РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы XII Международной научной конференции

Красноярск, 9–12 сентября 2025 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»,
Института космических исследований РАН

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Материалы XII Международной научной конференции

Красноярск, 9–12 сентября 2025 г.

Электронное научное издание

Научный редактор
Е. А. Ваганов

Красноярск
СФУ
2025

УДК 528.8:004.932(03)
ББК 26.0+32.811.3
Р326

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 кафедры систем искусственного интеллекта ИКИТ СФУ; *М. В. Носков*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и анализа данных ИКИТ СФУ; *В. Б. Кашкин*, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники ИФиРЭ СФУ; *В. И. Харук*, доктор биологических наук, профессор ФИЦ КНЦ СО РАН; *Ю. А. Маглинец*, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем искусственного интеллекта ИКИТ СФУ; *Р. В. Брежнев*, кандидат технических наук, доцент, врио директора ИКИТ СФУ; *В. А. Хамедов*, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и природопользования СГУГиТ

Р326 **Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли** : материалы XII Междунар. науч. конф. Красноярск, 9–12 сентября 2025 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Электрон. дан. (15,9 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2025. – 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 978-5-7638-5197-7

Представлены современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования Земли; рассмотрены модели и методы обработки данных дистанционного зондирования, полученных от спутниковых и беспилотных авиационных систем, с применением технологий искусственного интеллекта; 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 и перспективы в решении социально-экономических задач регионов.

Предназначены для специалистов в области дистанционного зондирования Земли, компьютерного зрения, 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(03)
ББК 26.0+32.811.3

ISBN 978-5-7638-5197-7

© Сибирский федеральный университет, 2025

Электронное научное издание
Компьютерная верстка Е. А. Сафиной
Корректор З. В. Малькова
Подписано в свет 25.12.2025. Заказ № 25697
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

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ…….….. **10**

Дмитриев Е. В., Мельник П. Г., Соколов А. А., Донской С. А.
Особенности использования спектрально-временных признаков в задаче определения лесотаксационных параметров по спутниковым данным……. 10

Добронец Б. С., Попова О. А.
Технологии искусственного интеллекта для перспективных научных исследований…… 20

Лозин Д. В., Лупян Е. А.
Возможности использования спутниковой информации об интенсивности горения пожаров для оценки повреждений лесов……. 24

Романов А. Н., Евтюшкин А. В., Романов Д. А., Рябинин И. В., Хвостов И. В.
Некоторые особенности дистанционного микроволнового мониторинга солончаков…… 30

Семакина А. В., Шихов А. Н., Климина Е. А.
Оценка риска ветровалов в лесной зоне европейской части России на основе метода случайного леса……..... 35

Федоткин Д. И., Сысенко Д. В., Боровенский Е. Н., Ядыкин А. В., Голубев Д. Н., Балян Г. М., Песоцкий М. В., Метт Д. Ю.
Автоматическая потоковая обработка данных в интересах формирования высокоточной продукции ДЗЗ…… 41

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И BIG DATA@..... **45**

Брежнев Р. В., Носков И. Ф., Маглинец Ю. А.
Детектирование природных пожаров по спутниковым снимкам низкого пространственного разрешения…….. 45

Володько О. С., Лев Н. А., Полянчикова Д. В.
Нейросетевая *LSTM*-модель с сезонным разделением данных для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере Красноярска…… 50

Герасимова Е. И.
Структурная модель агента мультиагентной системы……. 54

Жуков Д. В., Саидов А. Г., Терентьева В. В., Астахова Е. И.
Опыт обучения нейронной сети *YOLOv*8 на ограниченном объеме обучающих данных при распознавании антропогенных объектов с выраженной текстурой на космических изображениях……..... 59

Клековкин В. А., Марков Н. Г.
Система мониторинга воздушного пространства и территории опасных технологических объектов на основе сверточной нейронной сети *YOLOv*8*s*….. 64

Лазарева И. М., Ляш О. И., Баскова В. К., Кошкина В. Г., Ткачук А. В.
Использование алгоритмов компьютерного зрения для обнаружения кромки льда на спутниковых снимках……..…… 68

Малкин А. Ю., Марков Н. Г.
Устойчивость модели сверточной нейронной сети к импульсным помехам при классификации деревьев пихты на полученных с БПЛА изображениях…… 72

Мачука К. Р., Марков Н. Г.
Модели нейронных сетей для семантической сегментации изображений деревьев сосны сибирской кедровой, полученных с помощью БПЛА…….….. 77

Мингалев А. В.
Разработка и тестирование алгоритма преобразования гистограммы для реализации в методе и программном комплексе автоматизированного дешифрирования сканерных тепловизионных изображений…….. 82

Мочалов В. Ф., Григорьева О. В.
Методика формирования уточненных исходных данных для алгоритмов машинного обучения при обработке материалов мультиспектральной космической съемки……..…… 88

Овсянников И. В., Рылов С. А.
Распознавание осадков по данным с камер наружного наблюдения с помощью глубокого обучения……. 92

Питерниекс Е. Д., Данченков А. Р., Белов Н. С.
Использование компьютерного зрения для морфологического мониторинга пляжей……..... 96

Подольская Е. С.
Датасеты машинного обучения для распознавания дорог…….…….. 101

Сафонова А. Н., Маглинец Ю. А., Каплун Д. И.
Технологии ИИ и дистанционного зондирования в сельском хозяйстве…..…….. 105

Синицина А. Н., Подольская Е. С.
Разработка инструмента анализа датасета машинного обучения для регионального проекта…….……. 110

Урдаев В. Д., Брежнев Р. В., Раевич К. В., Маглинец Ю. А.
Использование больших языковых моделей для анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли…….. 115

Фанин Е. Д., Позднякова Н. А.
Моделирование температуры поверхности Земли на основе производных изображений с применением методов машинного обучения…….. 119

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ……..……. 123

Акимов И. М., Пустовалов К. Н., Кучинская О. И., Брюханов И. Д.
Поиск высоты фронтальной поверхности в момент регистрации облаков верхнего яруса…….. 123

Белолипецкий В. М., Генова С. Н.
Точечная модель изменений концентраций загрязняющих веществ в приземном слое Красноярска……... 127

Бронов С. А., Вайман М. А., Никонов Д. А., Кривова Д. Д., Зазнобина А. В., Заболотский И. А.
Базовые принципы построения адаптивной системы моделирования исполнительных устройств космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли……. 131

Горошко А. А., Демидко Д. А., Ликсонова Д. И., Масюк М. А., Филюшина Е. В., Хныкин А. В.
Прогнозирование появления очагов сибирского шелкопряда…….…… 137

Грищенко М. Ю., Фурунжиева В. А.
Лесные и тундровые растительные сообщества Дальнего Востока на тепловых космических снимках…….…….. 141

Добронец Б. С., Кемельбаева А. Р.
Использование эрмитовых сглаживающих сплайнов в распределительной регрессии…….……. 146

Дубинина В. К., Ермаков Д. М.
Выделение поверхности водного зеркала загрязненных объектов с использованием *Google Earth Engine* на примере Камского водохранилища….. 149

Еременко М. С., Элешкевич А. Д.
Автоматизация процесса построения топографической основы……..… 153

Захарова Н. Б., Макарычев В. Д.
Ассимиляция спутниковых и профильных данных в модели *INMOM*: оценка точности для Черного моря…… 157

Зеленцов В. А., Мочалов В. Ф., Мухаметов Д. И.
Методика наземных обследований для интеллектуальной разметки материалов съемки при идентификации состояния лесной растительности…….……. 161

Иванова Ю. С., Горбунов М. Ю., Уманская М. В., Федосеев В. А.
Оценка концентрации хлорофилла *a* в акватории Средней Волги по спутниковым данным при помощи регрессионных моделей……. 165

Картушинский А. В., Картушинский С. А., Ботвич И. Ю.
Об оценке пространственно-временных масштабов изменчивости термодинамических параметров в тонком приземном слое по данным ДЗЗ и контактным данным…….……. 169

Кобец Д. А., Сайгин И. А, Уваров И. А.
Создание инструментов анализа результатов картографирования временных рядов растительного покрова и метеорологических данных на основе *BI*-технологий…….…….. 176

Колбудаев П. А., Плотников Д. Е.
Метод автоматической оценки и улучшения продукта *SCL Sentinel*-2 на основе текстурных признаков и машинного обучения……...…... 180

Коренюгина Л. М.
Обзор современных методов обработки данных ДЗЗ для поисково-спасательных операций в лесных экосистемах…….…… 187

Лазарева И. М., Ляш О. И., Скалабан Е. В., Логинова Ю. А., Ткачев Н. В.
Использование спутниковых снимков для автоматического определения качества растительного покрова на территории Мурманской области…….…. 193

Лозин Д. В., Лупян Е. А.
Метод адаптации алгоритма детектирования пожаров *MOD*14 для работы с данными различных спутниковых систем……..... 197

Макаров Д. С., Харламов Д. В.,
Реушев М. Ю., Подопригора В. Г., Краснощеков К. В.
Исследование влияния температуры и солености ледовых покровов на рефлектометрические измерения сигналами навигационных спутников……. 203

Марданова Д. А., Мингалев А. В.
Разработка модуля обратимого дискретного вейвлет-преобразования для аппаратной реализации алгоритма сжатия изображений поверхности Земли……...…….…. 207

Пармузин Е. И., Агошков В. И., Шутяев В. П., Фомин В. В.
Одновременное усвоение данных наблюдений со спутников и профилей температуры для модели динамики Черного моря……... 212

Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Ёлкина Е. С.
Сравнительный анализ информативности спектрально-временных признаков для распознавания используемых пахотных земель России…… 216

Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А.
Определение даты сева яровых культур на основе разносезонной модели *LSTM* и рядов спутниковых данных высокого временного разрешения……..... 222

Тарасенков М. В., Энгель М. В., Белов В. В., Богданова А. С.
Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым данным с учетом влияния неоднородности коэффициентов отражения и перепада высот……...…… 228

Федоров Р. К., Авраменко Ю. В.
Инструмент разметки растровых геопространственных данных…… 233

Харламов Д. В., Макаров Д. С., Реушев М. Ю., Подопригора В. Г.
База калибровочных данных прямых сигналов навигационных спутников диапазона *L1* для расчетов коэффициентов погонного ослабления……. 237

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ…… 241

Богданова Я. А., Кавеленова Л. М., Рязанова Я. А.
Этапы формирования геоинформационной региональной базы растительности и перспективы ее использования в мониторинге ценных природных объектов.... 241

Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н.
О взаимосвязи фазовой мультидекадной изменчивости современного климата Земли с динамикой потоков тепла из Мирового океана в атмосферу…… 245

Гавловская Е. Р., Колодяжный М. В., Дунаева Е. А.
Обзор существующих цифровых баз данных почвенных показателей…….. 250

Графеев О. Е.
Облачные и ионосферные предвестники землетрясений: оценка достоверности и надежности…….. 255

Грищенко М. Ю., Маслаков А. А., Григорян А. Г., Алдошин И. А.
Индикация мерзлотных процессов по характеристикам растительного покрова на Чукотском полуострове…….. 259

Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Середа И. И., Зимин М. В., Истомин Д. А., Гасиян К. Э.
Изучение влияния развития экономически значимых патогенов на спектральные характеристики посевов озимой пшеницы…… 264

Данилова И. В., Буренина Т. А., Федотова Е. В.
Оценка точности воспроизведения компонентов водного баланса по данным реанализа *ERA5-Land*…….…….... 268

Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е.
Выявление опасных агрометеорологических явлений на территории России..…. 272

Им С. Т., Петров И. А., Демидко Д. А., Шушпанов А. С., Двинская М. Л.
Идентификация усыхания темнохвойных древостоев по данным съемки *MODIS*……. 280

Колодяжный М. В., Дунаева Е. А.
Оценка уровня вариации неоднородности посевов в годы разной водообеспеченности…….. 284

Константинова А. М., Бриль А. А., Лупян Е. А.
Восстановление мощности источника диоксида азота с учетом метеоусловий…. 289

Кузнецова А. С., Ерунова М. Г., Якубайлик О. Э.
Оценка состояния пахотных земель опытно-производственного хозяйства «Курагинское» на основе данных ДЗЗ……...…. 293

Лалетина С. О.
Выявление посевов опиумного мака в Афганистане по спутниковым данным высокого разрешения…… 297

Малюта О. Р.
Моделирование структуры и динамики городского острова тепла Москвы по данным дистанционного зондирования среднего разрешения…… 302

Мыльникова Т. А., Елсаков В. В.
Трансформация растительного покрова средней тайги в бассейнах рек Печоры и Вычегды……... 306

Перемитина Т. О., Ященко И. Г.
Спутниковый мониторинг восстановления экосистемы Крапивинского нефтяного месторождения после аварийного разлива нефти…… 310

Полежайкин И. А., Таранюк М. И., Мыльников Ю. П.
Применение данных крупномасштабной спутниковой съемки для мониторинга динамики антропогенных ландшафтов на территории нефтяных месторождений……...……. 314

Сафин К. И.
Пространственно-временной анализ пирогенных воздействий на федеральные ООПТ Среднего Поволжья в XXI веке..……. 319

Свердлик Л. Г.
Исследование динамики аномалий температуры в сейсмически активном регионе Центральной Азии……...……... 323

Склюева Н. М.
Дистанционная индикация борщевика Сосновского на выведенных из оборота сельскохозяйственных землях……...…….. 328

Скороходов А. В., Журавлёва Т. Б.
Взаимосвязь солнечно-индуцированной флуоресценции с параметрами окружающей среды для различных типов растительности юга Западной Сибири по данным реанализа и спутниковых наблюдений……..... 333

Степанов А. С., Бордаков А. С., Фомина Е. А., Асеева Т. А., Дубровин К. Н.
Мониторинг сельскохозяйственных полей Хабаровского края по данным ДЗЗ и наземных наблюдений……... 337

Ступин В. П., Хамедов В. А.
Морфодинамический анализ ЦМР *SRTM* для картографирования экзогенных геологических процессов Южного Прибайкалья……... 342

Фарбер С. К., Кузьмик Н. С.
Подбор лесотаксационных выделов для закладки пробных площадей на исследование пирогенных лиственничных насаждений……..……... 347

Хасанова Г. Ф.
Применение ГИС при оценке эрозионных процессов (на примере города Уфы)…. 352

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ……...…….. 356

Бронов С. А., Вайман М. А., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В.
Система многоканального управления исполнительными электроприводами космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли……. 356

Бронов С. А., Вайман М. А., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В.
Система управления с настраиваемыми параметрами для электропривода космических аппаратов дистанционного зондирования Земли…… 361

Вайман М. А., Бронов С. А., Рогкустов С. В.,
Никонов Д. А., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В.
Интеллектуальная система управления исполнительными устройствами космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли……. 367

Мухамеджанов И. Д., Врублевский М. В., Лупян Е. А.
Возможности спутникового мониторинга рек с помощью данных альтиметрии и космических гидропостов на примере реки Амударьи……...……... 372

Пестова Ю. В.
Автоматизация информационного процесса прогнозирования риска лесных пожаров на основе данных ДЗЗ и методов машинного обучения……..…….. 377

Трофимова А. В.
Разработка архитектуры и программная реализация геосервиса анализа данных с мультиспектральных и гиперспектральных оптических сенсоров…….. 381

Филиппов Н. И., Павлова Е. В.
Возможности применения БПЛА самолетного типа и *RGB*-съемки в сельском хозяйстве……. 384

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 528.8.04, 528.88

Е. В. Дмитриев[1], П. Г. Мельник[2], А. А. Соколов[3], С. А. Донской[4]
[1] Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия
[1] Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва, Россия
[2] Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
[3] Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale, Дюнкерк, Франция
[4] Рослесинфорг, Москва, Россия
[1]yegor@mail.ru, [2]melnik_petr@bk.ru,
[3]mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr, [4]lesshii@bk.ru

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Аннотация. Тематическая обработка многовременных мультиспектральных изображений среднего пространственного разрешения является важной частью комплексной системы дистанционного мониторинга лесной растительности, развиваемой нами в последние годы. В данной работе исследуются особенности использования мультиспектральных спутниковых изображений *Sentinel-2* для определения породного состава и возрастных классов древостоев на примере Валуйского лесничества (Белгородская область). Для решения данной задачи используются значения вегетационных индексов *NDVI*, *NDRE*, *CRI2* и *ARI2*, отражающих динамику основных типов пигментов листвы/хвои (хлорофилл, каротиноиды, антоцианы) в течение периода вегетации. Анализ изображений *Sentinel*-2 за период с 2017 по 2025 г. показал, что наибольшую информативность имеют данные съемки, охватывающие основные фенологические измерения лесной растительности. Проведено сравнение алгоритмов классификации различной сложности. По полученным оценкам, полная вероятности ошибки классификации доминантных пород составила 5,5 %, при этом средняя ошибка распознавания отдельных пород не превышает 19 %. Общая ошибка классификации возрастных классов составила около 20 %. Наибольшая ошибка возникает при распознавании возрастных классов средневозрастных древостоев (ошибка до 30 %), тогда как молодые и старые насаждения разделяются практически точно.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спектрально-временные признаки, многовременные изображения *Sentinel*-2, вегетационные индексы, классификация породного состава и возрастных классов

Мультиспектральные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли среднего (10–30 м) пространственного разрешения являются

© Дмитриев Е. В., Мельник П. Г., Соколов А. А., Донской С. А., 2025

одним из наиболее важных инструментов регионального мониторинга лесных территорий. Информация, получаемая с помощью таких систем, может быть использована для актуализации данных лесной таксации и оценки жизненного состояния древостоев, что обеспечивает экологическую безопасность и экономическую эффективность лесного сектора, а также выполнение ряда международных экологических обязательств. Так, в частности, регулярное поступление данных об изменениях видового состава лесной растительности и своевременного выявления деградации древостоев является важным условием, обеспечивающим работу систем контроля и поддержания биоразнообразия региональных экосистем. Мониторинг динамики биоразнообразия, распространения основных лесообразующих пород и продуктивности лесов имеет ключевое значение для оценки роли естественных изменений и антропогенного воздействия на глобальный климат [1].

Поскольку принятые на сегодняшний день наземные методы лесной таксации требуют значительных временных и финансовых затрат, внедрение автоматизированных методов тематической обработки спутниковых изображений обеспечивает более регулярное обновление информации, что, в свою очередь, способствует повышению точности кадастрового учета и лесохозяйственного планирования. Несмотря на то, что на сегодняшний день известны различные эффективные методы тематической обработки спутниковых изображений, универсального подхода, пригодного для всех задач и регионов исследования, не существует [2]. Таким образом, разработка эффективных алгоритмов обработки, адаптированных под конкретные условия применения, остается сложной и актуальной научной проблемой.

В данной работе рассматриваются две основных задачи, связанные с возможностью дистанционного определения породного состава (на уровне доминантной и субдоминантной пород) и возрастных классов древостоев в пределах лесотаксационных выделов. Анализ публикаций последних 10 лет показывает, что наиболее перспективные методы распознавания породного состава древостоев по дистанционным данным основываются на анализе многовременных мультиспектральных изображений среднего пространственного разрешения. Так, в частности, анализ результатов определения породного состава лесов южной части Франции [3] по изображениям *Formosat-2*, показывает высокую эффективность данного подхода, в том числе и в сравнении с подходами, на основанными на обработке гиперспектральных изображений [4].

В качестве района исследований выбрана территория Валуйского лесничества, расположенного на юго-востоке Белгородской области. Леса данного района относятся к степной и лесостепной зонам с преобладанием широколиственных пород, лесистость составляет примерно 8 %, общая площадь объектов лесоустройства составляет 20,2 га (~5,5 тыс. лесотаксационных выделов). Используемые нами данные лесоустройства были актуализированы в 2015 г. Для проведения расчетов мы рассматривали только выделы с площадью не менее 0,1 га, имеющие информацию о доминантной породе,

классе возраста, бонитете и полноте. Всего данным условиям удовлетворяют 4 402 выдела.

Породный состав древостоев Валуйского лесничества довольно разнообразен. По имеющимся данным, всего насчитывается 24 доминантных вида, среди которых наибольшую площадь занимают дуб черешчатый, сосна обыкновенная, ясень обыкновенный и осина. Возрастная структура наиболее полно представлена для дубовых древостоев. При рассмотрении выделов с полнотой более 0,7, первые 6 возрастных классов занимают площади от 161 до 6 254 га, что позволяет получить репрезентативные данные о разделимости возрастных классов по спектрально-временным признакам.

Для построения спектральных характеристик древостоев мы использовали мультиспектральные спутниковые изображения *Sentinel-2*, полученные для обследуемой территории за период с 2017 по 2025 г. (относительный номер орбиты – 21). Преимущества использования *Sentinel-2* демонстрируется во многих работах последних лет. Так, в частности, было установлено, что использование изображений *Sentinel-2* обеспечивает большую точность картирования видового состава лесов северной части Китая по сравнению с мультиспектральными данными *Landsat OLI* [5]. При проведении расчетов нами использовались спектральные каналы видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на уровне обработки L2A – отражательная способность на нижней границе атмосферы. Пространственное разрешение соответствующих изображений составляет 10 м. Для каналов красного края производилась передискретизация с 20 на 10 м с помощью билинейной интерполяции.

Для обеспечения наилучшей гармонизации спектральных характеристик мы рассматривали только базовые линии обработки: 0500, 0509, 0510 и 0511, в которых используется единая основа для алгоритмов топографической коррекции, устранения атмосферных искажений (аэрозоли, водяной пар, рэлеевское рассеяние) и базовой классификации, включая распознавание орографических теней, облачности и теней от облаков. Улучшения в более поздних версиях связаны с обновлением таблицы атмосферных параметров и усовершенствованием топографической коррекции в горных районах. Сравнение различных базовых линий для выбранной тестовой даты показало, что для 95 % пикселей различие отражательной способности не превышает 5 %, а среднее различие составляет 1 %.

В качестве спектральных признаков рассматривались вегетационные индексы (ВИ). По результатам тестовых расчетов были выбраны 4 индекса, которые имеют высокую чувствительность к фенологическим изменениям лесной растительности. Расшифровка обозначений и расчетные формулы ВИ представлены в табл. 1. Выбранные ВИ в различной степени чувствительны к изменениям состояния внутренней структуры тканей листа и концентрации пигментов.

Таблица 1

Расчетные формулы ВИ, используемых для расчетов

Вегетационный индекс	**Расчетная формула**
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$
NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$
*ARI*2 *(Anthocyanin Reflectance Index 2)*	$ARI2 = NIR \cdot \left(\frac{1}{G} - \frac{1}{RE} \right)$
*CRI*2 *(Carotenoid Reflectance Index 2)*	$CRI2 = \frac{1}{B} - \frac{1}{RE}$

Нормализованный разностный вегетационный индекс *NDVI* характеризует биомассу органов фотосинтетической деятельности растений. Нормализованный разностный индекс красного края *NDRE* связан с концентрацией хлорофиллов и косвенным образом характеризует поглощение азота. Индекс *NDRE* является хорошим индикатором изменения жизненного состояния растений.

