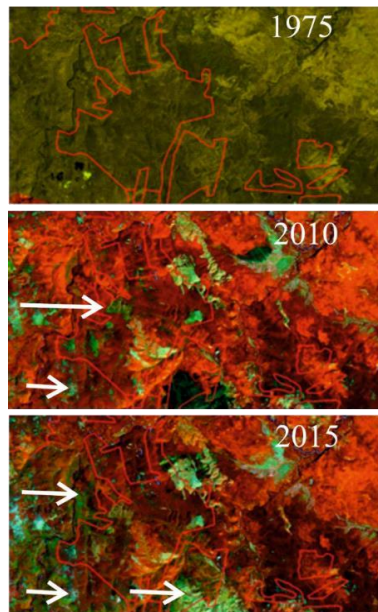


Рис. 1. Фрагменты снимков Landsat, иллюстрирующие появление (2010 г.) и увеличение площади поврежденных лесов (2015 г.).
Контуром обозначена территория темнохвойного леса

На снимке Landsat 2015 г. были построены обучающие выборки:

1. Здоровых в 2015 г. темнохвойных лесов;
2. Поврежденных лесов, которые появились в 2010 г. или ранее;
3. Поврежденных лесов, которые появились после 2010 г.

В результате анализа этих данных показано, что различия поврежденных лесов проявляются в уменьшении отражения в ближнем ИК канале и в увеличении отражения в среднем ИК канале. Такое поведение спектральных свойств растительности было выявлено еще для системы наземного ДЗЗ на исследовательском полигоне «Погорельский бор» Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН [3] и подтверждено во многих исследованиях в дальнейшем. Введен индекс NDWI [4], чувствительный к изменениям влажности, который вычисляется по формуле:

$$NDWI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR), \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближнем ИК канале, SWIR – отражение в коротковолновом среднем ИК канале.

Для получения временных рядов NDWI в работе используется продукт MOD09GA_NDWI [5], доступный на платформе Google Earth Engine [6]. С помощью кода на JavaScript через интерфейс в форме Code Editor получены временные ряды индекса для здоровых и поврежденных древостоев. Исходные данные MOD09GA_NDWI являются ежедневными, и код был модифицирован для расчета среднемесячных значений NDWI.

Для векторных полигонов поврежденных древостоев, построенных по снимкам Landsat 2015 и 2021 гг., понижение значений NDWI в течение вегетационного периода (май – сентябрь) наблюдается с 2012 г. Наиболее информативными являются данные за июнь и июль месяцы (рис. 2).

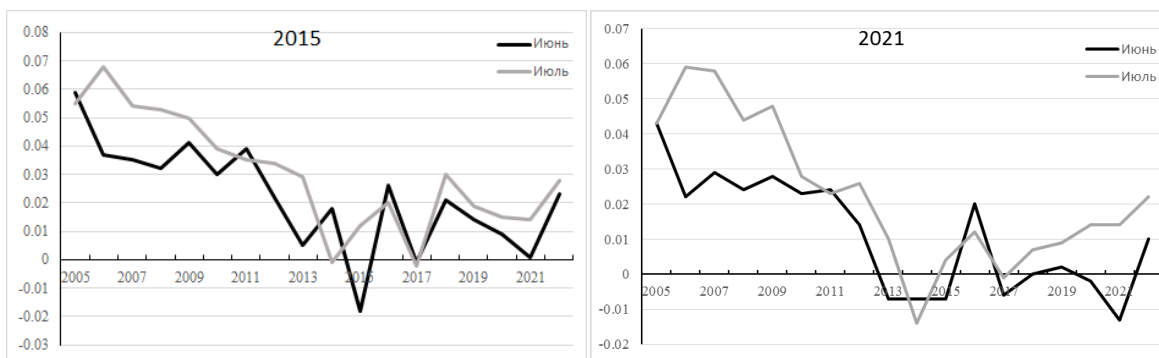


Рис. 2. Динамика NDWI в июне и июле 2005–2022 гг. на участках поврежденных древостоев по снимкам 2015 г. и 2021 г.

Для поврежденных лесов, которые визуализируется на снимке 2015 года, с 2020 года значения индекса повышаются. Это возможно, например, из-за влияния растительности нижних ярусов. Таким образом, на участках поврежденных древостоев, когда повреждение сопровождается понижением содержания влаги в кронах, наблюдается понижение значения индекса NDWI.

Платформа Google Earth Engine позволяет получать значение коэффициентов линейных трендов для каждого пикселя временного ряда растровых данных. На рис. 3 показан пример растра коэффициентов трендов NDWI на рассматриваемой территории с 2015 г. Отрицательный коэффициент линейного тренда соответствует участкам повреждения темнохвойных лесов по снимку 2021 г.