Индексы *ARI*2 и *CRI*2, соответственно, характеризуют изменение концентрации антоцианов и каротиноидов в листьях деревьев. В процессе старения листа, а также при ослаблении вследствие влияния стрессовых факторов наблюдается снижение концентрации хлорофилла, однако при этом концентрации антоцианов и каротиноидов могут некоторое время оставаться без изменений или даже несколько повышаться. Динамика изменений существенным образом зависит от вида растения, таким образом, привлечение данных индексов дает важную дополнительную информацию при определении породного состава древостоев.

В процессе тематической обработки многоспектральных изображений среднего пространственного разрешения с использованием спектрально-временных признаков решается последовательность задач обучаемой классификации по мере увеличения сложности [6]. В данной работе мы рассматриваем упрощенную схему обработки. На первом этапе производится сегментация вечнозеленых и листопадных групп деревьев. Затем для каждой из групп производится обучаемая классификация по породному составу с использованием информации о характерных последовательностях наступления фенологических явлений [7].

Выбор алгоритма классификации является важным фактором, влияющим на точность картирования объектов исследования. Мы рассмотрели три нелинейных алгоритма обучаемой классификации, обладающих различной точностью и вычислительной эффективностью, а именно: квадратичный дискриминантный анализ (*QDA*), оптимизированный метод *k* ближайших соседей (*KNN*) и полносвязную нейронную сеть (*FCNN*) [8]. Метод *QDA* обладает ограниченными возможностями аппроксимации дискрими-

нантной поверхности для признаков с распределением отличным от нормального, однако при этом обладает большей скоростью и не требует сбалансированности обучающих данных.

Методы *KNN* и *FCNN* позволяют сформировать достаточно сложные дискриминантные поверхности, но имеют более низкую вычислительную эффективность. Для обеспечения сбалансированности обучающих данных мы использовали метод *SMOTE* (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*), который позволяет достичь повышения точности по сравнению с методами удаления реализаций и уменьшает вероятность переобучения по сравнению с методом случайного копирования. Проведенные нами тестовые эксперименты на искусственных данных, полученных с помощью статистического моделирования, показали, что для наиболее сложных случаев *KNN* и *FCNN* имеют наибольшую точность, по сравнению с рядом других известных классификаторов.

Для сегментации группы вечнозеленых видов деревьев можно использовать единственный снимок в поздний осенний или ранний весенний период. При этом в некоторых случаях могут происходить ошибки, связанные с наличием участков высокой степени смешения хвойных и лиственных пород, а также нахождения определенных видов деревьев во втором ярусе. В нашем случае для сегментации вечнозеленых видов использовались индексы *NDVI* и *NDRE*, рассчитанные по снимкам от 08.03.2025, 14.11.2023 и 15.11.2019. Оценки точности сегментации, полученные методом кросс-валидации, составили 100 % при использовании каждого из указанных снимков. Однако использование нескольких снимков одновременно позволило практически исключить ошибки вне контуров выделов, связанные наличием озимых сельскохозяйственных культур.

Основная часть насаждений Валуйского лесничества относится к лиственным породам. Для оценки точности классификации породного состава были выбраны основные породы, которые занимают значительные площади при условиях высоких значений бонитета (1 и 2) и полноты (от 0,7), а именно: дуб черешчатый, ясень обыкновенный, осина, ольха черная, клен остролистный, акация белая и береза бородавчатая. Для данных пород были выбраны репрезентативные участки с однородным породным составом (как правило выделы с лесокультурами 3–6 классов возраста), по которым произведен расчет статистических характеристик вегетационных индексов за различные даты съемки. Распределение средних значений вегетационных индексов данных пород в течение периода вегетации представлено на рис. 1. Точками обозначены данные наблюдений за различные годы, а кривым соответствуют модельные значения, рассчитанные на основе регрессии гауссовских процессов.

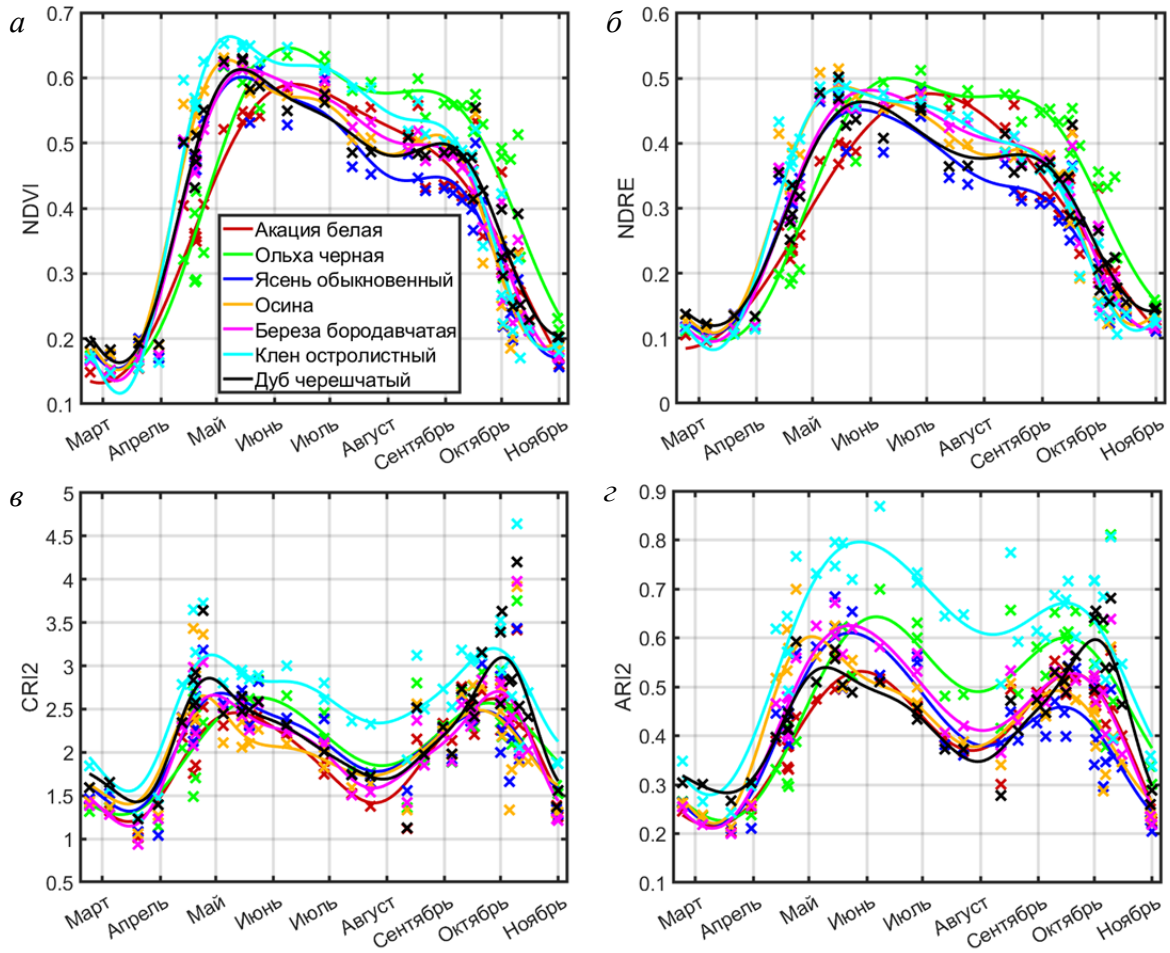


Рис. 1. Наблюдаемые (цветные крестики) и модельные (цветные кривые) значения вегетационных индексов основных лиственных пород на территории Валуйского лесничества: *а – NDVI*; *б – NDRE*; *в – CRI*2; *г – ARI*2

Можно видеть, что наибольшую информативность для классификации породного состава имеют изображения за первые половины мая и октября. Например, динамика *NDVI* и *NDRE* показывает более позднее наступление периода массовой расцветки листвы у ольхи черной и дуба черешчатого, по сравнению с другими породами. Распускание листвы позже всего наступает в насаждениях акации белой.

Даты наступления фенологических изменений березы бородавчатой, ясеня обыкновенного и осины существенным образом пересекаются, при этом для данных пород различным образом меняется соотношение концентраций каротиноидов и антоцианов [9]. Для клена остролистного в целом можно видеть более высокие значения индексов каротиноидов (*CRI2*) и антоцианов (*ARI2*), по сравнению с другими породами. Таким образом, съемка за конец августа также может быть полезна для сегментации древостоев с преобладанием клена остролистного. Выраженное одновременное увеличение *CRI2* и *ARI2* можно отметить в период массовой расцветки листьев дуба. Наименьшую информативность имеют снимки в период с конца мая по начало июля.

Характер распределения рассмотренных вегетационных индексов существенным образом меняется в течение вегетационного периода (рис. 2).

Так, в весенний и осенний период происходит кластеризация значений вегетационных индексов, соответствующих насаждениям дуба черешчатого (рис. 2, *б* и 2, *г*). Данный эффект исчезает в летний период (рис. 2, *в*). Также следует отметить хорошую корреляцию индексов *NDVI* и *NDRE* для всех рассматриваемых пород (рис. 2, *а*).

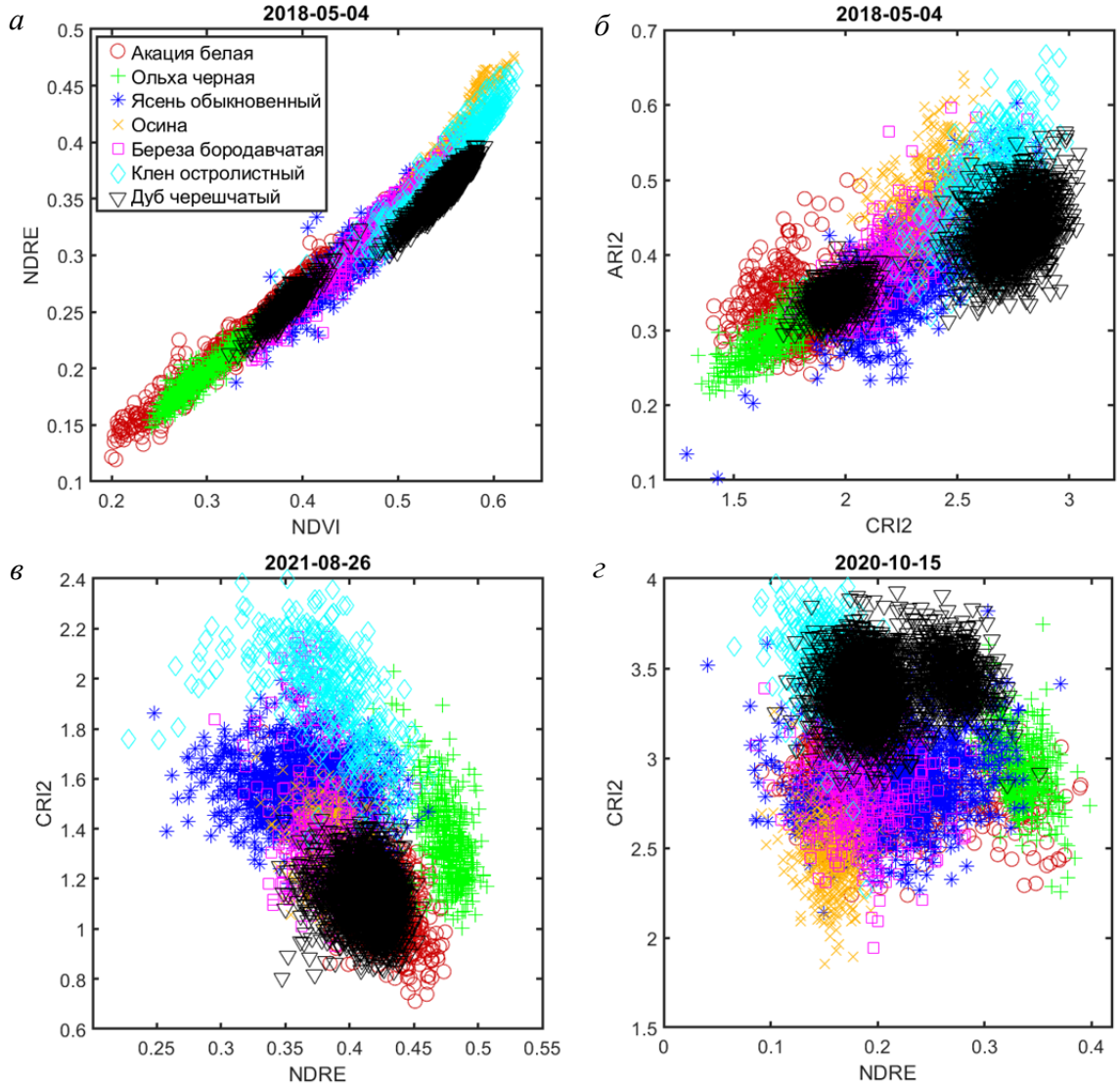


Рис. 2. Распределение вегетационных индексов рассматриваемых лиственных пород деревьев за различные даты в течение периода вегетации: *а* – индексы *NDVI* и *NDRE* за 04.05.2018; *б* – индексы *CRI*2 и *ARI*2 за 04.05.2018; *в* – индексы *NDRE* и *CRI*2 за 26.08.2021; *г* – индексы *NDRE* и *CRI*2 за 15.10.2020

Для оценки качества классификации использовались оценки ошибки «пропуска цели» (*OE – omission error*) и «ложной тревоги» (*CE – commission error*) для каждой рассматриваемой породы, а также полная вероятность ошибки (*TE – total error*), полученные с помощью метода кросс-валидации *K-Folds*. Для сравнения методов вводится также ошибка *OCE*, представляющая собой среднее арифметическое ошибок *OE* и *CE*. Результаты сравнения точности рассматриваемых методов классификации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние ошибки *OCE* классификации лиственных пород различными методами

Метод	Акация белая	Ольха черная	Ясень обыкн.	Осина	Береза бородав.	Клен острол.	Дуб череш.
QDA	0,049	0,016	0,160	0,026	0,190	0,017	0,011
KNN	0,035	0,008	0,130	0,028	0,170	0,017	0,008
FCNN	0,029	0,0051	0,130	0,017	0,160	0,007	0,004

Метод *QDA* показал наибольшую скорость обработки и наименьшую точность для всех рассматриваемых пород деревьев. Полная вероятность ошибки составила 7 %. Методы *KNN* и *FCNN* показали сопоставимые точности. Соответствующие ошибки составили 5,5 % и 5,0 %. Учитывая высокие вычислительные затраты на обучение *FCNN*, для дальнейших расчетов будем использовать метод *KNN*. В целом следует отметить, что выбор метода классификации не является определяющим для повышения точности решения данной задачи, по сравнению с оптимизацией используемых признаков. Подобный вывод делается также в работе [3].

Таблица 3

Ошибки «пропуска цели» и «ложной тревоги» при распознавании породного состава с использованием классификатора *KNN*

Ошибка	Акация белая	Ольха черная	Ясень обыкн.	Осина	Береза бородав.	Клен острол.	Дуб череш.
OE	0,037	0,004	0,120	0,024	0,180	0,016	0,005
CE	0,034	0,012	0,130	0,031	0,160	0,018	0,012

По результатам, представленным в табл. 3, можно видеть, что для всех рассматриваемых пород отсутствует существенный дисбаланс между ошибками «пропуска цели» и «ложной тревоги». Наибольшая точность ожидается при классификации дуба черешчатого и ольхи черной. Сложнее всего разделяются ясень обыкновенный и береза бородавчатая.

Среди хвойных пород на данном участке присутствуют сосна обыкновенная, сосна крымская и ель обыкновенная. Поскольку выделы с преобладанием ели на рассматриваемой территории занимают довольно малую площадь, данная порода была исключена из рассмотрения. Для получения оценки точности классификации сосны обыкновенной и сосны крымской использовались только изображения за март и ноябрь, поскольку в выделах с доминированием сосны крымской происходит значительное смешение с лиственными породами. Для всех рассмотренных изображений индекс *ARI2* оказался неинформативным при классификации хвойных пород. Полная вероятность ошибки классификации с помощью *KNN* составила 5 %. Дисбаланс между ошибками «пропуска цели» и «ложной тревоги» составил 1,5 %.

В основе классификации возрастных классов древостоев по спектральным признакам лежат характерные изменения относительной концентрации пигментов в листве или хвое. Поскольку основную часть древостоев Валуйского лесничества занимает дуб черешчатый, для оценки возможности решения данной задачи мы рассмотрели данную породу. Нам удалось получить репрезентативные выборки спектральных характеристик первых шести возрастных классов, содержащие более 1 500 экземпляров для каждого класса. Следует отметить, что рассматривались только древостои с полнотой не ниже 0,7 и бонитетом не менее 2.

Для листвы молодых насаждений дуба (класс 1) характерны более высокие значения концентрации хлорофилла и минимальные концентрации антоцианов. Средневозрастные насаждения (классы 3–5) характеризуются более высокой концентрацией каротиноидов, а при дальнейшем увеличении класса возраста (6 и более) значительно возрастает отношение концентрации антоцианов к концентрации каротиноидов.

Полная вероятность ошибки классификации возрастных классов составила 18 %. Наименьшая средняя ошибка *OCE* соответствует возрастным классам 1 и 6 и составляет 8 %. Возрастные классы 2 и 5 распознаются значительно хуже, *OCE* составляет величину 16–18 %. Наименьшая точность соответствует возрастным классам 3 и 4, средняя ошибка находится в районе 30 %. При этом следует отметить, что анализ матрицы ошибок показывает, что основная неопределенность возникает при разделении именно соседних возрастных классов. Так, древостои возрастных классов 1 и 6 могут быть разделены с точностью более 99 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Отделения Московского центра фундаментальной и прикладной математики в ИВМ РАН (Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2025-347).

Список источников

1. Bonan G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. V. 320. No. 5882. P. 1444–1449.

2. Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review // Journal of plant ecology. 2008. V. 1, N 1. P. 9–23.

3. Sheeren D., Fauvel M., Josipović V., Lopes M., Planque C., Willm J., Dejoux J. F. Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series // Remote Sensing. 2016. V. 8, N 9. P. 734.

4. Ghiyamat A., Shafri H. Z., Mahdiraji G. A., Shariff A. R. M., Mansor S. Hyperspectral discrimination of tree species with different classifications using single- and multiple-endmember // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2013. V. 23. P. 177–191.

5. Wang M., Zheng Y., Huang C. et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China // Forest Ecosystems. 2022. V. 9. Article 100032.

6. Дмитриев Е. В., Кондранин Т. В., Мельник П. Г., Донской С. А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 2070–7401.

7. Сезонная жизнь природы Русской равнины. Календари природы Нечерноземной зоны РСФСР за 1960–1972 гг. / ред. Тавровский В. А. Л. : Наука, 1979. 163 с.

8. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, 2nd ed., New York: Springer, 2009. 745 p.

9. Белова Т. А., Бабкина Л. А. Изменение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях древесных растений средней полосы России // Auditorium. 2017. № 2 (14). С. 34–38.

E. V. Dmitriev[1], P. G. Melnik[2], A. A. Sokolov[3], S. A. Donskoy[4]

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

[1] State scientific Institution Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow, Russia

[2] Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

[3] Laboratoire de PhysicoChimie de l'Atmosphère Université du Littoral Cote d'Opale, Dunkerque, France

[4] Roslesinforg, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[1]yegor@mail.ru, [2]melnik_petr@bk.ru,

[3]mailto:anton.sokolov@univ-littoral.fr, [4]lesshii@bk.ru

SPECIFICITY OF USING SPECTRAL-TEMPORAL FEATURES FOR RETRIEVING FOREST INVENTORY PARAMETERS FROM SATELLITE DATA

Abstract. Thematic processing of multi-temporal multispectral medium-resolution imagery is a key component of the multi-sensor remote monitoring system for forest vegetation assessment that we have developed in recent years. This study explores the use of Sentinel-2 multispectral satellite data to recognize species composition and age classes of forest stands in the Valuyskoye forestry (Belgorod region, Russia). To address this task, we analyzed vegetation indices (NDVI, NDRE, CRI2, and ARI2), which reflect the seasonal dynamics of key foliar pigments (chlorophyll, carotenoids, and anthocyanins) during the growing season. Analysis of Sentinel-2 imagery from 2017 to 2025 revealed that data capturing major phenological stages of forest vegetation yielded the highest informational value. We compared classification algorithms of varying complexity and found that the overall classification error for dominant species was 5.5%, while the average error for individual species recognition remained below 19%. Age class classification had a total error of approximately 20 %. The highest misclassification rates occurred in middle-aged stands (up to 30 % error), whereas young and mature stands were discriminated with near-perfect accuracy.

Keywords: Remote sensing, pattern recognition, spectral-temporal features, Sentinel-2 multi-temporal images, vegetation indices, classification of species composition and age classes

УДК 004.89

Б. С. Добронец[1], О. А. Попова[2]
[1, 2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]bdobronets@yandex.ru, [2]OlgaArc@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Описаны современные подходы к повышению качества научных исследований. Подходы основаны на использовании больших лингвистических моделей, интеллектуальных помощников для поиска аналогий и в методах мозгового штурма.

Ключевые слова: искусственный интеллект, большие лингвистические модели, интеллектуальные помощники, аналогии, мозговой штурм

Введение. То, что в последние годы произошла революция в искусственном интеллекте (ИИ), не вызывает сомнений. Прогнозы о возможностях ИИ и больших языковых моделей имеют разные оценки: от легкого пессимизма [1; 2] до достижения в ближайшие годы точки момента, когда искусственный интеллект, основанный на больших лингвистических моделях, превзойдет человеческий разум, что приведет к стремительному росту технологий и необратимым изменениям в обществе [3; 4].

Большая языковая модель (*LLM, Large language model*) – это тип программы искусственного интеллекта, которая может распознавать и генерировать текст. Программу обучают на больших объемах данных: книгах, статьях, веб-сайтах и других текстовых ресурсах. Эти данные обычно включают широкий круг тем: от научных статей до художественной литературы, так чтобы модель могла работать с разными стилями и контекстами. Примеры больших языковых моделей: *ChatGPT* от *OpenAI*, *YandexGPT* от «Яндекса», *GigaChat* от «Сбера».

Интеграция больших языковых моделей (*LLM*), в частности *ChatGPT*, в научные исследования привлекает значительное внимание. Эти модели дают возможности, которые возможно изменят подходы в научных исследованиях. В работе [5] утверждается, что языковые модели могут быть использованы для оценки перспектив научных идей еще до их фактической реализации, что значительно повышает эффективность исследований. В работе [6] показаны возможности относительно потенциала *LLM* для ускорения научных открытий.

Работа с *LLM* во многом зависит от правильных запросов, инструкций, подсказок (*prompt*), которые, как правило, представляют текст на естественном языке, описывающий задачу, которую должен выполнить ИИ.

Например, *Prompt Engineering* – это процесс создания инструкции для получения наилучшего результата от *LLM*. *Prompt Engineering* – основа

© Добронец Б. С., Попова О. А., 2025

следующего шага к автоматизации запросов к *LLM* и созданию ИИ-помощников [7].

Рассмотрим более подробно две проблемы, демонстрирующие возможность применения *LLM* на практике.

Первая проблема, для решения которой можно с успехом использовать *LLM*, – интеллектуальный поиск информации в научных текстах. Традиционные системы поиска текста не могут эффективно искать математические выражения, поскольку они часто содержат формулы от простых символов до сложных структур [8; 9].

Вторая проблема связана с поиском креативных решений, в том числе с помощью методов мозгового штурма.

Поиск аналогий. Рассмотрим более подробно поиск аналогий в научных текстах.

Аналогия – это способ мышления, при котором знание, полученное в одном контексте, переносится и применяется к другому, частично сходному контексту. В когнитивной науке аналогии рассматриваются как важнейший инструмент понимания, обучения и научного открытия. Они позволяют устанавливать связи между разными концептуальными областями, выявлять скрытые закономерности и упрощать сложные системы через проекцию известных структур на новые [9].

Научная информация отличается высокой степенью структурированности и формализации. Это выражается не только в языке и терминологии, но и в специфических форматах представления знаний, таких как формулы, таблицы, графики, списки определений и цитирования. Корректная интерпретация научного текста требует от системы понимания как естественного языка, так и логико-математической структуры, которая передает суть содержания. Поэтому выбор формата представления информации является ключевым этапом в задачах анализа, извлечения знаний и интеллектуального поиска аналогий.

Преимущества использования LaTeX. Одним из наиболее распространенных и признанных форматов представления научного текста является *LaTeX* – язык разметки, предназначенный для набора текстов с формулами и сложной структурой. Он получил широкое распространение в математике, физике, информатике, экономике и других дисциплинах.

В этом контексте предварительная подготовка текста играет критическую роль. Перевод статьи в формат *LaTeX* позволяет сохранить ее структуру, включая формулы и блоки. Далее следует предобучить большую лингвистическую модель на научных текстах в формате *LaTeX*.

Включение в запрос к *LLM* на поиск формул формате в *LaTeX* позволяет получить значительно более релевантные ответы.

Так, на запрос поиска аналогий оценки точности численного решения некоторого процесса, удовлетворяющей разложению:

$$y = y^h + C_1 h^2 + C_2 h^4 \ldots$$

были найдены материалы использования правила Рунге и методику их применения для оценки точности численных квадратур интегралов, дифференциальных уравнений, ядерных оценок функций плотности вероятности.

Мозговой штурм. Мозговой штурм («брейнсторминг» от англ. *brainstorming*) – это техника, которая позволяет генерировать новые идеи и находить творческие решения. Она играет важную роль в развитии инноваций и успеха в бизнесе. Суть техники: придумать и записать максимально возможное количество предложений от каждого члена команды. В конце встречи из полученного списка участники выбирают самые удачные идеи, которые можно протестировать на практике [10].

Генеративные нейронные сети открывают новые перспективы для повышения эффективности и расширения возможностей мозгового штурма, выступая не как замена человеческому интеллекту, а как мощный инструмент, дополняющий и усиливающий его.

В отличие от методов, где генерация идей полностью зависит от человеческого разума, *LLM* способны создавать идеи, опираясь на анализ больших объемов данных, выявляя скрытые закономерности и предлагая неожиданные, нетривиальные решения.

Для целей взаимодействия пользователей с *LLM*, на основе методов *Prompt Engineering*, предлагается использовать интеллектуальный помощник [11; 12]. Он позволяет классифицировать идеи по категориям, выявлять дубликаты и подсвечивать наиболее оригинальные или релевантные предложения. В конечном итоге такой подход позволяет не только генерировать больше идей, но и значительно улучшать их качество за счет постоянной обратной связи и аналитической поддержки со стороны интеллектуальной системы.

Проведенное тестирование интеллектуального помощника показало, что связка:

пользователь ↔ интеллектуальный помощник ↔ *LLM*

позволяет получать конкурентные решения сложных задач путем итерационного уточнения в рамках мозгового штурма.

Заключение. Большие языковые модели становятся ключевыми инструментами в задачах интеллектуального научного поиска. Они позволяют перейти от поверхностного сравнения ключевых слов к глубинному смысловому сопоставлению идей, концепций и методов, даже если они заимствованы из разных дисциплин. Интеллектуальные помощники, основанные на *Prompt Engineering*, позволяют эффективно использовать методы мозгового штурма научных исследованиях.

Подобную методику можно расширить для поиска новых перспективных тем в научных исследованиях, оценивать качество научных исследований.

Список источников

1. https://www.gartner.com/en/documents/5505695.
2. GSM-Symbolic: Understanding the Limitations of Mathematical Reasoning in Large Language Models // arXiv:2410.05229v1 [cs.LG] 7 Oct 2024.
3. Когда машины захватят мир: что такое технологическая сингулярность и почему она может быть опасной для человечества. URL: https://www.securitylab.ru/analytics/538679.php.
4. Altman S. The Gentle Singularity // https://blog.samaltman.com/the-gentle-singularity.
5. Collins K. Evaluating Language Models for Mathematics through Interactions // arXiv:2306.01694v1 [cs.LG] 2 Jun 2023.
6. Si C., Yang D., Hashimoto T. Can LLMs Generate Novel Research Ideas? // arXiv:2409.04109v1 [cs.CL] 6 Sep 2024.
7. Phoenix J. Taylor M. Prompt Engineering for Generative AI. O'Reilly Media, Inc. 2024 pp. 422.
8. Муромский А. А., Моисеев Е. И., Тучкова Н. П. Применение метода аналогий для поиска в научной информационной сети // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции (19–24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). М. : ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. С. 284–289. doi:10.20948/abrau-2016-23.
9. Уемов А. И. Аналогия в практике научного исследования. Из истории физико-математических наук. М.: Наука. 1970. 262 с.
10. Memmert, L.; Mies J.; Bittner E,, Brainstorming with a Generative Language Model: The Role of Creative Ability and Tool-Support for Brainstorming Performance (2024). ICIS 2024 Proceedings.
11. Prompt Engineering For Chatgpt. A Quick Guide To Techniques, Tips, And Best Practices Learn from the Best: Let Genie (ChatGPT) teach you how to make wise Wishes (Prompts).
12. Unlocking the Power of Agent GPT: Generating High-Quality Prompts.

B. S. Dobronets[1], O. A. Popova[2]
[1, 2]Institute of Space and Information Technology SFU, Krasnoyarsk, Russia
[1]bdobronets@yandex.ru, [2]OlgaArc@yandex.ru

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR ADVANCED SCIENTIFIC RESEARCH

Abstract. The article describes modern approaches to determining the quality of scientific research. The approaches are based on the use of large linguistic models, intelligent assistants for searching for analogs and in brainstorming methods.

Keywords: artificial intelligence, Large Language Models, intelligent assistants, analogies, brainstorming

УДК 528.88:630*43

Д. В. Лозин[1], Е. А. Лупян[2]
[1, 2]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]lozin@d902.iki.rssi.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПОЖАРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСОВ

Аннотация. В работе представлен общий обзор подходов к оценке интенсивности горения с использованием спутниковых наблюдений на основе использования ставшей уже традиционной характеристики *FRP* (*Fire Radiative power*). Представлен краткий анализ используемых методов оценки *FRP*. Основное внимание в работе уделяется вопросам связи интенсивности горения природных пожаров с повреждениями лесного покрова. Представлены подходы, разработанные в ИКИ РАН для получения количественных оценок данных связей на основе совместного анализа информации об интенсивности горения, площадях, пройденных лесными пожарами и повреждениях лесного покрова. Обсуждаются реализованные на основе предлагаемых подходов методы оценки площадей, пройденных огнем и потенциальных повреждений лесного покрова. В работе представлены некоторые оценки характеристик лесных пожаров, полученные на основе предлагаемых методов, в том числе приведены результаты анализа особенностей повреждений лесов пожарами как на территории России, так и в северных лесах циркумполярной зоны в период с 2001 по 2022 г., а также результаты анализа особенностей повреждения лесов пожарами в различные периоды пожароопасного сезона. В заключение доклада представлены перспективы дальнейшего развития методов анализа информации об интенсивности горения для оценки различных характеристик природных пожаров и их последствий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пожар, *FRP*, степень повреждения лесов, спутниковый мониторинг, Северный полярный круг, Арктическая зона, индекс сезонной летальности лесных пожаров

Введение. Среди различных характеристик лесных пожаров информация об интенсивности горения может быть использована для оценки повреждений растительного покрова пожарами. Получение таких оценок является важной задачей, актуальность решения которой сильно возросла в последние годы. Это произошло в том числе в связи с проблемами, связанными с мониторингом выбросов углерода в атмосферу, происходящих в результате действия лесных пожаров.

В настоящей работе представлена разработанная система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия (далее – Система). Представлены результаты анализа данных, полученных с применением представленной Системы: сравнение динамики повреждений лесов от пожа-

© Лозин Д. В., Лупян Е. А., 2025

ров для глобальных северных регионов и сезонная динамика показателя летальности пожаров (отношение площади погибшей от пожаров растительности к площади, пройденной огнем), действующих на территории РФ.

Используемые в Системе данные. Основным источником входных данных для разработанной Системы является оперативная база данных (БД) пожаров, формируемая на основе шестой коллекции данных приборов *MODIS* (*Collection* 6 *MODIS Active Fire* / *Hotspot Data* (*MCD*14*DL*)) (*http://earthdata.nasa.gov*). Особенности построения данной БД достаточно подробно описаны, в частности, в работе [1]. Для каждой горячей точки (пожарный пиксель сцены *MODIS*, ГТ) в БД имеется информация об интенсивности горения, наблюдавшейся в данной точке, количественно выраженной в величине *FRP* (*Fire Radiative Power*) [2; 3], а также дата регистрации ГТ и ее фактический размер в зависимости от угла сканирования прибора. Для того, чтобы можно было сопоставлять информацию, приходящую от пикселей разного размера, далее в методе используется значение *FRP*, поделенное на площадь пикселя (*FRPS*), т. е. удельный поток с единицы площади для наблюдаемой ГТ. Данная БД также содержит информацию о группах ГТ, объединенных по пространству и времени. Другим типом входных данных является ежегодно обновляемая карта территории Российской Федерации, содержащая информацию об основных типах лесного покрова [4].

Формируемые информационные продукты. Реализованная в Системе общая схема анализа данных представлена на рис. 1. В ее основе лежит метод оценки постпожарных повреждений по интенсивности горения [5]. Разработанная Система в настоящее время позволяет в полностью автоматическом режиме формировать следующие информационные продукты:

– ежедневно обновляемые карты максимального *FRPS* на территории Российской Федерации;

– ежедневно обновляемые карты прогнозируемых постпожарных повреждений лесной растительности на территории Российской Федерации;

– ежедневно обновляемые оценки площади погибшей лесной растительности в результате действия пожаров на территории Российской Федерации с возможностью получения соответствующих оценок для различных Федеральных округов, регионов, районов, лесничеств и конкретных пожаров;

– соответствующие ряды карт и оценок, полученные по архивным данным с 1 января 2001 г. (рис. 2).

Результаты анализа сформированных информационных продуктов. На основе сформированных продуктов был проведен анализ сезонной динамики повреждений лесного покрова пожарами (рис. 3). Приведены данные для лесов с различными видами преобладающих пород и для пожаров, действующих в различные месяцы. Показано, что летальность весенних и летних пожаров может различаться почти в 6 раз. В частности, это приводит к тому, что на летние месяцы приходится более 80 % площадей сильных повреждений, связанных с лесными пожарами, при этом около 50 % таких площадей приходится на июль.

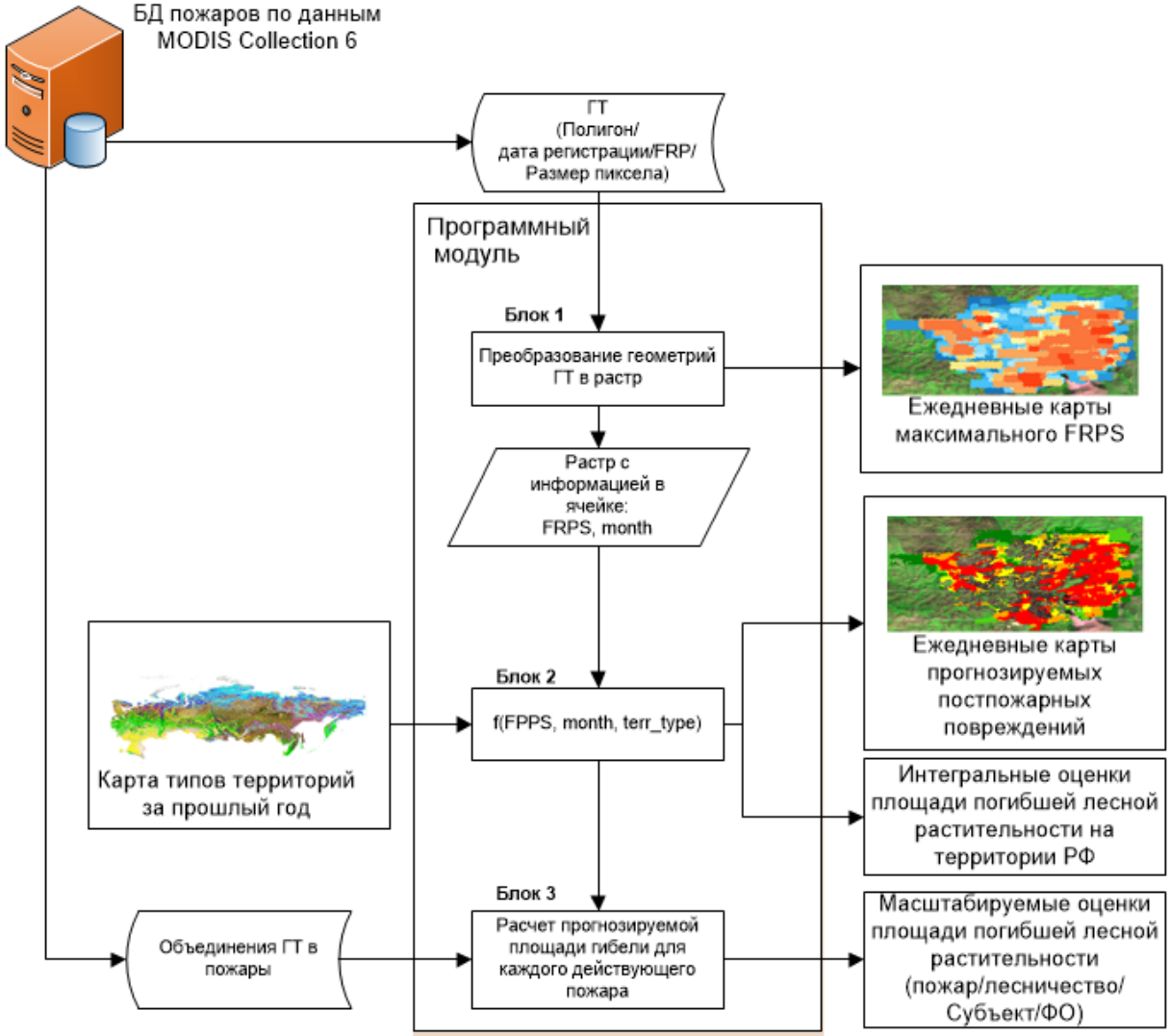


Рис. 1. Общая схема алгоритма автоматизированной оценки возможных повреждений лесного покрова на основе данных спутниковых наблюдений интенсивности горения

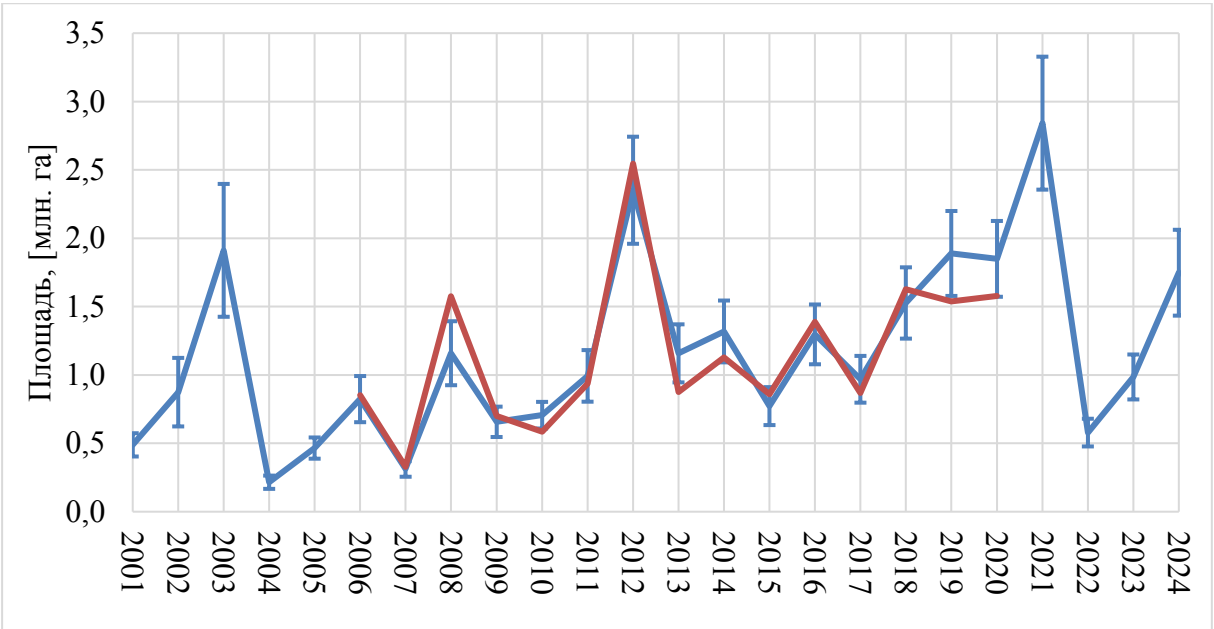


Рис. 2. Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2024 г., полученные на основе анализа *FRPS* (голубой график) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров (красный график)

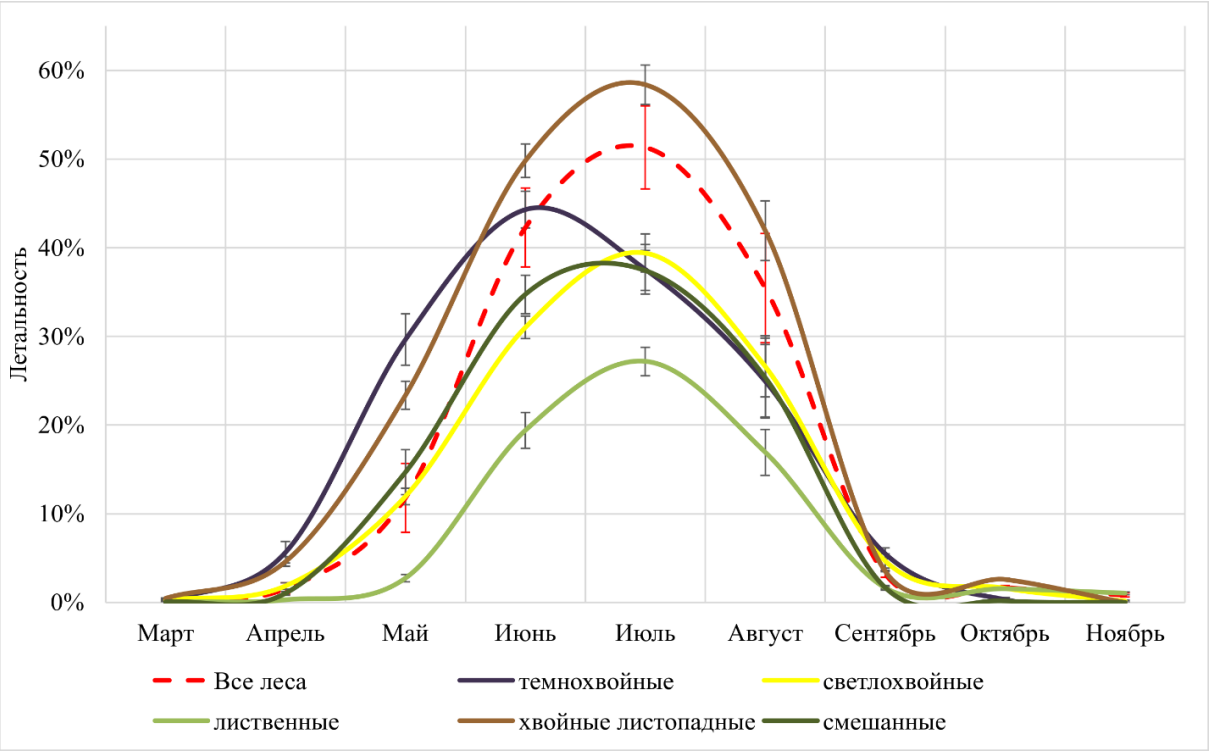


Рис. 3. Сезонная динамика средних значений летальности по месяцам для лесов с различной преобладающей породой

Применение метода полностью автоматизированной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе оценок вероятности гибели лесов от интенсивности горения к данным *MODIS*, покрывающим территорию северных стран (севернее 60 с. ш., далее – Зона 60, и севернее полярного круга, далее – Зона ПК), позволило впервые сравнить межгодовую динамику интегральных оценок площадей погибшей от пожаров растительности для различных глобальных регионов в XXI в. (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения в анализируемых зонах за периоды 2002–2011, 2012–2021 и 2002–2021 гг. (площади погибшей лесной растительности (тыс. га) / процента площади погибших лесов от площади лесов страны в соответствующей зоне / процента площади погибших лесов от площадей пройденных огнем лесов)

Период	**Канада**	**Европа**	**Россия**	**США**
Зона 60				
2002–2011 гг.	140 / 0,16 % / 26,4 %	6 / 0,01 % / 9,2 %	359 / 0,01 % / 16,1 %	196 / 0,39 % / 26 %
2012–2021 гг.	196 / 0,22 % / 24,5 %	4 / 0,01 % / 8,8 %	1 211 / 0,32 % / 22,8 %	114 / 0,22 % / 25,7 %
2002–2021 гг.	168 / 0,19 % / 25,2 %	5 / 0,01 % / 9,0 %	785 / 0,2 % / 20,8 %	155 / 0,31 % / 25,9 %

Окончание табл. 1

Период	Канада	Европа	Россия	США
Зона ПК				
2002–2011 гг.	12 / 0,12 % / 26,4 %	2 / 0,02 % / 13,4 %	12 / 0,03 % / 14,9 %	38 / 0,56 % / 29,9 %
2012–2021 гг.	14 / 0,13 % / 28,5 %	1 / 0,01 % / 12,1 %	101 / 0,24 % / 25,8 %	22 / 0,3 % / 31 %
2002–2021 гг.	13 / 0,13 % / 27,5 %	2 / 0,01 % / 12,9 %	56 / 0,13 % / 24 %	30 / 0,43 % / 30,3 %

Выводы. Формируемый разработанной Системой набор продуктов предоставляет большой набор данных, которые могут быть использованы для широкого круга исследовательских и прикладных задач. Одним из главных достоинств реализованной системы является оперативность получаемых продуктов, что делает возможным их применение при решении задач, требующих быстрого реагирования на развитие пожара.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ([6], http://ckp.geosmis.ru/).

Список источников

1. Галеев А. А., Прошин А. А., Ершов Д. В., Тащилин С. А., Мазуров А. А., Лупян Е. А. Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 367–371.

2. M. J. Wooster, G. Roberts, and G. L. W. Perry Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // Journal of geophysical research, VOL. 110, D24311, doi:10.1029/2005JD006318, 2005.