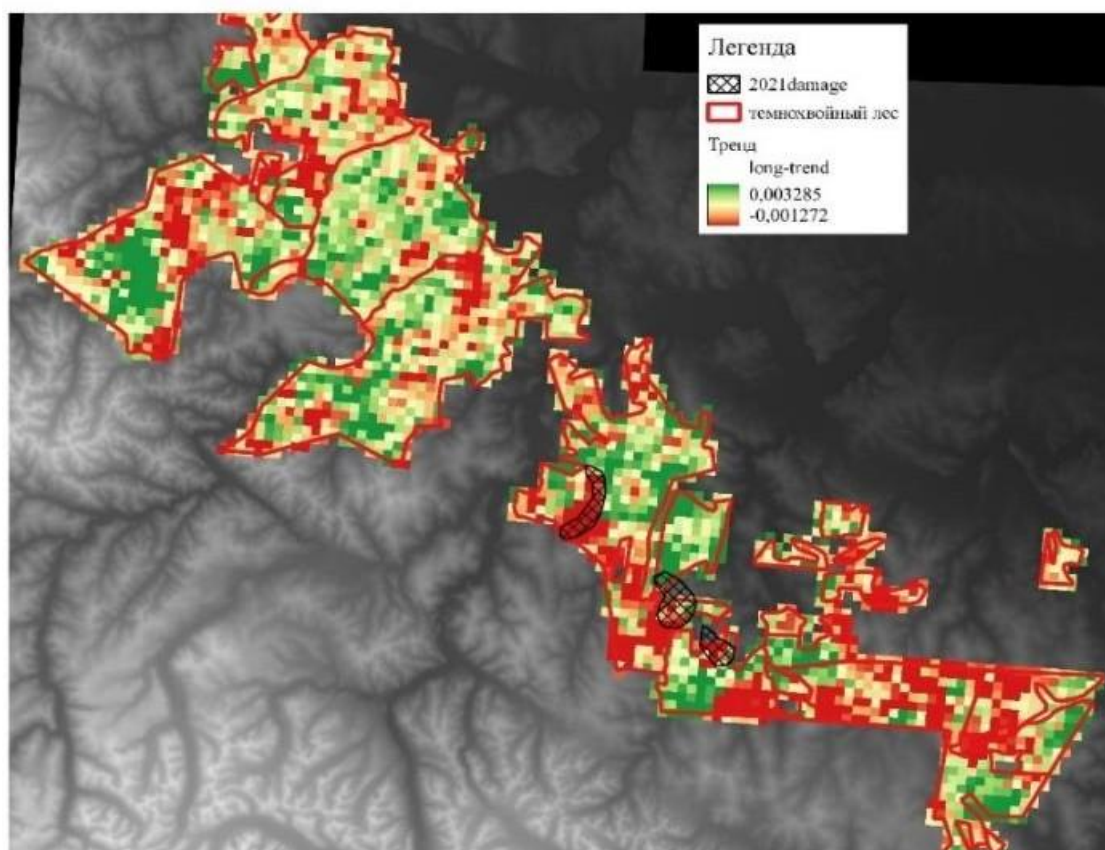


Рис. 3. Коэффициенты линейного тренда NDWI на территории исследования

Проводя анализ динамики NDWI с помощью коэффициентов линейного тренда для лесных территорий, можно выделять участки, где лес испытывает недостаток влаги в кронах, что свидетельствует о его повреждении и, возможно в дальнейшем, гибели. Такие повреждения могут не переводить территории в состояние обезлесившихся и не отслеживаться такими продуктами, как Forest Global Change.

Работа выполнена при финансовой поддержке базового проекта ИЛ СО РАН «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата» (№0287-2021-0008).

Список источников

1. Бажина Е. В., Парфенова Е. И., Чебакова Н. М. Усыхание темнохвойных древостоев в горах Южной Сибири: локализация и возможные причины // Сб. статей Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос». 2020. С. 176–181.
2. Kharuk V. I., Im, S. T., Oskorbin P. A., Petrov I. A., Ranson K. J. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberia mountains // Forest ecology and management. 2013. V. 310 P. 312–332.
3. Kharuk V. I., Al'shanskiy A. M., Yegorov V. V. Remote sensing in the assessment of vegetation condition // Mapping sciences and remote sensing. 1991. Т. 28, № 4. P. 323–331.
4. Gao B. G. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, Iss.3. P.257–266.
5. Vermote E., Wolfe R. MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. URL: <https://developers.google.com/earth-engine>.
6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Pyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.

E. V. Fedotova¹, N. A. Puchkova², O. V. Savitskaya²

¹ FRC «Krasnoyarsk Science Center of SB of RAS», Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russiae-mail: elfed@ksc.krasn.ru

USING MID-IR DATA TO INDICATE DAMAGED FORESTS

Abstract. The purpose of the study is to develop an automated method for indicating damaged forest cover. It is known that the reflection in the mid-IR range of damaged dark coniferous forests decreases. Using the MOD09GA_NDWI product and the Google Earth Engine cloud platform, a decrease of NDWI values in areas of damaged (desiccating) dark coniferous forests is shown. The calculating of raster layers of the NDWI linear trend coefficients makes it possible to localize areas of damaged forests.

Keywords: forest damage, mid-IR range, MOD09GA_NDW, Google Earth Engine