3. Mottram G. N., Wooster M. J., Balzter H., George C., Gerrard F., Beisley J., The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires 2005. p.

4. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

5. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыценко 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.

6. 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. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

D. Lozin[1], E. Loupian[2]
[1, 2]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]lozin@d902.iki.rssi.ru

POSIBILITIES OF USING SATELLITE INFORMATION ON FIRE INTENSITY FOR FOREST DAMAGE ASSESSMENT

Abstract. The paper presents a general overview of approaches to assessing the intensity of fires using satellite observations based on the already traditional FRP (Fire Radiative Power) characteristic. A brief analysis of the methods used to assess FRP is presented. The main attention in the work is paid to the issues of the relationship between the intensity of wildfires and forest cover damage. The approaches developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences are presented to obtain quantitative estimates of these relationships based on a joint analysis of information on the intensity of fires, areas covered by forest fires and damage to forest cover. The methods for assessing the areas covered by fire and potential damage to forest cover implemented on the basis of the proposed approaches are discussed.

The paper presents some estimates of the characteristics of forest fires obtained on the basis of the proposed methods. In particular, the results of the analysis of the features of forest damage by fires both in Russia and in the northern forests of the circumpolar zone in the period from 2001 to 2022 are given. As well as the results of the analysis of the features of forest damage by fires in different periods of the fire season. The report concludes by presenting prospects for further development of methods for analyzing information on combustion intensity to assess various characteristics of natural fires and their consequences.

Keywords: remote sensing, wildfire, FRP, the forest damage by fires, satellite monitoring, Arctic circle, Arctic zone, forest fire seasonal mortality index

УДК 528.813; 528.8.042.8; 528.88; 551.582.2

А. Н. Романов[1], А. В. Евтюшкин[2],
Д. А. Романов[3], И. В. Рябинин[4], И. В. Хвостов[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
[1]romanov_alt@mail.ru

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА СОЛОНЧАКОВ

Аннотация. Исследована возможность дистанционного микроволнового мониторинга солончаков на основе данных полевых измерений термодинамической температуры, объемной влажности, засолённости, а также измерений диэлектрических характеристик образцов солончаковых почв. Выявлены некоторые особенности поведения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончаковых почв. Микроволновое излучение земных солончаков подчинено ряду закономерностей, которые позволяют отличить их от других типов подстилающей поверхности. Диэлектрические характеристики солончаков зависят от соотношения между температурой (*T*), объемной влажностью (*W*) и засолённостью (*Z*). Значительные суточные колебания *T, W, Z* способны существенным образом изменить радиоизлучательные характеристики солончаковых почв.

Ключевые слова: солончаки, радиоизлучательные характеристики, микроволновый диапазон

В засушливых регионах мира широко распространены солончаки, весьма чувствительные к гидролого-климатическим изменениям [1; 2]. Солончаки оказывают негативное воздействие на окружающую среду, сельское хозяйство, представляют опасность для населения близлежащих населенных пунктов как источник мелкодисперсной соленой пыли в результате отложения мелкодисперсных фракций токсичных солей на подстилающей поверхности и их ветрового переноса [3; 4].

Для дистанционного мониторинга солончаков используются данные *Sentinel-1* и *Sentinel-2* [5], *MODIS* (*Terra*) [6], *RADARSAT*-2, *Landsat-8* [7; 8]. Использование данных микроволнового диапазона затруднено, так как радиоизлучательные характеристики солончаков зависят от совокупного влияния влажности, температуры, концентрации, типа солей [9–11]. Однако, несмотря на довольно значительные суточные вариации, микроволновое излучение земных солончаков подчинено ряду закономерностей, которые позволяют отличить их от других типов подстилающей поверхности.

Для примера на рис. 1 приведены вариации температуры *T* (1), объемной влажности *W* (2) и засоленности *Z* (3) солончака в слое 0–1 см. Здесь

© Романов А. Н., Евтюшкин А. В., Романов Д. А., Рябинин И. В., Хвостов И. В., 2025

$Z = \frac{M_{\text{соли}}}{M}$, $M_{\text{соли}}$ – масса соли. $W = (\frac{\rho}{\rho_{\text{в}}})W_{\text{м}}$, где $W_{\text{м}} = \frac{M_{\text{в}}}{M}$ – массовая влажность; $M_{\text{в}} = M - M_{\text{сух}}$ – масса содержащейся в образце воды; M, $M_{\text{сух}}$ – массы влажного и высушенного образцов; ρ, $\rho_{\text{в}}$ – плотности почвы и воды.

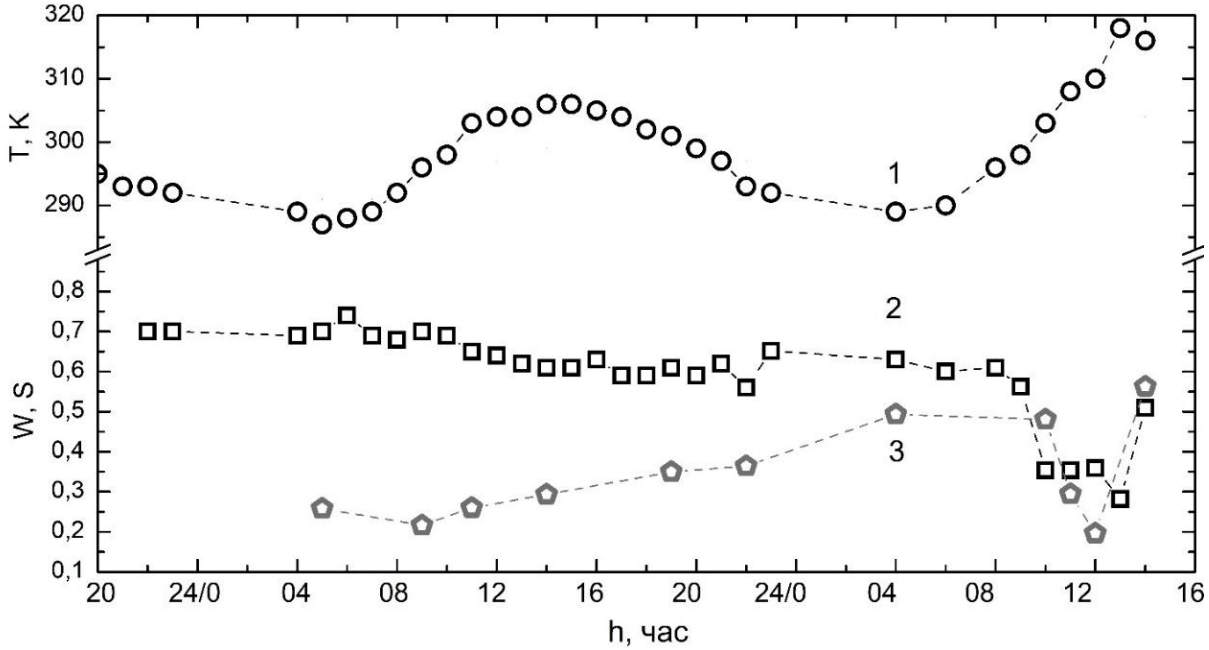


Рис. 1. Суточные вариации температуры (1), объемной влажности (2), засолённости (3) в поверхностном слое солончака 0–1 см (летний период)

На рис. 2 приведена суточная динамика радиояркостной температуры ($T_{\text{Я}}$), построенная по результатам измерений диэлектрических характеристик солончакового грунта. Наблюдавшиеся в натурных условиях изменения T, W, Z привели к тому, что $T_{\text{Я}}$ изменялась в диапазоне от 100 К до 210 К.

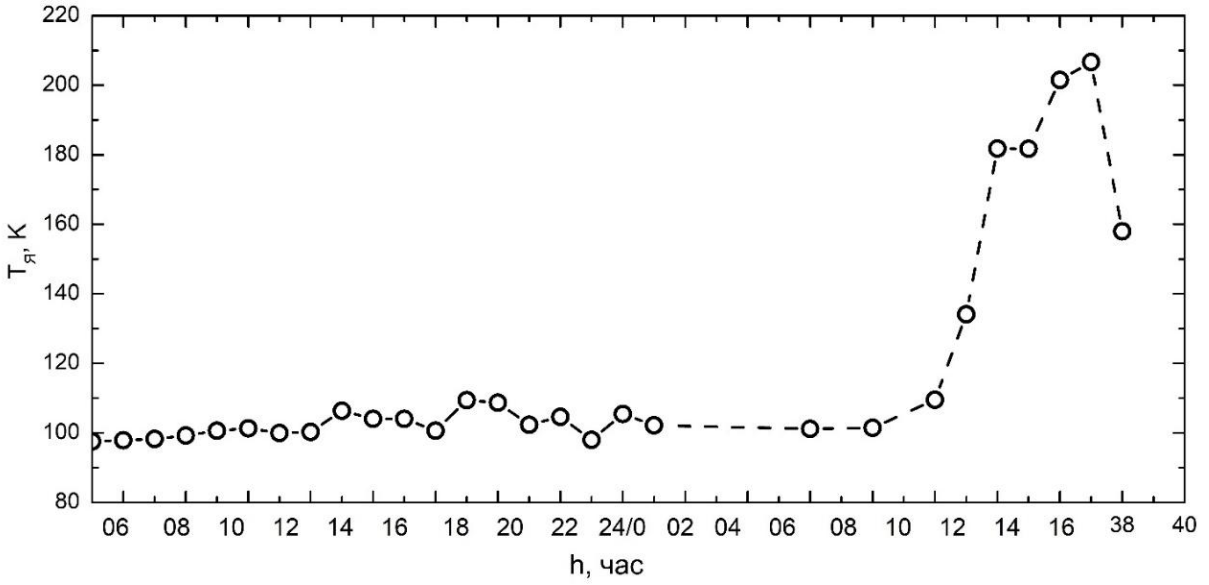


Рис. 2. Суточные вариации радиояркостной температуры солончака

Подобные весьма значительные вариации $T_Я$, наблюдаемые в течение нескольких часов, ставят под сомнение возможность объективного и надежного дистанционного микроволнового мониторинга солончаков.

В качестве возможных причин подобного резкого возрастания $T_Я$ могут быть рассмотрены: 1) влияние температуры на растворимость почвенных солей, способствующее изменениям диэлектрических и радиоизлучательных характеристик поверхности солончака; 2) образование в солончаке кристаллогидратов почвенных солей при некотором соотношении W/Z, в результате чего происходит резкое изменение диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончакового грунта.

Повышение точности данных дистанционного зондирования может быть достигнуто путем использования экспериментальных зависимостей $T_Я(T, W, Z)$ позволяющих учесть суточную динамику $T_Я$. Для примера на рис. 3 приведены зависимости $T_Я(T)$, построенные по результатам измерений диэлектрических характеристик солончакового грунта. Отбор образцов производился на одном и том же участке, но в разное время суток: 11:00 (1), 13:00 (2), 14:00 (3). На момент отбора образцы отличались по T, W, Z (рис. 1). Установленные зависимости аппроксимированы сигмоидальной функцией

$$T_Я(T) = T_Я^К + \left(T_Я^Н - T_Я^К\right) / \left(1 + \exp\left(\frac{(T - T_0}{dT}\right)\right),$$

где $T_Я^Н$, $T_Я^К$ –начальные и конечные значения $T_Я$, T_0 – средняя температура, dT – ширина интервала основных изменений $T_Я$.

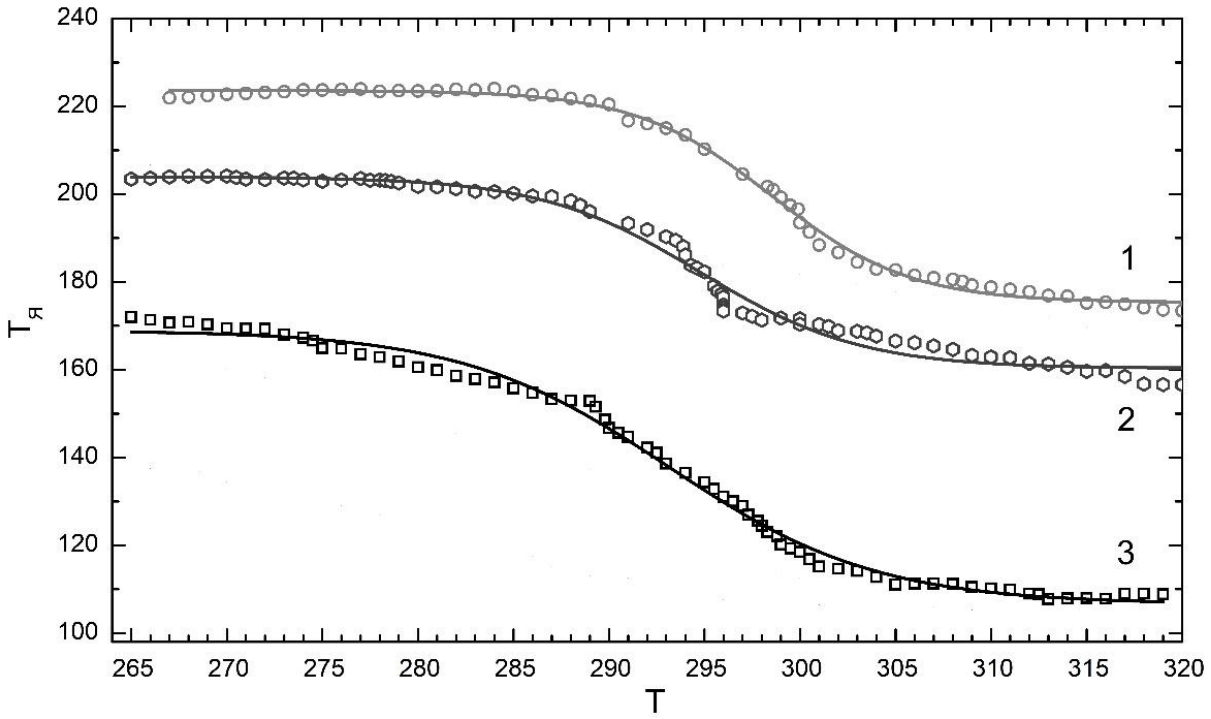


Рис. 3. Зависимости $T_Я(T)$ для образцов солончакового грунта, отобранных с одного участка в разное время суток: 1– 11:00, 2 – 13:00, 3 – 14:00

Таким образом, из анализа результатов полевых и лабораторных измерений следует вывод о том, что несмотря на значительную суточную изменчивость диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончаков, их дистанционный микроволновый мониторинг на основе выявленных зависимостей $\chi(S)$ и $\chi(W)$ вполне осуществим.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-20020, http://rscf.ru/project/25-27-20020/.

Список источников

1. Лебедева (Верба) М. П., Лопухина О. В., Калинина Н. В. Особенности химико-минералогического состава солей в соровых солончаках и озерах Кулундинской степи // Почвоведение. 2008. № 4. С. 467–480.

2. Лямина В. А., Глушкова Н. В., Смоленцева Е. Н., Зольников И. Д. Использование методов ГИС и ДЗ для мониторинга площади озер и солончаков на территории юга Западной Сибири // Гео-Сибирь. 2010. Т. 4. № 2. С. 3–7.

3. Kazemi M., Asadi A., Feiznia S. et al., Transformations in a hypersaline lake: Examining the linkages between water level changes and Aeolian dust generation // Environmental Research. 2025. V. 271. Article 121090. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121090.

4. Xiao Y., Hu W., Zhang Y. et al., Spatiotemporal variation and driving forces of soil salinization in the lower reach of arid endorheic basins: Critical role of lake system and groundwater overflow // Agricultural Water Management. 2025. V. 315. Article 109568. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109568.

5. Mohamed S. A., Metwaly M.M., Metwalli M.R. et al., Integrating Active and Passive Remote Sensing Data for Mapping Soil Salinity Using Machine Learning and Feature Selection Approaches in Arid Regions // Remote Sensing. 2023. V. 15. Article 1751. https://doi.org/10.3390/rs15071751

6. Bouaziz M, Matschullat J., Gloaguen R., Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil, Comptes Rendus Geoscience, 2011, V. 343, No. 11–12, pp. 795-803. https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.003.

7. Wang Z., Zhang F., Zhang X., et al., Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index // Science of The Total Environment. 2021. V. 775. Article 145807. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145807.

8. Wang N., Peng J., Chen S. et al., Improving remote sensing of salinity on topsoil with crop residues using novel indices of optical and microwave bands // Geoderma. 2022. V. 422. Article 115935. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115935.

9. Neena M. Gopi, R. Annadurai, A statistical approach to map saline and fluoride (F) affected areas using optical and microwave remote sensing data simulations: A case study in Palacode Taluk, Tamil Nadu, India // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2024. V. 35. Article 101207. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101207.

10. Aihaiti A., Nurmemet I., Yu X., Aili Y., Li S., Lv X., Qin Y., An enhanced soil salinity estimation method for arid regions using multisource remote sensing data and advanced feature selection, Catena, 2025, V. 256, Article 109116. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109116.

11. Guo Y., Shi Z., Zhou L.-Q. et al., Integrating Remote Sensing and Proximal Sensors for the Detection of Soil Moisture and Salinity Variability in Coastal Areas // Journal of Integrative Agriculture. 2013. V. 12. No. 4. P. 723-731. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60290-7

A. N. Romanov[1], A. V. Evtyushkin2,
D. A. Romanov[3], I. V. Ryabinin[4], I. V. Khvostov[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
[1]romanov_alt@mail.ru

SOME FEATURES OF REMOTE MICROWAVE MONITORING OF SOLONCHAKS

Abstract. The possibility of remote microwave monitoring of solonchaks is studied based on field measurements of thermodynamic temperature, volumetric moisture, salinity, and measurements of dielectric characteristics of solonchak soil samples. Some features of the behavior of dielectric and radio-emissive characteristics of solonchak soils are revealed. Microwave radiation of terrestrial solonchaks is subject to a number of regularities that allow them to be distinguished from other types of underlying surface. Dielectric characteristics of solonchaks depend on the relationship between temperature (T), volumetric moisture (W), and salinity (Z). Significant daily variations in T, W, Z can significantly change the radio-emissive characteristics of solonchak soils.

Keywords: solonchaks, radio-emissive characteristics, microwave range

УДК 551.589.1

А. В. Семакина[1], А. Н. Шихов[2], Е. А. Климина[3]
[1, 2, 3]Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
[2]shikhovan@gmail.com

ОЦЕНКА РИСКА ВЕТРОВАЛОВ В ЛЕСНОЙ ЗОНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА

Аннотация. Выполнена оценка риска ветровалов в лесной зоне европейской территории России (ЕТР) на основе метода случайного леса. Предикторами были 26 независимых переменных, которые позволяют оценить опасность, подверженность и уязвимость лесов к ветровалам. Наиболее значимыми из них являются доля лесопокрытой территории, средняя высота и запас древесины в ячейке расчетной сетки. Основным результатом исследования стала карта риска ветровалов в лесной зоне ЕТР. Достоверность полученной оценки риска оценивалась на основе фактических данных о ветровалах на территории исследования за период 1986–2024 гг. В целом по лесной зоне ЕТР, кроме Южного Урала, отмечена высокая корреляция между ожидаемой (модельной) и фактической площадью ветровалов.

Ключевые слова: ветровалы, оценка риска, метод случайного леса, европейская территория России

Ветровалы, наряду с пожарами, засухами и массовыми вспышками насекомых-вредителей являются значимым природным фактором нарушения лесного покрова и относятся к числу климатически-обусловленных рисков для лесного хозяйства [10]. Для территории России оценки риска ветровалов на уровне всей страны или крупных регионов ранее не производились, хотя факторы, определяющие уязвимость лесов к ветровому воздействию хорошо известны [3; 15]. Актуальность обзорного картографирования риска ветровалов, как и других природных причин гибели лесов, растет в связи с изменением климата и разработкой планов адаптации к нему на уровне регионов, которые затрагивают и адаптацию лесного хозяйства.

Целью настоящей работы является создание обзорной карты риска ветровалов в лесной зоне европейской территории России (ЕТР) на основе общедоступных спутниковых данных и продуктов их обработки. Это предполагает решение таких задач, как выбор предикторов и сбор данных о них для оценки опасности, подверженности и уязвимости, оценка информативности предикторов, выбор метода для оценки (прогнозирования) риска, обучение модели и оценка достоверности результатов на основе сопоставления с фактическими контурами ветровалов.

На основе анализа научной литературы, а также с использованием результатов ранее выполненных авторами исследований [4–5; 14] был сфор-

© Семакина А. В., Шихов А. Н., Климина Е. А., 2025

мирован перечень из 26 предикторов для оценки составляющих риска ветровалов (опасности, подверженности и уязвимости), который приведен в табл. 1. Значения всех предикторов были извлечены из перечисленных наборов данных (табл. 1) и осреднены в ячейках размером 5 000 × 5 000 м. Все предикторы были приведены в числовой вид. Данные были представлены в виде таблицы, где каждой ячейке сетки соответствовали 26 значений предикторов и значение предиктанта – доли площади ветровала от площади леса в ячейке. Значение предиктанта определено на основе базы данных ветровалов в лесной зоне России [5].

Таблица 1

Перечень предикторов и источники данных

Переменная	**Размер ячейки**	**Источник данных и способ получения**
Предикторы опасности (частоты и интенсивности штормовых событий)		
Повторяемость случаев с порывами ветра ≥ 25 м/с в теплый период года (апрель – октябрь), случаев/10 лет	1 000	Данные реперных метеостанций Росгидромета [2]
Среднегодовой максимум скорости ветра в теплый период года, м/с	0,25˚	Данные реанализа *ERA5* [9]
Средняя плотность молниевых разрядов (случаев в день на 1 000 км) в летние месяцы за 2011–2020 гг.	1 000 м	Данные о плотности молний за 2010–2024 гг. [9]
Повторяемость закритических значений композитного параметра суперячеек *SCP* и параметра значительного торнадо *STP* за летние месяцы 2011–2020 гг. (ч/год)	0,25˚	Массив данных значений конвективных параметров на основе реанализа *ERA5* [6]
Предикторы подверженности (распространенность реципиента риска)		
Доля площади леса от площади ячейки, %	230	Карта растительности России [1]
Предикторы уязвимости (характеристики лесных насаждений и факторы местоположения, определяющие предрасположенность лесов к воздействию ветра)		
Доля площади различных типов леса по преобладающей породе (темнохвойных, сосновых, смешанных, лиственных) и по возрасту (до 40 лет и более 40 лет) темнохвойных лесов (возраст от 35–40 лет), % от площади ячейки	230	Карта растительности России [1]
Средняя высота древостоя в ячейке, м	30	*Global Forest Canopy Height* [11]
Средняя биомасса (запас древесины) в ячейке, $м^3$/га	100	*ESA Biomass Climate Change Initiative v*. 5.0 [13], данные за 2021 г.
Доля площади свежих вырубок (возраст 10 лет и менее), % от площади ячейки	30	*Global Forest Change* [7]

Окончание табл. 1

Переменная	Размер ячейки	Источник данных и способ получения
Доля площади буферных зон (150 м) вокруг свежих вырубок, % от площади ячейки	30	
Средний угол наклона склонов в ячейке, °	450	Цифровая модель рельефа *GEBCO* 2023
Средняя выпуклость склонов (*Convexity*) в ячейке (безразмерная)		
Доля площади положительных форм рельефа, % от площади ячейки		
Средний индекс наветренного и подветренного склона (*Wind Effect*), % от площади ячейки		
Доля площади, занятой почвами с песчаной, средней и глинистой структурой, % от площади ячейки	Векторные данные	Данные *DSMW* (*Digital Soil Map of the World*) [12]

Исходный объем выборки включал 104 679 ячеек. Из нее были исключены объекты с долей лесопокрытой площади менее 10 %, в результате чего выборка сократилась до 90 067 ячеек (в том числе 9 320 ячеек с ненулевой площадью ветровала). Среднее значение предиктанта (доли площади ветровалов от площади леса в ячейке) составляет 0,23 %, а для элементов выборки с ненулевой площадью – 2,4 %. Такое распределение отражает тот факт, что большая часть лесопокрытой площади за изучаемый период не подвергалась воздействию ветров, способных вызвать ветровал.

Созданная выборка использована для оценки риска ветровалов на основе метода случайного леса (*Random Forest Regressor*), с использованием библиотеки *Scikit-learn* на языке программирования *Python*. Наиболее значимыми предикторами оказались высота древостоя и доля лесопокрытой площади.

Основным результатом работы стала обзорная карта риска ветровалов в лесной зоне ЕТР (рис. 1). На карте показаны значения расчетного риска ветровалов (доля площади леса, которая может быть вывалена в каждой ячейке расчетной сетки размером 5 000×5 000 м). Оценка достоверности результатов выполнена визуально и на основе сопоставления расчетной и фактической доли площади ветровалов в ячейках сетки. Визуальная оценка показывает, что высокую оценку риска получили районы с широким распространением темнохвойных и смешанных лесов и с высоким запасом древесины и высотой древостоя. Это в целом соотносится с фактическими данными. На территориях с минимальным расчетным риском (где ожидаемая доля площади ветровала менее 0,05 %) ветровалы не встречаются.

Количественная оценка выполнена разными способами и показала значение коэффициента корреляции от 0,32 при расчете по исходным ячей-

кам сетки до 0,92 при агрегировании результатов на 100 групп с равным количеством ячеек в каждой группе. Это показывает, что в основном ветровалы происходили в тех районах, где по модели воспроизводится высокий риск. Вместе с тем имеется ряд несоответствий между расчетами и фактическими данными, особенно на Южном Урале, где при высоком расчетном значении риска ветровалов практически не было.

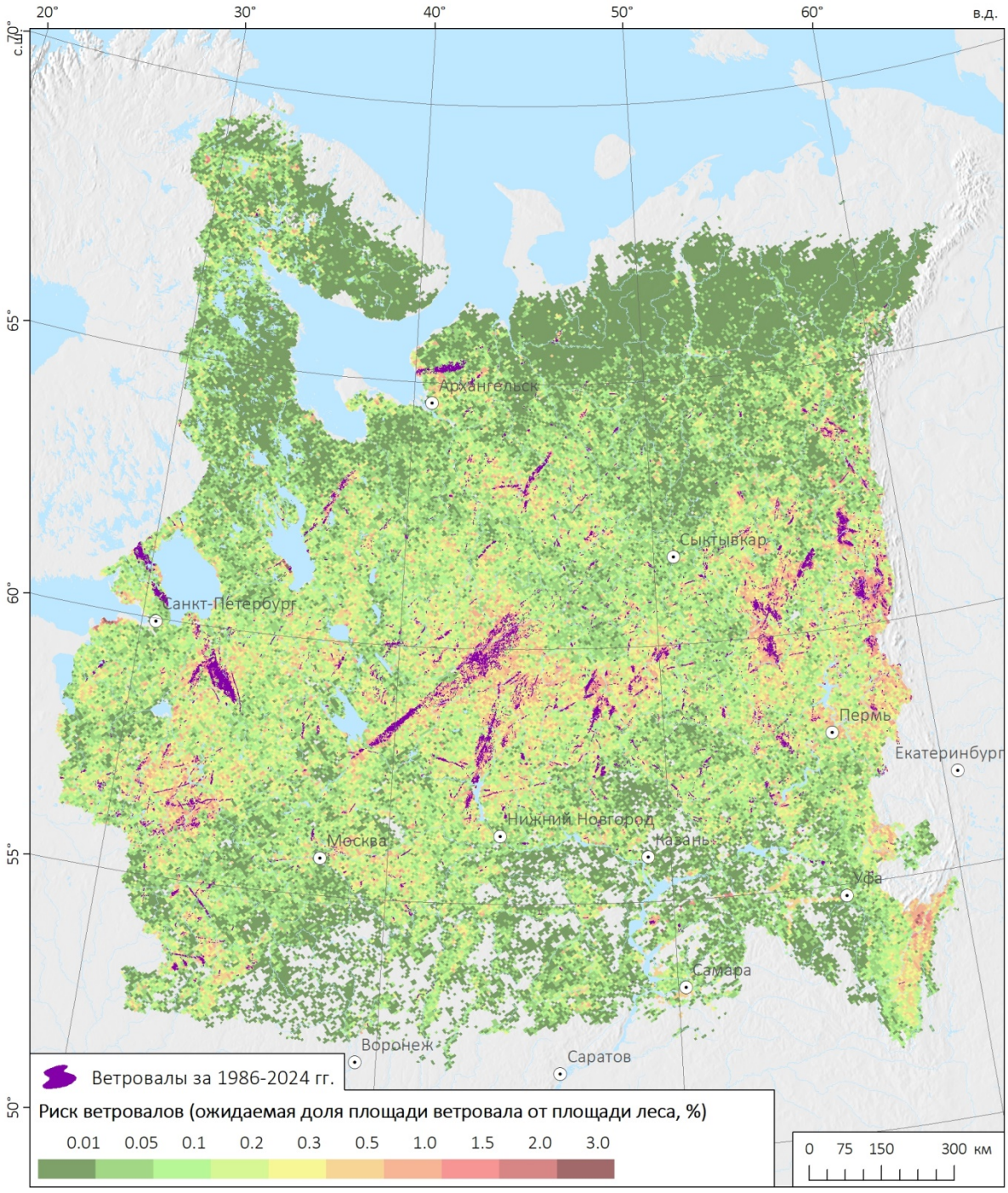


Рис. 1. Расчетная величина риска ветровалов в лесной зоне ЕТР

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-20111).

Список источников

1. Барталев С. А. Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М. : ИКИ РАН, 2016. 208 с.

2. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549.

3. Петухов И. Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область) : дис. … канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.

4. Семакина А. В., Шихов А. Н., Климина Е. А. Картографирование уязвимости лесов к ветровому воздействию на основе спутниковых данных (на примере Пермского края) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4.

5. Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Калинин Н. А., Пьянков С. В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. 284 с.

6. Chernokulsky A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A., Korshunova N. N., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., Semenov V. A., Shvets' N. V., Shikhov A. N., Yarinich Y. I. Atmospheric severe convective events in Russia: Changes observed from different data. Russ. Meteorol. Hydrol.. 2022. V. 47(5). P. 343–354. DOI: 10.3103/S106837392205003X.

7. Hansen M. C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

8. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2020. V. 146, P. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.

9. Kaplan J. O., Lau K. H.-K. The WGLC global gridded lightning climatology and time series. Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 3219-3237. DOI: 10.5194/essd-13-3219-2021.

10. Mitchell S. J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis // Forestry. 2013. V.86. P. 147–157. DOI: 10.1093/forestry/cps058.

11. Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A. et al. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // Rem. Sens. Environ. 2021. Art. No. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.

12. Sanchez P. A. et al. Digital Soil Map of the World // Science. 2009. V. 325. P. 680–681. DOI:10.1126/science.1175084.

13. Santoro M., Cartus O., Carvalhais N. et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 3927–3950. DOI: 10.5194/essd-13-3927-2021.

14. Shikhov A. N., Yarinich Y. I., Chernokulsky A. V. Association Of Spatial And Temporal Windthrow Distribution With Convective Parameters And Lightning Density In Russia // Geography, Environment, Sustainability. 2025. V.1. P. 75–88. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3590.

15. Ulanova N.G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review // Forest Ecol. Man. 2000. V. 135. P. 155–167. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00307-8.

A. V. Semakina[1], A. N. Shikhov[2], A. V. Klimina[3]
[1, 2, 3]Perm State University, Perm, Russia
[2]shikhovan@gmail.com

RISK ASSESSMENT FOR WINDTHROW EVENTS IN THE FOREST ZONE OF THE EUROPEAN RUSSIA BASED ON RANDOM FOREST METHOD

Abstract. A risk assessment of windbreaks in the forest zone of the European Russia (ER) was performed using the random forest method. The predictors were 26 independent variables that allow assessing the hazard, exposure, and vulnerability of forests to severe wind. The most significant predictors are the proportion of forested area, average tree height, and growing stock in each grid cell. The main result of the study was a windthrow risk map for the forest zone of the ER. The reliability of the risk assessment was evaluated based on actual data on windthrow events in the study area for the period 1986-2024. In general, for the forest zone of the ER, except for the Southern Urals, there is a high correlation between the predicted and observed windthrow area.

Keywords: windthrow events, risk assessment, random forest, European Russia

УДК 528.8

Д. И. Федоткин, Д. В. Сысенко, Е. Н. Боровенский, А. В. Ядыкин, Д. Н. Голубев, Г. М. Балян, М. В. Песоцкий, Д. Ю. Метт
Научно-исследовательский институт точных приборов (НИИ ТП), Москва, Россия
iprs@mail.ru

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОТОКОВАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ИНТЕРЕСАХ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЗЗ

Аннотация. В 2018 г. в России впервые разработана технология автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) с полностью автоматическим (без участия человека) циклом получения готовой высокоточной продукции ДЗЗ от уровня «сырого сигнала» и производительностью миллионы квадратных километров в сутки. На базе комплекса АПОИ более четырех лет успешно функционирует Федеральный фонд данных ДЗЗ Роскосмоса и обеспечивает автоматическую обработку заявок потребителей РФ, выдавая им продукцию высокого качества стандартных Уровней обработки 1 и 2. В 2024 г. впервые в России (на базе АПОИ) создан комплекс автоматической обработки и хранения данных информационной системы «Цифровая Земля», обеспечивающий полный цикл работы с данными ДЗЗ, в том числе производную обработку до Уровня 3, включая создание высокоточных бесшовных сплошных покрытий (ортомозаик) по данным ДЗЗ в автоматическом режиме.

Ключевые слова: наземный сегмент ДЗЗ, обработка данных ДЗЗ, автоматическая потоковая обработка информации, АПОИ, Цифровая Земля

В 2018 г. в Российской Федерации силами специалистов с 25-летним опытом создания комплексов обработки для полусотни космических аппаратов (КА) оптико-электронного и радиолокационного дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) впервые разработана технология автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) с полностью автоматическим (без участия человека) циклом получения готовой высокоточной продукции ДЗЗ от уровня «сырого сигнала» и производительностью миллионы квадратных километров в сутки. Созданный на базе этой технологии и находящийся в эксплуатации Оператора космических систем ДЗЗ комплекс АПОИ по всем показателям (качество, точность, оперативность, производительность и др.) на порядок превосходит отечественные автоматизированные (с участием человека) комплексы обработки и соответствует лучшим современным зарубежным практикам.

На сегодняшний день АПОИ является унифицированным (под разные КА) и наиболее технологически совершенным комплексом первичной и стандартной обработки во всей отрасли ДЗЗ РФ. Отечественных аналогов данной технологии на сегодняшний день нет. Время на создание полного

© Федоткин Д. И., Сысенко Д. В., Боровенский Е. Н., Ядыкин А. В., Голубев Д. Н., Балян Г. М., Песоцкий М. В., Метт Д. Ю., 2025

цикла обработки данных с новых КА сократилось с нескольких лет до нескольких месяцев. На базе комплекса АПОИ более четырех лет успешно функционирует Федеральный фонд данных ДЗЗ (ФФД ДЗЗ) Роскосмоса и обеспечивает автоматическую обработку заявок потребителей РФ, выдавая им продукцию высокого качества стандартных Уровней обработки 1 и 2. АПОИ позволил сократить время обработки с часов/суток до минут. Благодаря высокому качеству обработки АПОИ стало возможно создание новых видов продукции ДЗЗ и тематических сервисов для потребителей по данным с отечественных КА ДЗЗ.

Основные технические решения технологии АПОИ:

– 100%-ная автоматическая потоковая обработка (от приема сигнала с КА до отгрузки продукции потребителям);

– единый комплекс обработки для данных с различных КА (вся группировка ДЗЗ);

– унификация и стандартизация процессов, алгоритмов, продуктов, форматов, метаданных;

– высокопроизводительные параллельные и распределенные (кластерные) вычисления;

– использование строгих математических моделей, что позволило устранять первопричины ошибок, а не их последствия;

– сквозной автоматический контроль качества на всех этапах обработки;

– адаптивные алгоритмы (включая нейросетевые), нивелирующие погрешности работы бортовых систем.

Одним из основных показателей качества высокоточных продуктов ДЗЗ является точность геопривязки. Бортовые системы КА обеспечивают средние цифры нескольких десятков метров. За счет обработки в АПОИ точность геопривязки улучшается до единиц метров. Например, средняя точность геопривязки продуктов АПОИ для КА серии «Ресурс-П» – 2,4 м (при разрешении 0,7 м), а для КА серии «Канопус-В» – 4,5 м (при разрешении 2,1 м).

С введением комплекса автоматической обработки в эксплуатацию кратно возросло количество отгружаемой продукции потребителям. При этом подавляющая масса потребителей стала заказывать данные ДЗЗ в виде продуктов, которые ранее им были недоступны (80 % заказов – это *BUNDLE* и *PANSHARP*). Это продукты с попиксельным совмещением изображений различных спектральных каналов, а также разных сенсоров и съемочных систем. Формирование таких продуктов в потоковом режиме за короткое время может обеспечить именно рассматриваемая автоматическая технология и не может автоматизированная.

В 2024 г. впервые в РФ (на базе АПОИ) создан комплекс автоматической обработки и хранения данных информационной системы «Цифровая Земля» (ИС ЦЗ), обеспечивающий полный цикл работы с данными ДЗЗ,

в том числе производную обработку до Уровня 3, включая создание высокоточных бесшовных сплошных покрытий (ортомозаик) по данным ДЗЗ в автоматическом режиме.

На сегодняшний день технология АПОИ (и ИС ЦЗ) обеспечивает:

– 100%-ную автоматическую обработку (не требуются операторы);

– 100%-ную масштабируемость (под любое количество КА);

– 100%-ную портируемость (переносимость) в облако ЦОД;

– скорость обработки: десятки гигабайт в минуту;

– производительность: миллионы квадратных километров в сутки;

– точность геопривязки продуктов ДЗЗ: единицы метров (1–2 пикселя);

– оперативность обработки одного сеанса сброса: менее 1 часа.

Технология АПОИ в ИС ЦЗ прошла отработку на 12 различных субъектах РФ, в ходе которой была сформирована серия ортомозаик площадью от 7,8 тыс. кв. км до 95,7 тыс. кв. км из архивных данных Канопус-В в разрешении 2,1 м (тип обработки *PANSHARP*, 4 спектральных канала).

Основные выводы по результатам отработки:

– ортомозаики формируются по заданному контуру региона полностью в автоматическом режиме от отбора маршрутов из архива до анализа качества создаваемого информационного продукта;

– автоматические алгоритмы коррекции геопривязки инвариантны к локальным искажениям опоры, что позволяет получать результирующую геопривязку ортомозаик точнее, чем характеристики используемой опоры;

– точность геопривязки автоматически созданных ортомозаик сопоставима с пространственным разрешением данных (1–2 пикселя);

– производительность 50 тыс. кв. км в час позволяет обновлять бесшовное сплошное мозаичное покрытие всей территории РФ дважды в месяц (*PANSHARP* с разрешением 2,1 м) при наличии соответствующего количества данных оперативной съемки, которые могут дать только многоспутниковые группировки.

Представленная технология, реализованная в рассмотренных комплексах отечественного наземного сегмента ДЗЗ, единственная на сегодня в РФ, способная обеспечить потоковую обработку больших объемов информации с многоспутниковых группировок (с сотнями космических аппаратов на орбите).

D. I. Fedotkin, D. V. Sysenko, E. N. Borovenkiy, A. V. Yadykin,
D. N. Golubev, G. M. Balyan, M. V. Pesotskiy, D. U. Mett
Scientific research institute of precision instruments, Moscow, Russia
iprs@mail.ru

AUTOMATIC STREAMING DATA PROCESSING IN THE INTERESTS OF GENERATING HIGH-PRECISION REMOTE SENSING PRODUCTS

Abstract. In 2018, for the first time in the Russian Federation, automatic streaming data processing (ASDP) technology was developed with a fully automatic (without human intervention) cycle for obtaining finished high-precision remote sensing products from the “raw signal” level and with a capacity of millions of square kilometers per day. The Roscosmos Federal Data Fund of Remote Sensing Data (FDF RSD) has been successfully operating on the basis of the APOI complex for more than 4 years provides automatic processing of applications from consumers of the Russian Federation, providing them with high-quality products of standard processing Levels 1 and 2. In 2024, for the first time in the Russian Federation (based on the ASDP), a complex for automatic data processing and storage the "Digital Earth" information system (IS DE) was created, providing a full cycle of remote sensing data processing, including derivative processing up to Level 3, including the creation of high-precision seamless solid coatings (orthomosaic) based on remote sensing data in automatic mode.

Keywords: Remote sensing ground segment, remote sensing data processing, automatic streaming data processing, ASDP, Digital Earth

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И BIG DATA@

УДК 004.852, 004.891.2

Р. В. Брежнев[1], И. Ф. Носков[2], Ю. А. Маглинец[3]
[1, 2, 3]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]RBrejnev@sfu-kras.ru

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ НИЗКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Аннотация. Рассматривается подход к решению задачи распознавания природных пожаров по данным космического аппарата «Арктика-М» с низким пространственным разрешением, основанный на машинном обучении и сверточных нейронных сетях. Цель работы состоит в выявлении наиболее подходящих моделей сверточных нейронных сетей и их ансамблей, обученных на ограниченном наборе данных, показывающих максимально высокие результаты распознавания. Сравнение моделей основывается на оценке значений метрик качества распознавания. Приводятся примеры экспериментальных исследований. Формулируются предложения по дальнейшему развитию исследования с целью увеличения точности детекции.

Ключевые слова: Арктика-М, природные пожары, тепловые аномалии, ансамблевый подход, искусственный интеллект, нейронные сети

С 2021 г. в России эксплуатируется орбитальная группировка перспективных спутниковых аппаратов дистанционного зондирования Земли «Арктика-М» с высокоэллиптической орбитой, которая в отличие от существующих зарубежных альтернатив позволяет получать снимки земной поверхности с частотой один раз в пятнадцать минут. Такая частота суммарно превышает общее количество снимков одной и той же территории всей зарубежной спутниковой группировкой. Аппараты «Арктика-М» предназначены для метеорологических целей, а съемочное оборудование на борту позволяет осуществлять съемку в 10 спектральных диапазонах, среди которых есть тепловой инфракрасный канал, пригодный для мониторинга природных пожаров.

С точки зрения детектирования природный пожар рассматривается в качестве тепловой аномалии, которая может быть зарегистрирована как всплеск радиационной температуры в узком спектральном диапазоне от 3,7 до 4,0 мкм. Однако детектирование пожаров классическими методами сегментации и кластеризации затруднено с учетом низкого пространственного

© Брежнев Р. В., Носков И. Ф., Маглинец Ю. А., 2025

разрешения – порядка 4 000 м/пиксель. Тем не менее, опираясь на априорные данные о пожарах, экспериментально установлено [1], что при таком низком разрешении возможно детектировать пожары площадью от 2 000 Га, а наиболее эффективными и точными методами распознавания образов являются методы машинного обучения и искусственного интеллекта.

С активным развитием машинного обучения в последние годы возникло значительное количество моделей распознавания природных лесных пожаров, обученных на общедоступных материалах в сети. Однако большинство открытых моделей адаптированы под снимки высокого пространственного разрешения, по сравнению со снимками «Арктика-М», что накладывает существенные ограничения по временной частоте съемки области возгорания и не подходит для решения задачи оперативного мониторинга. В этой связи целесообразна разработка такой модели, которая позволяла бы детектировать пожары по низкому пространственному разрешению.

В качестве исходных данных использовались снимки «Арктика-М» 4-го теплового канала (3,7–4,0 мкм) за летний период 2023 г. Сформировано несколько временных рядов, на которых по априорным данным, полученным с приборов *MODIS*, *VIIRS*, *Himawari*, зафиксированы горения площадью от 2 000 до 5 000 Га [2]. В общей сложности в обучении задействовано около 500 фрагментов 48 × 48 пикселей (рис. 1). Сами сцены были как с содержанием явных тепловых всплесков, так и без них – как экземпляры чистого фона. Исходя из наличия всего двух классов – «фон» и «объект» – разметка представляла собой бинарную сегментацию.

а *б*

Рис. 1. Примеры фрагментов 48 × 48 пикселей снимка КА «Арктика-М», используемых для обучения: а – фрагмент с тепловыми всплесками; б – фрагмент, содержащий фон

В качестве инструментов машинного обучения в распознавании образов и описании изображений выбраны сверточные нейронные сети (*CNN*) [3]. Рассматривались 4 самые популярные архитектуры *CNN*:

– *U-Net*, имеющая преимущество в распознавании мелких деталей;

– *HRNet* (*High-Resolution Representation Network*), которая использует оригинальный метод извлечения признаков изображения на нескольких уровнях (как локальных, так и глобальных);

– *DeepLab*, показывающая хороший результат в анализе глобального контекста за счет технологии расширенных сверток (*dilated convolution*);

– *PSPNet*, которая также хорошо зарекомендовала себя в поиске закономерностей на глобальном уровне изображения с использованием пирамидального пулинга (*pyramid pooling module*).

При применении перечисленных моделей *NN* наиболее точные результаты распознавания продемонстрировали модели *HRNet* и *U-Net*, оцененные по ряду метрик качества, таких как *Test Loss* $\left(\frac{Dice\,Loss + Focal\,Loss}{2}\right)$, *Weighted Dice Score*, *Weighted Intersection-over-Union* (*IoU*), *Matthews Correlation Coefficient* (*MCC*), *Specificity*, *F*1 *Score*.

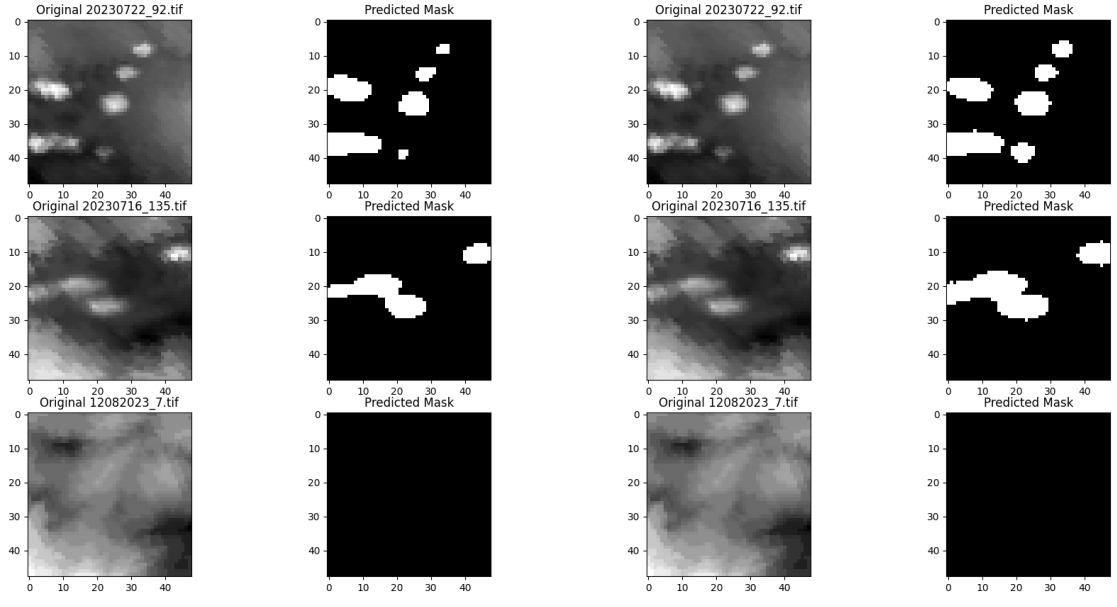
Из-за учета нескольких видов ошибок и чувствительности к переобучению *F*1-*Score* была назначена основной метрикой сравнения моделей (табл. 1).

Таблица 1

Лучшие значения метрик качества по моделям *NN*

Метрика качества	***PSPNet***	***DeepLabV3***	***HRNet***	***U-Net***
Test Loss $\left(\frac{Dice\,Loss + Focal\,Loss}{2}\right)$	0,2819	0,3227	0,1077	0,3222
Weighted Dice Score	0,9235	0,9252	0,9343	0,9303
Weighted Intersection-over-Union (IoU)	0,8588	0,8611	0,8770	0,8704
Matthews Correlation Coefficient (MCC)	0,6685	0,6958	0,6924	0,7081
Specificity	0,9876	0,9856	0,9919	0,9872
*F*1 *Score*	0,6746	0,6960	0,6978	0,7112

Так, модель *HRNet* продемонстрировала в разы лучшую стабильность обучения. Лучшее значение гармонического среднего между точностью и чувствительностью модели (*F*1 *Score*) показывает модель *U-Net*. Худшие результаты демонстрировала модель *PSPNet*. Примеры результатов работы лучших моделей *NN* приведены на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Результаты работы нейронных сетей: а – пример *HRNet*; б – пример *U-Net*

Однако, если принять во внимание множество значений метрик качества, то сложно определить, какая из моделей однозначно лучше. Поэтому в работе было принято решение использовать ансамблевый метод обучения (*ensemble learning*) с использованием нескольких моделей *NN*. Основная идея ансамблевого подхода заключается в компенсации недостатков различных архитектур. Для распознавания всплесков температуры на изображениях использовались три варианта ансамблей: метод простого голосования (*voting*), ускорения (*boosting*) и бэггинг (*bagging*).

Использование всех 4 моделей, включая слабейшую модель *PSPNet*, по результатам ансамблей распределения и голосования лишь ухудшало общие показатели. Напротив, объединение моделей *U-Net*, *HRNet* и *DeepLab* оправдало себя в виде лучших результатов, чем у моделей по отдельности с неплохой стабильностью и метрикой *F*1-*Score* в 72–73 %.

С точки зрения баланса приемлемой точности распознавания и времени, необходимого для обучения, лучшим решением является метод ускорения. Модификация классического метода с полноценными моделями CHC и динамическим обучением коэффициентов неплохо справилась с задачей исправления результатов одиночных моделей. Ансамбли распределения и голосования при схожих результатах являются более ресурсозатратными с точки зрения времени и необходимых мощностей.

В заключение стоит обратить внимание, что основные недостатки в результатах распознавания происходят от недостаточного набора данных, использованного при обучении. Дисбаланс пикселей фона и объектов заметно затрудняет обучение, несмотря на то, что проведена тщательная настройка структуры моделей и удалось получить приемлемые результаты без превалирования фона. Все же количество исходных данных с объектами остается недостаточным для результатов высокой точности. Также заметим, что эксперименты проводились с использованием изображений исключительно в 4 тепловом канале. В дальнейшем развитии представленной работы планируется, во-первых, увеличить обучающую выборку, во-вторых, увеличить размерность используемых в алгоритмах спектральных каналов «Арктика-М», чтобы максимально отсекать помехи и увеличить точность.

Список источников

1. Маглинец Ю. А., Раевич К. В., Шатров Р. А., Брежнев Р. В., Михалев А. С., Матюнин В. М., Антипова Е. А. Автоматизация процесса обнаружения лесных пожаров по данным дистанционного зондирования Арктика-М // Международный научно-исследовательский журнал, 2024. № 10 (148). DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.140.

2. Лупян Е. А. и др. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. Т. 12. №. 5. С. 222.

3. Дамдынчап Ч. А., Шарапов А. А. Применение нейронных сетей для распознавания дыма и пожара на изображениях // Молодежь. Инновации. Технологии, 2021. Т. 7. № 2. С. 38–43.

R. V. Brezhnev[1], I. F. Noskov[2], Yu. A. Maglinets[3]
[1, 2, 3]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1]RBrejnev@sfu-kras.ru

DETECTION OF WILDFIRES FROM LOW-SPATIAL-RESOLUTION SATELLITE IMAGES

Abstract. The article discusses an approach to solving the problem of recognizing wildfires using low-resolution Arktika-M spacecraft data based on machine learning and convolutional neural networks. The goal of the work is to identify the most suitable models of convolutional neural networks and their ensembles trained on a limited data set that show the highest recognition results. Comparison of models is based on an assessment of the values of recognition quality metrics. Examples of experimental studies are given. Proposals for further development of the study in order to increase detection accuracy are formulated.

Keywords: Arktika-M satellite, wildfires, thermal anomalies, ensemble learning, artificial intelligence, neural network

УДК 519.246

О. С. Володько[1], Н. А. Лев[2], Д. В. Полянчикова[3]
[1] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
[2, 3] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]osv@icm.krasn.ru, [2]nlkita.lev@yandex.ru, [3]polyanchikova.d@gmail.com

НЕЙРОСЕТЕВАЯ *LSTM*-МОДЕЛЬ С СЕЗОННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ $PM_{2.5}$ В АТМОСФЕРЕ КРАСНОЯРСКА

Аннотация. В работе проведено сравнительное исследование эффективности различных моделей машинного обучения для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в г. Красноярске. Показано, что нейросетевая модель *LSTM*, обученная на данных с сезонным разделением, значительно превосходит по точности регрессионные, *ARIMA*/*ARIMAX*, ансамблевые и бустинговые модели, демонстрируя значения $MAE \leq 1{,}63$ мкг/м³ и $R^2 \geq 0{,}80$. Наилучшие результаты достигнуты при добавлении в признаки метеопараметров, что особенно актуально для города с неблагоприятными метеорологическими условиями. Разработанное решение предназначено для интеграции в систему экологического мониторинга.

Ключевые слова: PM2.5, *LSTM*, временные ряды, загрязнение атмосферы, сезонность, машинное обучение, прогнозирование, Красноярск

Введение. Красноярск относится к городам с критическим уровнем загрязнения атмосферного воздуха, где особую опасность представляют взвешенные частицы $PM_{2.5}$ [1]. Спецификой региона являются температурные инверсии, создающие устойчивые загрязненные слои в приземной атмосфере в зимний период. Существующие системы мониторинга не обеспечивают прогнозирования уровня загрязнения, что делает актуальным разработку точных моделей для заблаговременного предупреждения населения и принятия управленческих решений.

Современные подходы к прогнозированию качества воздуха включают регрессионные модели, методы анализа временных рядов (*ARIMA*, *ARIMAX*), ансамблевые алгоритмы и глубокое обучение [2; 3]. Среди них модели на основе *LSTM* (*Long Short-Term Memory*) демонстрируют наиболее высокую эффективность благодаря способности улавливать сложные временные зависимости.

Целью работы является разработка и верификация *LSTM*-модели для прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере Красноярска с сезонным разделением данных и сравнение ее эффективности с альтернативными методами машинного обучения.

Материалы и методы. Для построения моделей использованы данные наземных станций мониторинга [4] и метеоданные модели *NCEP GFS* [5] за период 2019–2024 гг. Выбраны станции, фиксирующие наиболее

© Володько О. С., Лев Н. А., Полянчикова Д. В., 2025

высокие концентрации $PM_{2.5}$: Николаевка, Овинный, Песчанка, Телевизорная, Ветлужанка.

Данные агрегированы в почасовые и суточные значения. Для учета метеорологических особенностей реализовано сезонное разделение данных:

– зимний период (ноябрь – февраль);

– весенний период (март – апрель);

– летний период (май – июль);

– осенний период (август – октябрь).

В качестве базовой архитектуры использована *LSTM*-сеть, состоящая из последовательности блоков с механизмами управления состоянием через вентили забывания, входа и выхода [7]. Прогноз строился для почасовых значений с последующей агрегацией в суточные.

Для сравнения использованы следующие модели:

– множественная регрессия;

– *ARIMA*;

– *ARIMAX* (с метеопараметрами как экзогенными переменными);

– *Gradient Boosting* (*XGBoost*);

– *Random Forest*.

Оценка качества проводилась по метрикам: средняя квадратичная ошибка (*MSE*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), коэффициент детерминации (R^2).

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

Таблица 1

Сравнение эффективности моделей по метрике *MAE,* мкг/м³

Период прогнозирования		***ARIMAX***	***LSTM***
Зима 2022 г., 20–22 декабря	2022	8,34	**1,63**
Лето 2022 г., 20–22 июля	2022	2,53	**0,35**
Весна 2023 г., 10–12 апреля	2023	3,81	**0,72**
Осень 2023 г., 23–25 сентября	2023	4,77	**0,84**
Зима 2024 г., 10–12 февраля	2024	13,21	**0,93**
Весна 2024 г., 17–19 марта	2024	7,01	**0,48**

LSTM-модель с сезонным разделением продемонстрировала улучшение точности на 30–40 % по сравнению с обучением на полном наборе данных (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение *MSE* для разных стратегий обучения *LSTM*

Сезон	***MSE* (скользящее окно)**	***MSE* (сезонная модель)**
Зима	366,82	247,87
Весна	103,12	64,27
Лето	35,35	35,07
Осень	29,89	29,64

Заключение. Разработанная *LSTM*-модель с сезонной декомпозицией данных показала высокую точность прогнозирования концентрации $PM_{2.5}$ в условиях г. Красноярска по сравнению с другими методами машинного обучения.

Существенно повысить точность прогноза позволили следующие факторы:

1. Способность *LSTM* улавливать сложные нелинейные зависимости.
2. Учет сезонных особенностей метеорологических условий.
3. Использование релевантных метеопараметров в качестве предикторов.

Наибольший эффект от сезонного разделения данных наблюдается для зимнего периода (улучшение точности на 32 %), что особенно значимо для города с неблагоприятными условиями рассеивания загрязнений.

Результаты работы внедряются в систему экологического мониторинга г. Красноярска и могут быть применены для других промышленных городов.

Список источников

1. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 30.06.2025).

2. Lin M. D. et al. LSTM-based strategy for short-term prediction of PM2.5 // Science of The Total Envi-ronment. 2024. V. 906. P. 167892.

3. Das R. et al. High granular PM2.5 forecasting: a comparative review // Artif. Intell. Rev. 2022. V. 55. P. 1253–1287.

4. Геопортал. Данные оперативного мониторинга. URL: http://sensor.krasn.ru/sc/ (дата обращения: 30.06.2025).

5. NCEP GFS. Documentation. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php (дата обращения: 21.06.2025).

6. Volodko, O. Influences of meteorological conditions in PM 2.5 levels in Krasnoyarsk city atmosphere // E3S Web of Conferences. 2023. V. 392. P. 02022.

7. Нейросети для работы с последовательностями. Онлайн-учебник по машинному обучению. https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/nejroseti-dlya-raboty-s-posledovatelnostyami (дата обращения: 14.06.2025).

8. Володько О. С., Лев Н. А., Полянчикова Д. В. Прогнозирование величины концентрации загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска с помощью моделей машинного обучения // Материалы XI Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», Красноярск : СФУ, 2024. С. 352–356.

O. S. Volodko[1], N. A. Lev[2], D. V. Polynchikova[3]
[1] Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[2, 3] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1]osv@icm.krasn.ru, [2]nlkita.lev@yandex.ru, [3]polyanchikova.d@gmail.com

NETWORK LSTM MODEL WITH SEASONAL DATA SEPARATING FOR FORECASTING PM2.5 CONCENTRATION IN THE ATMOSPHERE OF KRASNOYARSK

Abstract. This study presents a comparative analysis of the effectiveness of various machine learning models for predicting $PM_{2.5}$ concentration in Krasnoyarsk. It is shown that an LSTM neural network model trained on seasonally partitioned data significantly outperforms regression, ARIMA/ARIMAX, ensemble, and boosting models in accuracy, demonstrating MAE values of $\leq$1,63 μg/m³ and $R^2 \geq 0{,}80$. The best results were achieved by incorporating meteorological parameters as features, which is particularly relevant for a city with unfavorable meteorological conditions. The developed solution is intended for integration into an environmental monitoring system.

Keywords: PM2.5, LSTM, time series, air pollution, seasonality, machine learning, forecasting, Krasnoyarsk

УДК 004.81, 004.89

Е. И. Герасимова
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
egerasimova@sfu-kras.ru

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ АГЕНТА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Предлагается обобщенная структура агента мультиагентной системы. Основная идея заключается в том, чтобы все агенты могли иметь одинаковую структуру и при этом разное содержание, а именно были способны решать каждый свою индивидуальную задачу и достигать свою цель. В составе структуры агента рассмотрена база знаний и база данных агента, компоненты взаимодействия агента и приобретения знаний и решатель. Рассмотрена среда агента. Цель работы заключается в создании унифицированного понятия агент мультиагентной системы для повышения возможности практического применения мультиагентного подхода в более широком круге задач. В заключение сделаны выводы о возможностях, которые открывает предлагаемая структура агента.

Ключевые слова: мультиагентные системы, искусственный интеллект, знания, среда агента

Введение. В настоящее время более популярны нейросетевые технологии и уже сформировался опыт их применения, который, помимо преимуществ, выявил ряд проблем: этики, безопасности и неформализованности получаемых решений. С другой стороны, по-прежнему остаются востребованными приложения, для которых критически необходимы экспертные знания для решения реальных задач [1].

Для таких задач мультиагентные системы (МАС) продолжают оставаться лучшим решением. МАС предназначены для управления сложными крупноразмерными объектами сетевой структуры, а каждый агент в отдельности обладает экспертными знаниями и способен адаптироваться. Взаимодействие агентов решает вопрос параллельной работы МАС над несколькими задачами и позволяет создавать под каждую задачу индивидуальные структуры ее решения [2].

Несмотря на перечисленные преимущества, мультиагентные технологии до сих пор имеют небольшое количество внедренных решений [2]. Основными причинами являются сложность практической реализации существующих моделей агентов и разрозненность исследователей в определении самого понятия «агент».

В данной статье предлагается обобщенная структура агента, позволяющая реализовать унифицированную модель агента.

© Герасимова Е. И., 2025

Основные понятия. В большинстве теоретических исследований моделей агентов мультиагентных систем исследователями предлагаются архитектуры мультиагентных систем [2–4], где агент рассматривается в качестве интеллектуального «ассистента» некоторого объекта реального мира, т. е. каждому агенту присваивается функционал для управления определенным объектом или процессом. Такой подход к построению мультиагентных систем вынуждает исследователей давать подходящее своей разработке определение «агента» и разрабатывать для каждого агента структуру, соответствующую его уникальным функциям.

Если рассмотреть агента как интеллектуальную информационную недетерминируемую единицу, то агент представляется как решающая система второго рода. Это означает, что для решения задачи агенту априори не задан способ решения, он находится агентом самостоятельно и для этого агент должен иметь свою Базу знаний. Информационная недетерминируемая единица означает, что агент должен решать простые задачи за один шаг поиска. Для таких агентов можно сформировать однотипную структуру.

Подобный подход построения мультиагентной системы предложил Г. М. Цибульский [5], рассмотрев мультиагентную систему по анализу изображений с агентами типовой структуры.

Структура агента. Так как агент рассматривается как решающая система второго рода, имеет Базу знаний и механизм вывода на знаниях, то его структура может быть заимствована из структуры классической экспертной системы и с подобным способом решения задач.

Структура агента зависит от состава его среды. Агент не взаимодействует напрямую с пользователем системы, каждый агент функционирует в своей уникальной среде и взаимодействует с элементами среды. Элементы среды каждого агента аналогичны: надагенты, подагенты, сам агент, средства взаимодействия агента с надсистемой. Среда агента должна быть достаточным источником всех необходимых знаний для решения поставленной задачи.

Отсюда следует обобщенная структура агента, приведенная на рис. 1.

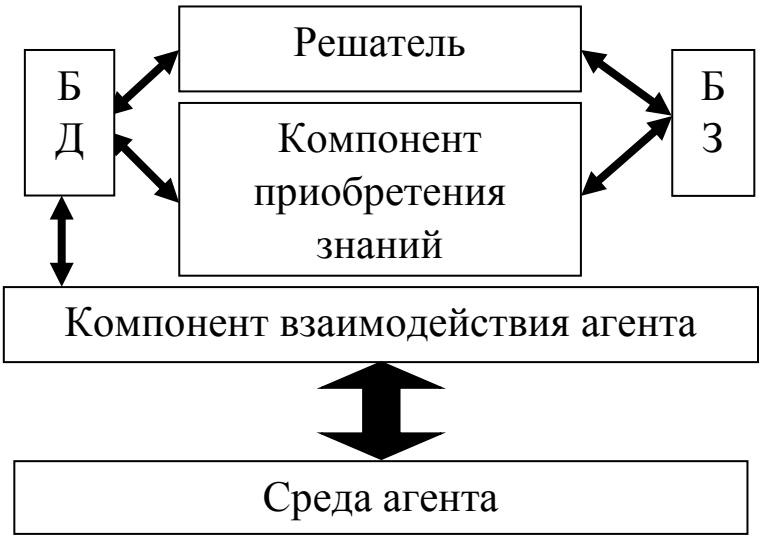


Рис. 1. Структура агента

В обобщенную структуру агента входят следующие элементы, необходимые для его функционирования.

1. ***Компонент взаимодействия*** агента со своей средой. Реализует следующие функции: взаимодействие с надагентом – получение текущей цели, подача заявки на участие в конкурсе для включения в коллектив по решению текущей задачи, получение команды об активации, передача полученного решения; взаимодействие с подагентом – передача подагенту цели, получение от подагента заявки на участие в конкурсе, получение и согласование от подагента решения, взаимодействие с надсистемой – получение из базы знаний предметной области надсистемы требуемых знаний для решения текущей задачи и получение от надсистемы данных текущих измерений – это могут быть данные, получаемые от пользователя через компонент взаимодействия с ним, или данные об объекте исследования от датчиков внешней среды, получаемые так же от компонента взаимодействия надсистемы с внешней средой. Выполнение той или иной функции компонента взаимодействия зависит от текущего состояния агента. Данный компонент должен иметь все необходимые средства взаимодействия со средой агента.

2. ***База знаний*** агента (БЗ). Агент решает простейшую задачу, являющуюся частью глобальной текущей задачи МАС. Поэтому БЗ агента является соответствующей частью БЗ всей мультиагентной системы. БЗ агента представлена единым признаковым пространством для всех возможных целей и решений агента. Набор признаков цели определяет структуру Базы Знаний агента и определен априори. Для решения задачи агент получает вектор цели, где не все признаки цели имеют значения. Первичной задачей агента является, определить к какому классу целей на его признаковом пространстве относится цель и относится ли вообще. Если полученная цель отражается в признаковом пространстве агента – набор признаков цели полностью совпадает с его базой знаний, то задача агента заключается в нахождении значений всех не означенных признаков. Для каждого класса целей агента в Базе знаний определены способы нахождения значений признаков, а именно идентификаторы необходимых Знаний предметной области в надсистеме или идентификаторы подагентов способных определить значения признаков.

3. ***База данных*** агента (БД). Информационное коммуникационное поле для всех подсистем агента и содержит всю текущую информацию о функционировании агента. Через БД обмениваются информацией все подсистемы агента. БД представляет собой фрагмент обобщенной БД мультиагентной системы. В БД агента хранятся как его основные данные – уникальный номер, рейтинг агента, так и данные о текущем состоянии цели: текущее состояние объекта исследования (пользователя) и текущее состояние решения – поступившие от агентов запросы на участие в конкурсе на включение в коллектив решения задачи, включенные в коллектив для решения задачи подагенты, поступившие от подагентов решения.

4. ***Решатель***. Элемент агента, выполняющий все основные действия по поиску полученной цели в пространстве своих целей, по проведению

конкурса между подагентами для включения их в коллектив решения задачи, по решению задачи – формированию векторов цели для подагентов, по определению релевантности полученных от подагентов решений, вычисление рейтинга агента, координацию взаимодействия подсистем агента.

5. ***Компонент приобретения знаний.*** Выполняет процесс обучения агента, а именно: либо создание нового класса целей на существующем признаковом пространстве агента и установки в качестве эталона этого класса поступившую цель, не попавшую ни в один из известных агенту классов, либо создание нового подагента с выделением его собственного признакового пространства целей, структура которого заимствуется создающим агентом из Базы знаний надсистемы. Все необходимые текущие данные компонент получает из базы данных агента. Данные о создании нового подагента передаются через базу данных и компонент взаимодействия в среду. Запрос дополнительных данных об объекте исследования так же выполняется через базу данных и компонент взаимодействия агента. Так же, для внесения новых знаний в Базе знаний предметной области в надсистеме мультиагентной системы данный компонент использует компонент взаимодействия агента.

Заключение. Агенты с представленной обобщенной структурой могут формировать мультиагентные системы любого масштаба, для решения задач классификации объектов, принятия решений или задач, требующих адаптации системы под запросы пользователя. Однотипные агенты, решающие каждый простейшую собственную задачу, позволяют формировать мультиагентной системе индивидуальный коллектив агентов с индивидуальным решением текущей задачи. Имея Базу знаний и процедуру обучения, реализованные в агентах, мультиагентная система способна решать однотипные задачи без проведения каждый раз новых вычислений, т. е. быстрее и наилучшим способом, вычисленным при обучении агентов. Наконец, для такой структуры агента можно разработать унифицированное определение понятия «агент» мультиагентной системы, что впоследствии повысит долю внедряемых решений с мультиагентными системами для реальных задач в различных областях экономики.

Список источников

1. Городецкий В. И. От инженерии знаний к науке о знаниях. Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2023 // Труды конференции : в 2 т. Смоленск, 2023. С. 14–29.

2. Городецкий В. И., Бухвалов О. Л., Скобелев П. О., Майоров И. В. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // УБС. 2017. Вып. 66. С. 94–157.

3. Laaziri M., Khoulji S., Benmoussa K., Larbi K. M. Outlining an Intelligent Tutoring System for a University Cooperation // Information System, Engineering, Technology & Applied Science Research, Oct. 2018, vol. 8, no. 5, pp. 3427.

4. Ajit Kumar Singh, Akash Nag, Sunil Karforma, Sripati Mukhopadhyay, Implementation of Multi-Agent based Digital Rights Management System for Distance Education (DRMSDE) using JADE (IJACSA) // International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2019,Vol. 10, No. 3, p. 343–352.

5. Цибульский Г. М. Мультиагентный подход к анализу изображений: монография / отв. ред. В. В. Москвичев. Новосибирск, 2005. 188 с.

E. I. Gerasimova
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
egerasimova@sfu-kras.ru

STRUCTURAL MODEL OF A MULTIAGENTIC SYSTEM AGENT

Abstract. The article proposes a generalized structure of a multi-agent system agent. The main idea is that all agents could have the same structure and different content, namely, they were each able to solve their own individual problem and achieve their goal. The agent structure includes a knowledge base and agent database, agent interaction and knowledge acquisition components, and a solver. The agent environment is considered. The purpose of the work is to create a unified concept of a multi-agent system agent to increase the possibility of practical application of the multi-agent approach in a wider range of problems. In conclusion, the article draws conclusions about the possibilities that the proposed agent structure opens up.

Keywords: multi-agent systems (MAS), artificial intelligence (AI), knowledge, agent environment

УДК 528.854

Д. В. Жуков, А. Г. Саидов, В. В. Терентьева, Е. И. Астахова
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
spb.pilligrim@gmail.ru

ОПЫТ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ *YOLOV8* НА ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ВЫРАЖЕННОЙ ТЕКСТУРОЙ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Аннотация. Описан успешный опыт обучения нейронной сети *YOLOv8* на ограниченном объеме обучающих данных. В качестве решаемой задачи рассматривалась возможность идентификации на цветных трехканальных космических снимках высокого разрешения уникальных по своим геометрическим характеристикам транспортных контейнеров. Всего при обучении нейронной сети было использовано 109 изображений с 1 017 меток. Оптимальные для обучения гиперпараметры подбирались с помощью организации итеративного процесса, основанного на генетическом алгоритме. Проблема ошибочного распознавания ложных целей была решена путем добавления в исходный набор данных неразмеченных изображений. В результате проведенных работ была сформирована нейросетевая модель с показателем *AP* равным 0,86.

Ключевые слова: обучение нейронной сети, ограниченный объем обучающих данных, распознавание антропогенных объектов, подбор значений гиперпараметров, минимизация ошибок второго рода

Развитие космических систем дистанционного зондирования Земли, общедоступность данных космической съемки, повышенные требования к оперативности обработки материалов съемки обуславливают необходимость автоматизации процесса дешифрирования космических снимков (КС). Одним из основных механизмов решения этой задачи в настоящее время является применение нейросетевых технологий, которые позволяют сравнительно быстро обрабатывать большие объемы данных, и при этом показывают высокую точность при распознавании объектов на изображениях [1], исключая при этом человеческий фактор. Вместе с тем разработка нейросетевых моделей требует значительных временных и ресурсных затрат. Связано это прежде всего с необходимостью формирования обучающих наборов данных больших объемов [2]. На практике получить достаточное для полноценного обучения нейронных сетей (НС) количество изображений объектов интереса, которые требуется обнаружить на КС, не всегда представляется возможным, особенно это касается уникальных либо малоизученных элементов сцены. Например, при анализе структуры сложносоставного (состоящего из множества отдельных элементов) антропогенного

© Жуков Д. В., Саидов А. Г., Терентьева В. В., Астахова Е. И., 2025

объекта нередко возникает необходимость идентификации отдельных его элементов, которые, в силу развития научно-технического прогресса, могут присутствовать только на ограниченном количестве обследуемых промышленных предприятий. В ВКА им. А. Ф. Можайского решалась задача, заключающаяся в распознавании на высокодетальных КС складов транспортных контейнеров (СТК). Особенность поставленной задачи заключалась в том, что искомые элементы представляли собой уникальные контейнеры, отличающиеся от повсеместно используемых аналогов прежде всего геометрическими размерами. Анализ текстурных характеристик изображений объекта интереса показал неудовлетворительную разделимость искомых СТК с другими аналогичными элементами – ложными целями (ЛЦ): энтропия Шеннона [3] принимала значение в районе 0,83. Поэтому было принято решение обучить НС для их распознавания. Основная сложность при этом заключалась в том, что достоверная информация о наличии складов с искомыми контейнерами была получена только для 11 промышленных предприятий, что существенно ограничивало объем обучающих данных, дополнительное увеличение которого могло быть осуществлено за счет привлечения разновременных изображений одного и того же объекта и кадрирования больших по площади СТК.

В результате разметки был сформирован набор данных, статистические характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики набора данных
для обучения НС при распознавании СТК

Характеристика	**Значение**
Общее число изображений	109
Общее число классов	1
Общее число меток (объектов интереса)	1017
ЛРМ изображений (м)	0,18…0,68

Обученная на представленном наборе данных НС *YOLOv8* [4] имела значение метрики *AP* равной 0,53.

Повышение показателей качества обучения НС на практике может быть достигнуто за счет подбора оптимальных значений гиперпараметров (ГП).

Настройка значений ГП производилась с помощью генетического алгоритма [5]. Графическое представление этого процесса представлено на рис. 1.

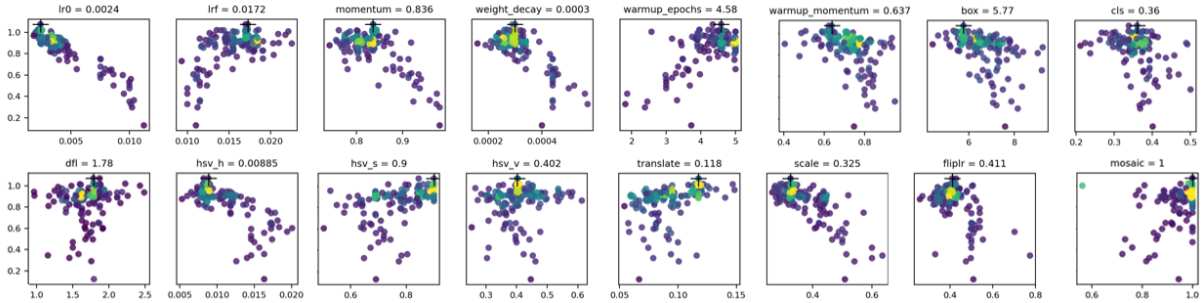


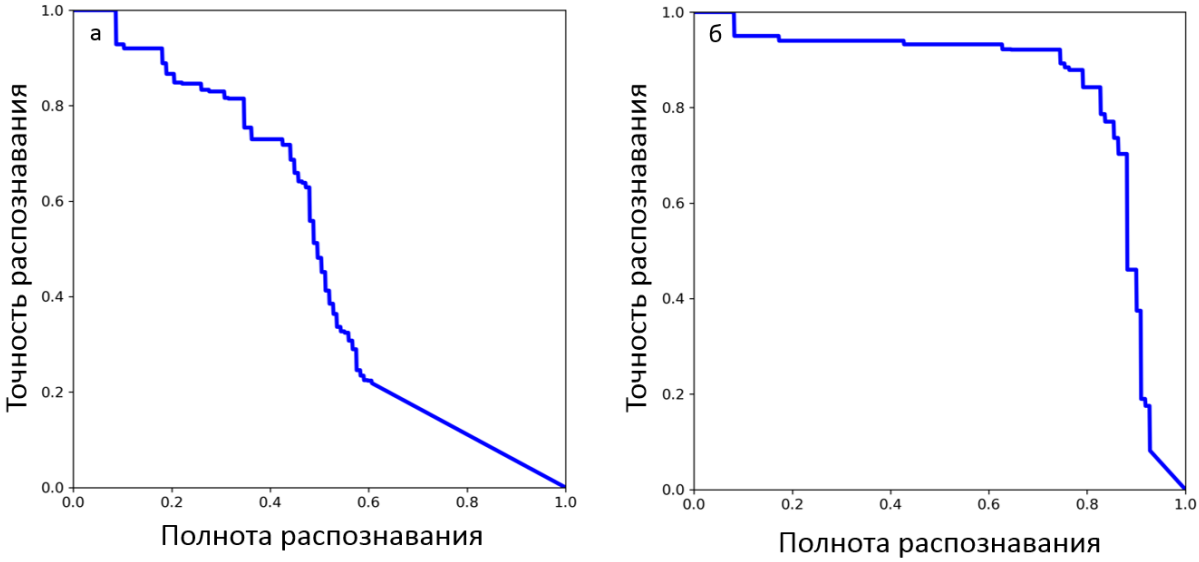
Рис. 1. Графическое представление процесса подбора оптимальных значений ГП при обучении *YOLOv8* для распознавания СТК

Названия диаграмм, приведенных на рис. 1, соответствуют названиям варьируемых значений ГП: «*lr0*», «*lrf*», «*momentum*», «*warmup_epochs*», «*warmup_momentum*» – блок ГП задающих скорость обучения НС, «*weight_decay*» – коэффициент, используемый при расчете штрафов в случае переобучения НС, «*box*», «*cls*», «*dfl*» – блок коэффициентов, используемых при расчете функций потерь, «*hsv_h*», «*hsv_s*», «*hsv_v*» – параметры яркостной коррекции при аугментации данных, «*translate*», «*scale*», «*flipr*» – параметры геометрической коррекции при аугментации данных, «*mosaic*» – параметр, определяющий возможность «склейки» изображения из различных частей при аугментации данных.

Настройка оптимальных значений ГП позволила увеличить метрику *AP* с 0,53 до 0,86.

Несмотря на сравнительно высокие значения метрики *AP*, проверка работы обученной модели НС на дополнительных данных, представляющих собой территории антропогенных объектов, на которых отсутствуют искомые элементы, выявила значительное количество ЛЦ, которые НС распознает как СТК. К типичным ЛЦ относятся: солнечные панели на крышах зданий, участки дорожной разметки, водная поверхность при волнении, участки железнодорожных путей, открытые склады похожих типов контейнеров, сельскохозяйственные поля. При проверке работы НС на 4 570 изображениях, ЛЦ, распознанные как СТК, присутствовали на 348 из них.

Для минимизации ошибок второго рода в исходный набор обучающих данных были добавлены 631 неразмеченных изображений типовых ЛЦ. Обученная на новом наборе данных НС позволила значительно уменьшить количество ошибок второго рода: число изображений с ЛЦ сократилось с 348 до 17. Сравнение графиков, иллюстрирующих качество обучения первоначальной модели НС и модели НС, после доработок (подбора оптимальных значений ГП и включение в состав обучающих данных изображений типовых ЛЦ) приведено на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Зависимости точности от полноты распознавания обученных моделей НС *YOLOv8* при различных пороговых значениях степени уверенности НС: *а* – исходная модель НС; *б* – модель НС после доработки

Таким образом была решена задача обучения модели НС на базе архитектуры *YOLOv8* в условиях ограниченного объема обучающих данных. В качестве распознаваемых объектов был выбран только один элемент: СТК, имеющий устойчивые текстурные признаки. Это позволило значительно упростить процесс обучения НС, так как классификатор содержал только один распознаваемый класс, и в последствии организовать подбор оптимальных значений ГП с помощью генетического алгоритма, что в других случаях (при разработке модели НС с полноценным классификатором и достаточным объемом обучающих данных) требует значительных временных и ресурсных затрат. Добавление в обучающий набор данных неразмеченных изображений с типовыми ЛЦ минимизировало количество ошибок второго рода.

Список источников

1. Захватов Д. М., Лукиных А. А. Распознавание изображений с использованием нейронных сетей: проблемы и перспективы // Современные научные исследования и инновации. 2023. № 9.

2. Окунев С. В. Рассмотрение способов формирования наборов данных для обучения нейронных сетей // Вестник науки и образования. 2020. № 2 (80). Часть 3. С. 16–19.

3. Абульханов С. Р. Использование информационной энтропии Шеннона для параметризации шероховатой поверхности деталей машиностроения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 1. С. 44–54.

4. Mupparaju Sohan, Thotakura Sai Ram, Venkata Rami Reddy Ch. A Review on YOLOv8 and its Advancements // Data Intelligence and Cognitive Informatics. 2024. С. 529–545.

5. Давронов Ш. Р. Обзор современных генетических алгоритмов и их применение на практике // Молодой ученый. 2023. № 36 (483). С. 15–18.

D. V. Zhukov, A. G. Saidov, V. V. Terentyeva, E. I. Astakhova
Military Space Academy of A. F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russian
vka@mil.ru

LIMITED-DATA TRAINING OF YOLOV8 FOR ANTHROPOGENIC OBJECT DETECTION WITH DISTINCT TEXTURAL FEATURES IN REMOTE SENSING IMAGERY

Abstract. This paper presents a successful case study of training a YOLOv8 neural network with limited training data. The study addresses the challenging task of identifying uniquely-shaped shipping containers in high-resolution RGB satellite imagery. The implemented solution utilized a dataset of 109 images containing 1,017 annotated instances. Optimal training hyperparameters were tuned using an iterative process based on a genetic algorithm. The false positive issue was addressed by augmenting the original dataset with unlabeled images. The resulting model achieved an AP (Average Precision) score of 0.86.

Keywords: instance segmentation, satellite imagery, limited training data, dataset, anthropogenic object, hyperparameter optimization, false positive reduction

УДК 004.8

В. А. Клековкин[1], Н. Г. Марков[2]
[1, 2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия
[1]vak37@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ТЕРРИТОРИИ ОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ *YOLOV8S*

Аннотация. Рассмотрены структура и особенности системы мониторинга воздушного пространства и территории опасных технологических объектов с целью выявления подвижных объектов, представляющих террористическую угрозу технологическим объектам. Носителем подсистемы компьютерного зрения, входящей в состав этой системы, служит современный беспилотный летательный аппарат вертолетного или самолетного типа. Подсистема имеет несколько видеокамер слежения и с помощью модели сверточной нейронной сети *YOLOv8s*, реализованной на одноплатном вычислителе *Rockchip RK* 3399, обнаруживает и распознает на изображениях с камер подвижные объекты. Подсистема передачи данных по радиоканалу передает команды на БПЛА и результаты мониторинга в наземную подсистему управления мониторингом. Показаны особенности каждой из разработанных подсистем.

Ключевые слова: система мониторинга, опасный технологический объект, беспилотный летательный аппарат, свёрточная нейронная сеть *YOLOv8s*

Введение. В последние годы значительное внимание уделяется созданию систем мониторинга состояния опасных технологических объектов [1; 2]. Под такими объектами понимаются цеха промышленных предприятий и объекты энергетики со сложными технологическими процессами, нарушение которых опасно для человека и окружающей среды. Примерами опасных объектов являются АЭС, нефтеперерабатывающие и нефтехимические заводы, ГЭС и т. п. Системы мониторинга должны путем анализа данных видеонаблюдения выявлять противоправные посягательства (нарушение охранных зон и зон минимальных безопасных расстояний и т. п.) и террористические угрозы для таких технологических объектов [2]. Часто мониторинг заключается в обнаружении и распознавании в реальном времени подвижных объектов в воздушном пространстве и вблизи территорий технологических объектов.

В работе рассматриваются структура и особенности системы мониторинга воздушного пространства и территории опасных технологических объектов, создаваемой для выявления нежелательных подвижных объектов. Ее подсистема компьютерного зрения разрабатывается с использованием модели сверточной нейронной сети (СНС) и размещается на беспилотном летательном аппарате (БПЛА).

© Клековкин В. А., Марков Н. Г., 2025

Структура системы мониторинга. Разработанная система включает подсистему компьютерного зрения, устанавливаемую на БПЛА вертолетного или самолетного типа, наземную подсистему управления мониторингом и подсистему передачи данных. Последняя подсистема позволяет по радиоканалу посылать команды на БПЛА и принимать с него данные мониторинга. Выбор типа БПЛА зависит от особенностей опасных технологических объектов и решаемых с помощью системы задач. Обязательными блоками БПЛА служат контроллер полета, *GPS*-модуль, аккумулятор, рассчитанный на значительное полетное время, или двигатель с регулятором скорости и т. п. Отметим, что БПЛА вертолетного типа может располагаться над объектом наблюдения и ввиду стационарного местонахождения иметь возможность электропитания с земли.

Подсистема компьютерного зрения. Устанавливаются на БПЛА (имеет в своем составе) две видеокамеры (для мониторинга верхнего и нижнего полупространств), два тепловизора для обнаружения в вечернее и ночное время подвижных объектов и очагов возгораний и одноплатный вычислитель *Rockchip RK 3399*. Последний управляет сбором видеоданных и ведет их автоматический анализ с помощью модели СНС. Первое требование к подсистеме – выполнение всех этих функций в реальном времени. С учетом потенциально большой скорости перемещения нежелательных подвижных объектов, особенно летающих объектов (ЛО) в воздушном пространстве, это требование указывает, что значение метрики FPS (число кадров в секунду) должно быть не менее 50–60. Второе требование по точности обнаружения и классификации подвижных объектов – не менее 0,92 по известным метрикам $AP_{0.5}$ и $mAP_{0.5}$. С учетом этих высоких требований к подсистеме и, соответственно, к модели СНС предварительно были выбраны две модели *YOLOv8s* и *YOLOv8x* из хорошо себя зарекомендовавшего при создании многих приложений семейства *YOLOv8*.

Для окончательного выбора модели СНС для подсистемы были проведены исследования эффективности этих двух моделей**.** Для их обучения, валидации и тестирования использовались два датасета, описанные в [3] и содержащие размеченные изображения размером 640 × 640 пикселей ЛО трех классов (БПЛА самолетного типа, БПЛА вертолетного типа и Птица). На изображениях присутствуют либо только малоразмерные (площадь не более 32 × 32 пикселя) объекты (первый датасет) либо разномасштабные ЛО (второй датасет). Получены результаты исследования точности моделей по метрикам *AP* и *mAP* в случае разномасштабных ЛО (табл. 1) и в случае ЛО малых размеров (табл. 2). В табл. 3 показаны результаты исследования моделей по усредненной скорости их вычислений на вычислителе *Rockchip RK* 3399 по метрике *FPS*. При вычислении *FPS* учитывалось время анализа одного изображения *Inference* и время отбора ограничивающих рамок с помощью алгоритма *NMS*.

Таблица 1

Результаты исследования моделей семейства *YOLOv8* по метрикам *AP* и *mAP* на датасете с разномасштабными объектами

Модель СНС	**Класс ЛО**			
	БПЛА самолетного типа	Птица	БПЛА вертолетного типа	Все классы
	$AP_{0.5}$, $mAP_{0.5}$			
YOLOv8s	0,950	0,927	0,978	0,952
YOLOv8x	0,951	0,910	0,974	0,945

Таблица 2

Результаты исследования моделей семейства *YOLOv8* по метрикам *AP* и *mAP* на датасете с объектами малых размеров

Модель СНС	**Класс ЛО**			
	БПЛА самолетного типа	**Птица**	**БПЛА вертолетного типа**	**Все классы**
	$AP_{0.5}$, $mAP_{0.5}$			
YOLOv8s	0,937	0,935	0,966	0,946
YOLOv8x	0,935	0,954	0,969	0,953

Таблица 3

Результаты исследования моделей семейства *YOLOv8* по усредненной скорости вычисления на датасетах

Модель СНС	**Размеры объектов**					
	малые	**разных масштабов**	**малые**	**разных масштабов**	**малые**	**разных масштабов**
	***Inference*, мс**		***NMS*, мс**		***FPS***	
YOLOv8s	4,6	4,1	1,8	2,3	156	156
YOLOv8x	29,2	29,4	3,6	2,5	30	31

Анализ этих результатов позволяет считать, что как в случае малоразмерных ЛО, так и в случае разномасштабных объектов точность обнаружения и классификации ЛО этими моделями близка и превышает порог 0,92 по каждой из метрик *AP* и *mAP*. Исключением является модель *YOLOv8x* при классификации ЛО класса «Птица». При исследовании усредненной скорости вычисления моделей видим, что здесь явное преимущество имеет модель *YOLOv8s*, и только она дает значения *FPS*, превышающие порог 50–60. Поэтому она и была выбрана для реализации в подсистеме компьютерного зрения.

Особенности подсистем управления мониторингом и передачи данных. Ядром подсистемы управления мониторингом является программное обеспечение (ПО) известной свободно-распространяемой геоинформационной системы *QGIS*. Это ПО было дополнено рядом модулей, разработанных с учетом специфики решаемых задач, и позволяет операторам, работающим с подсистемой, осуществлять прокладку и отслеживание

маршрутов БПЛА, отображать координаты обнаруженного подвижного объекта на карте и т. п.

Обмен командами и данными между бортовой и наземной компонентами системы мониторинга ведется по радиоканалу. Для этого на БПЛА имеется радиомодуль, а в подсистеме управления мониторингом – приемопередающая аппаратура. Для повышения достоверности передаваемых команд и данных в бортовой и наземной частях подсистемы передачи данных формируются коды, обнаруживающие ошибки, и помехоустойчивые коды, исправляющие ошибки.

Заключение. Созданный макет системы мониторинга прошел апробацию в реальных условиях. Результаты апробации указывают на работоспособность макета системы.

Список источников

1. Колесенков А. Н., Костров Б. В., Ручкин В. Н. Нейронные сети для мониторинга чрезвычайных ситуаций по данным ДЗЗ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 5. С. 220–225.

2. Zoev I., Markov N., Ryzhova S. The monitoring system of hazardous technological objects based on unmanned aerial vehicles //E3 S Web of Conferences. 2020. Vol. 223. Article No. 03005. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303005.

3. Небаба С. Г., Марков Н. Г. Сверточные нейронные сети семейства YOLO для мобильных систем компьютерного зрения // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. Т. 16, № 3. С. 615–631. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-615-631.

V. A. Klekovkin[1], N. G. Markov[2]
[1, 2]National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
[1]vak37@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

AIRSPACE AND TERRITORY MONITORING SYSTEM FOR HAZARDOUS TECHNOLOGICAL FACILITIES BASED ON THE YOLOV8S CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Abstract. This paper presents the structure and key features of an airspace and territory monitoring system designed for hazardous technological facilities, with the aim of detecting moving objects that may pose a terrorist threat. The system incorporates a computer vision subsystem mounted on a modern unmanned aerial vehicle (UAV) of either helicopter or fixed-wing type. The subsystem includes multiple surveillance cameras and employs a convolutional neural network model YOLOv8s, implemented on a Rockchip RK3399 single-board computer, to detect and identify moving objects in real time. Collected data are transmitted via radio channel to a ground-based monitoring control subsystem. The paper also describes the distinctive characteristics and functionalities of each developed subsystem.

Keywords: monitoring system, hazardous technological facility, unmanned aerial vehicle, convolutional neural network YOLOv8s

УДК 004.93:528.854

И. М. Лазарева[1], О. И. Ляш[2], В. К. Баскова[3], В. Г. Кошкина[4], А. В. Ткачук[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия
[1]lazareva.im@mauniver.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КРОМКИ ЛЬДА НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

Аннотация. В данном исследовании предлагается подход к автоматическому обнаружению границы льда в акваториях Баренцева и Белого морей. В анализе используются данные радиолокационных снимков *Sentinel-1*. Получаемое изображение проходит специальную предобработку с целью улучшения его качества и подготовки к дальнейшему анализу. Затем применение алгоритмов компьютерного зрения позволяет выделить границу искомых зон: воды, льда и суши. Программная реализация представленного решения выполнена на языке *Python* с использованием библиотек компьютерного зрения и автоматизирует процесс обнаружения кромки морского льда, начиная с загрузки спутникового снимка до отображения найденной границы на веб-карте.

Ключевые слова: спутниковые данные, *Sentinel-1*, кромка льда, алгоритмы компьютерного зрения, Арктический регион

Введение. Лед играет важную роль в экосистемах и климатических процессах планеты. Кромка льда – это граница между ледяным покровом и открытой водой, ее динамика оказывает значительное влияние на окружающую среду. Таяние льдов приводит к изменению температуры и солености воды, что, в свою очередь, влияет на распространение планктона и других морских организмов. Границы морского льда регулярно меняются под воздействием климатических условий, что может перекрывать судоходные пути и создавать опасные условия для морской деятельности.

В настоящем исследовании было принято решение сосредоточиться на двух зонах: акватории, на которой льды ежегодно меняются, такой как Баренцево море, и акватории с сезонным ледяным покровом, который образуется зимой и полностью исчезает летом, как в Белом море. В течение зимнего периода льды в море распространяются с севера на юг и с востока на запад. Этот процесс продолжается до апреля включительно, затем, вплоть до сентября, происходит отступление кромки льда на север и на восток [1].

На сегодняшний день существующие наземные средства мониторинга кромки льда, обеспечивающие постоянное наблюдение за ее состоянием, достаточно затратны. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса позволяет получить доступное решение задач мони-

© Лазарева И. М., Ляш О. И., Баскова В. К., Кошкина В. Г., Ткачук А. В., 2025

торинга и получать регулярные данные, охватывающие большие территории. Однако часто исследование спутниковых снимков осуществляется на основе визуального анализа [2].

В данном исследовании обнаружение границ морского льда осуществлялось на основе анализа радиолокационных снимков с синтетической апертурой (РСА) спутниковой платформы *Sentinel-1*. Использование алгоритмов компьютерного зрения позволило автоматизировать процесс обнаружения кромки льда. Описанный подход был реализован на языке *Python* с использованием библиотек *OpenCV*, *Matplotlib*, *GDAL*, *Requests*, *Pyproj*. Полученный результат отображается средствами георесурса *NextGIS*.

Данные и инструменты. В качестве источника данных были выбраны спутники платформы *Sentinel-1*. Радиолокационная съемка (РЛС) использует микроволновое излучение для получения изображений земной поверхности, независимо от погоды и времени суток. Спутник *Sentinel-1A* с радаром синтетической апертуры (*SAR*) передает зондирующие сигналы с плоской поляризацией (горизонтальная или вертикальная) и различными комбинациями (*VV*, *VH*, *HH*, *HV*). Анализ источников показывает, что поляризации *VV* и *VH* обеспечивают более точные результаты, тогда как *HH* и *HV* дают контрастные изображения [3]. В данной работе применялись спутниковые изображения с поляризацией *HH* и *HV*.

Для получения снимков со спутника *Sentinel*-1A использовался открытый сервис научного анализа данных спутниковых наблюдений *ВЕГА-Science* (*http://sci-vega.ru*). *ВЕГА-Science* – это система, которая предоставляет доступ к спутниковым снимкам через *API*. Возможности системы включают поиск снимков по различным параметрам (дате, координатам, типу сенсора), а также загрузку выбранных изображений в нужном формате. Получение снимков через *API ВЕГА-Science* позволяет автоматизировать процесс получения данных, что особенно полезно при работе с большими объемами информации или при необходимости регулярного обновления данных.

В данной работе для программной реализации определения кромки льда по спутниковым снимкам был выбран язык программирования *Python*. Для работы с алгоритмами компьютерного зрения использовалась библиотека *OpenCV*; для визуализации данных, полученных со снимков, – библиотека *Matplotlib*; для чтения и записи растровых форматов геопространственных данных – библиотека *GDAL*; для составления *HTTP*-запросов – библиотека *Requests*; для выполнения картографических преобразований между разными системами координат – библиотека *Pyproj*.

Для размещения и визуализации полученных в результате анализа геопространственных данных использовалась платформа *NextGIS*. *NextGIS* поддерживает интеграцию с различными источниками данных и предоставляет инструменты для их обработки и визуализации.

Результаты. В рамках проведенного исследования был реализован комплексный подход к решению задачи автоматизированного анализа спут-

никовых снимков ледового покрова и публикации результатов на геоинформационном ресурсе *NextGIS*. Для получения исходных данных использовался программный доступ к *API* сервиса *ВЕГА-Science* с помощью *Python*-библиотеки *Requests*, что позволило автоматизировать загрузку спутниковых снимков.

Затем выполнялась геометрическая привязка снимков к географической системе координат *WG*S84 с использованием ГИС *QGIS* для корректного отображения и анализа данных.

Для фокусировки анализа на ледяном покрове и водных объектах применялись методы объединения нескольких снимков в один и исключения области суши.

Для сегментации изображения на области, соответствующей воде, льду и суше, использовался метод сегментации на основе перцентилей, позволяющий разделить данные на группы, характеризующиеся различной отражательной способностью.

На основе результатов сегментации создавалась маска льда, выделяющая области, соответствующие ледяному покрову. Для улучшения качества выделенных границ выполнялась нормализация градиента яркости изображения, бинаризация и морфологическая операция «закрытие».

Для определения формы и положения ледяного покрова применялся алгоритм поиска контуров с последующей фильтрацией контуров по площади для исключения мелких и несущественных объектов.

В заключение выполнялось преобразование координат пикселей, соответствующих выделенной границе льда, в географические координаты (широта/долгота) с использованием информации о геопривязке исходного спутникового снимка, что позволило подготовить данные для публикации на соответствующем геоинформационном ресурсе.

Интерфейс для взаимодействия с пользователем и результат анализа представлен на рис. 1.

Рис. 1. Отображение на геоинформационном ресурсе результата анализа спутниковых данных за январь 2021 г.

Выводы. Полученные результаты позволяют построить инструмент для своевременного детектирования границ морского льда на основе регулярного получения спутниковых данных. Представленный алгоритм может быть использован для анализа спутниковых данных с целью оценки ледовой обстановки в акваториях Баренцева и Белого морей.

Развитие исследования предполагает адаптацию предлагаемого решения для использования данных отечественного спутника Кондор ФКА.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 24-17-20021 и министерства образования и науки Мурманской области (Соглашение от 03.05.2024 № 199).

Список источников

1. Ocean. Ice Edge. URL: https://oceana.org/marine-life/ice-edge/ (дата обращения: 20.03.2025).

2. Львова Е. В., Заболотских Е. В. Изменчивость ледяного покрова в Печорском море и ее корреляция с температурой поверхности Баренцева моря по данным спутниковых наблюдений и реанализа. 2023 Лёд и снег. Т. 63. № 4. С. 157–170. DOI: 10.31857/S2076673423040105

3. Процесс обработки данных SAR Sentinel-1. URL: https://learn.arcgis.com/ru/projects/process-sentinel-1-sar-data/#Изучение-готовых-к-анализу-спутниковых-изображений-sar (дата обращения: 13.03.2025).

I. M. Lazareva[1], O. I. Lyash[2], V. K. Baskova[3],
V. G. Koshkina[4], A. V. Tkachuk[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia
[1]lazareva.im@mauniver.ru

USING COMPUTER VISION ALGORITHMS TO DETECT ICE EDGES IN SATELLITE IMAGES

Abstract. This study suggests an approach to the automatic detection of the ice boundary in the waters of the Barents and White Seas. The analysis uses data from Sentinel-1 radar images. The resulting image undergoes special preprocessing in order to improve its quality and prepare for further analysis. Then the application of computer vision algorithms allows you to identify the boundary of the desired zones: water, ice and land. The software implementation of the presented solution is made in Python using computer vision libraries and automates the process of detecting the edge of sea ice, starting from uploading a satellite image to displaying the found border on the map.

Keywords: satellite data, Sentinel-1, ice edge, computer vision algorithms, Arctic region

УДК 004.8

А. Ю. Малкин[1], Н. Г. Марков[2]
[1, 2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия
[1]malkin@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ К ИМПУЛЬСНЫМ ПОМЕХАМ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ НА ПОЛУЧЕННЫХ С БПЛА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Аннотация. Исследуется устойчивость модели сверточной нейронной сети *Mo-U-Net* с робастной функцией потерь Уэлша к импульсным помехам на изображениях деревьев пихты, полученных с помощью установленной на БПЛА фотокамеры. Для этого создан датасет, фрагменты выборок которого имеют искусственным образом внесенные импульсные помехи. Исследования показали, что происходит плавное снижение устойчивости модели *Mo-U-Net* при зашумлении фрагментов как отдельных выборок датасета, так и их комбинаций. Однако при заданных значениях параметров зашумления фрагментов пороговое значение 0,5 устойчивости не было пройдено и поэтому модель *Mo-U-Net* можно использовать на практике в условиях таких помех.

Ключевые слова: свёрточная нейронная сеть *Mo-U-Net*, попиксельная классификация изображения, импульсные помехи, робастная функция потерь Уэлша

Введение. Сегодня актуальной является задача проведения оперативного мониторинга хвойных лесов на предмет определения очагов поражения деревьев насекомыми-вредителями. В последние годы все чаще мониторинг проводится дистанционным методом с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных фото- и (или) видеоаппаратурой. При этом в процессе съемки лесов и, если это используется, при передаче изображений с БПЛА на наземную станцию по радиоканалу возможно появление импульсных помех на получаемых изображениях. Для автоматизации процесса дешифрирования изображений с БПЛА, по сути выполнения классификации деревьев по степени поражения вредителями (по классам здоровья) на изображениях, применяются модели сверточных нейронных сетей (СНС) [1; 2]. Наличие импульсных помех на изображениях приводит к снижению точности классификации пораженных хвойных деревьев моделью СНС. Одним из подходов к сохранению устойчивости модели СНС к импульсным помехам является применение робастной функции потерь при ее обучении и валидации [3].

В данной работе исследуется эффективность такого подхода при решении задачи классификации моделью СНС *Mo-U-Net* зашумленных импульсными помехами изображений пораженных деревьев пихты, полученных с БПЛА.

© Малкин А. Ю., Марков Н. Г., 2025

Создание датасета. Для разработки нового датасета с фрагментами изображений хвойных деревьев с импульсными помехами использовался датасет с размеченными изображениями деревьев пихты сибирской, пораженных уссурийским полиграфом. Исходные RGB-изображения для этого датасета были получены с помощью фотокамеры, установленной на БПЛА *DJI Phantom* 3 *Standart* [2]. При разметке изображений экспертами выделялись четыре класса состояния здоровья деревьев: «Живое», «Отмирающее», «Свежий сухостой» и «Старый сухостой», а также пятый класс – «Фон», куда включены деревья других пород и прочие объекты на земной поверхности. Изображения и их эталонные карты сегментации (результаты разметки изображений экспертами) представлены в датасете в виде фрагментов размером 256 × 256 × 3 пикселей. Датасет включает обучающую выборку с 2004 фрагментами, валидационную с 672 фрагментами и тестовую выборку с 91 фрагментом.

На основе этого датасета был создан новый датасет, содержащий в зависимости от сценария исследования импульсные помехи на фрагментах той или иной выборки или на фрагментах комбинаций двух или трех выборок исходного датасета. При зашумлении каждого фрагмента любой из выборок датасета происходило наложение импульсных помех на 25 % площади фрагмента, при этом амплитуда помех A составляет 1,5. Иными словами, значения амплитуды яркости пикселя каждого из каналов RGB, подлежащего зашумлению, увеличивалось в 1,5 раза.

Модель сверточной нейронной сети Mo-U-Net. Для исследования устойчивости к импульсным помехам на изображениях деревьев пихты была выбрана и программно реализована модель СНС *Mo-U-Net*, хорошо себя зарекомендовавшая при решении задачи попиксельной классификации изображений деревьев пихты, пораженных уссурийским полиграфом [4]. В качестве функции потерь, применяемой в алгоритме обратного распространения ошибки при обучении этой модели, использовалась робастная функция потерь (РФП) Уэлша, применяемая при работе с данными, содержащими помехи [5].

Для оценки точности попиксельной классификации моделью *Mo-U-Net* изображений деревьев пихты, зашумленных импульсными помехами, использовалась метрика *IoUc*. В наших исследованиях наряду с данным выражением также используется интегрированная метрика *mean Intersection over Union* (*mIoU*), рассчитываемая как среднее значение *IoUc* по всем $C = 5$ классам. Отметим, что значения этих метрик – превышающие 0,5 – соответствуют высокой точности классификации деревьев. Будем считать метрику *mIoU* мерой устойчивости исследуемой модели *Mo-U-Net* к импульсным помехам: чем больше значение этой метрики, тем выше устойчивость модели.

Результаты исследования модели и их обсуждение. После задания сценария очередного исследования устойчивости модели *Mo-U-Net* из нового датасета выбирается одна или более выборок с зашумленными фрагментами. Затем на первом этапе эксперимента при обучении и валидации

модели *Mo-U-Net* осуществляется поиск квазиоптимального значения коэффициента ß РФП Уэлша, при котором модель демонстрирует максимальное значение метрики *mIoU* на валидационной выборке. Процесс поиска такого значения коэффициента ß происходит с применением байесовского алгоритма оптимизации в течение ста итераций. Далее в эксперименте при найденном значении коэффициента ß на тестовой выборке происходит оценка точности классификации пораженных деревьев пихты моделью и, соответственно, оценка устойчивости модели *Mo-U-Net* к импульсным помехам.

Сначала проведены обучение и валидация модели *Mo-U-Net* на новом датасете в каждом из трех экспериментов, когда зашумляются фрагменты только одной из трех выборок. Затем для полученных трех квазиоптимальных значений коэффициента ß были проведены исследования модели с использованием тестовой выборки. Результаты исследований в виде значений метрики *mIoU* на этой выборке приведены в табл. 1. В первой строке таблицы для сравнения также показаны результаты исследования модели на фрагментах без помех (использовался исходный датасет).

Таблица 1

Устойчивость модели *Mo-U-Net*
в случае зашумления фрагментов одной из выборок

Выборки датасета	**Коэффициент ß**	***mIoU* на тестовой выборке**
Нет помех (исходный датасет)	5,4457	0,64
Обучающая	3,3543	0,64
Валидационная	2,2326	0,62
Тестовая	7,5514	0,54

Из табл. 1 следует, что происходит плавное уменьшение устойчивости модели в случаях зашумления валидационной или тестовой выборок, однако пороговое значение 0,5 не пройдено и модель *Mo-U-Net* можно использовать на практике.

Результаты экспериментов, в которых исследовалась устойчивость модели *Mo-U-Net* к импульсным помехам в случаях зашумления фрагментов различных комбинаций выборок, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Устойчивость модели *Mo-U-Net* в случаях зашумления фрагментов
различных комбинаций выборок

Комбинации выборок датасета	**Коэффициент ß**	***mIoU*** **на тестовой выборке**
Обучающая и валидационная	5,4457	0,63
Обучающая и тестовая	3,3543	0,62
Валидационная и тестовая	2,2326	0,56
Обучающая, валидационная и тестовая	7,5514	0,62

Отметим, что при зашумлении фрагментов валидационной и тестовой выборок устойчивость модели минимальна, но выше порога 0,5 по метрике *mIoU*.

Заключение. Программно реализована и исследована модель СНС *Mo-U-Net* с РФП Уэлша на разработанном датасете с зашумленными импульсными помехами фрагментами выборок. Исследования показали, что за счет использования РФП Уэлша происходит плавное снижение устойчивости модели *Mo-U-Net* при зашумлении фрагментов как отдельных выборок датасета, так и их комбинаций. Однако при заданных значениях параметров зашумления фрагментов (помехи занимают 25 % площади фрагмента, A = 1,5) пороговое значение 0,5 устойчивости не было пройдено и поэтому модель *Mo-U-Net* можно использовать на практике в условиях таких помех на изображениях.

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. V. 11. P. 643–662. DOI: 10.3390/rs11060643

2. Керчев И. А., Маслов К. А., Марков Н. Г., Токарева О. С. Семантическая сегментация поврежденных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126

3. Малкин А. Ю., Марков Н. Г. Помехоустойчивость модели полносверточной нейронной сети U-Net при семантической сегментации деревьев пихты на зашумленных снимках с БПЛА // Доклады ТУСУР. 2024. Т. 27. № 2. С. 64–70. DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-2-64-70

4. Марков Н. Г., Мачука К. Модели и методы глубокого обучения для решения задач дистанционного мониторинга лесных ресурсов // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 6. С. 55–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4600

5. Сивак М. А. Робастное обучение нейронных сетей с простой архитектурой для решения задач классификации : дис. … канд. техн. наук: 05.13.17. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2022. 117 с.

A. Yu. Malkin[1], N. G. Markov[2]
[1, 2]National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
[1]malkin@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

ROBUSTNESS OF THE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODEL TO IMPULSE NOISE ON CLASSIFICATION OF FIR TREES IN IMAGES OBTAINED FROM UAVS

Abstract. The robustness of the Mo-U-Net convolutional neural network model with a robust Welsh loss function to impulse noise in images of fir trees obtained using a camera installed on a UAV is investigated. For this purpose, a dataset was created, fragments of which have artificially introduced impulse noise. The research showed that there is a smooth decrease in the stability of the Mo-U-Net model when fragments of both individual samples of the dataset

and their combinations are noisy. However, with the given values of the fragment noise parameters, the threshold value of 0.5 stability was not exceeded, and therefore the Mo-U-Net model can be used in practice under such interference conditions.

Keywords: Convolutional neural network Mo-U-Net, pixel-by-pixel image classification, impulse noise, robust Welsh loss function

УДК 004.8

К. Р. Мачука[1], Н. Г. Марков[2]
[1, 2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия
[1]kristianrodrigo1@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

МОДЕЛИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ СИБИРСКОЙ КЕДРОВОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БПЛА

Аннотация. Рассмотрена задача семантической сегментации изображений крон пораженных союзным короедом деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica.* Изображения высокого разрешения получены с помощью беспилотных летательных аппаратов. Для решения такой задачи разработаны, обучены и исследованы три модели нейронных сетей. Исследования показали, что все три модели, в отличие от классической модели *U-Net*, позволяют успешно распознавать на изображениях деревья *Pinus sibirica* всех классов состояния. При этом наилучшее качество сегментации изображений обеспечивает разработанная модификация модели *Segformer*.

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

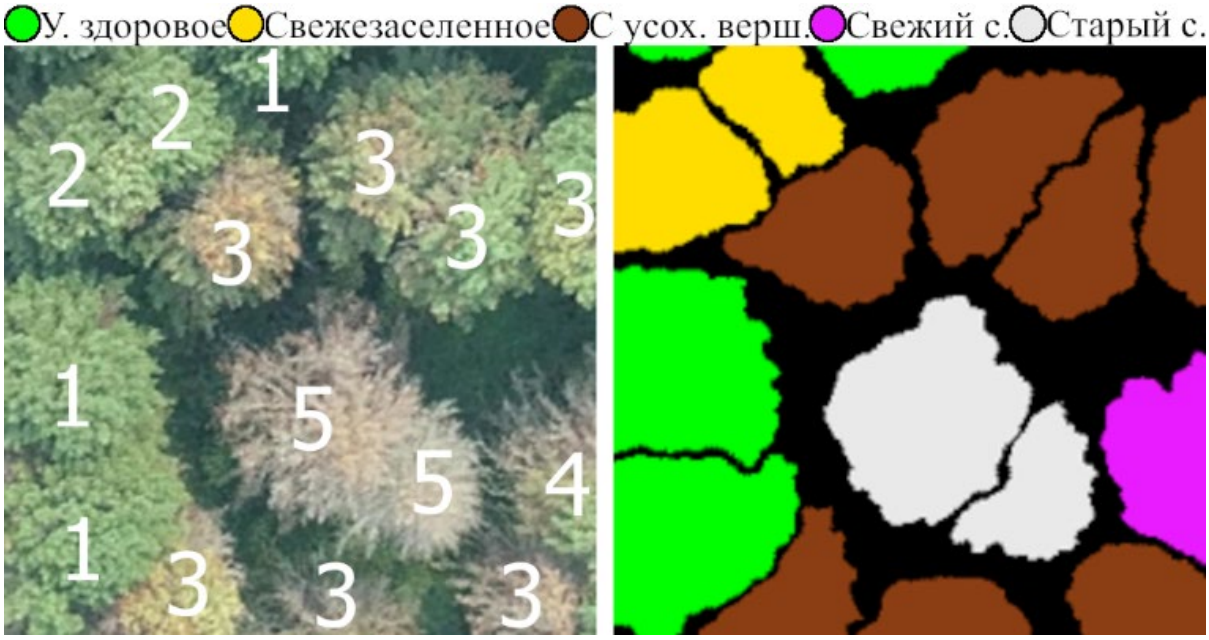
Введение. Российская Федерация обладает крупнейшими в мире лесными ресурсами, основу которых составляют хвойные насаждения. Однако управление этими ресурсами и их охрана сопряжены со значительными сложностями, обусловленными огромными площадями, труднодоступностью многих лесных регионов и высокой динамичностью природных процессов, в частности, вспышками массового размножения насекомых-вредителей [1]. Поэтому своевременное проведение лесопатологического мониторинга хвойных лесов, нацеленного на раннее обнаружение очагов таких вредителей и оценку наносимого ими ущерба, имеет решающее значение для их сохранения. При анализе полученных при мониторинге изображений используются различные модели и методы мультиклассификации крон хвойных деревьев, позволяющих выявлять состояние здоровья пораженных вредителями деревьев [2; 3].

В данной работе создаются и исследуются три модели нейронных сетей при решении задачи семантической сегментации (попиксельной классификации) изображений деревьев сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом *Ips amitinus*. Изображения получены с помощью фотокамеры, установленной на беспилотном летательном аппарате (БПЛА).

Получение и подготовка изображений для анализа. Использовались четыре ортофотоплана (разрешение ~ 0,1 м) крон деревьев сосны сибирской

© Мачука_К. Р., Марков Н. Г., 2025

кедровой *Pinus sibirica*, снятых фотокамерой с БПЛА *DJI Phantom* 4 *Pro* в июле 2019 г. Согласно методике [2] эксперты выделили 5 классов состояния деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом: «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 экспертами на изображениях по классам дополнялась оконтуриванием их крон, как показано на рис. 1. В итоге для четырех ортофотопланов получены эталонные маски (карты) сегментации.



а *б*

Рис. 1. Фрагмент исходного изображения деревьев *Pinus sibirica* с разметкой по классам (*а*) и соответствующая ему эталонная карта сегментации (*б*)

На основе полученных экспертным дешифрированием эталонных масок сегментации сформированы два датасета: первый содержит фрагменты размером 256 × 256 × 3 пикселей (шаг смещения 128 пикселей), причем в его обучающей выборке 10455 фрагментов, в валидационной выборке 2 880 фрагментов, а в тестовой – 84 фрагмента; второй датасет содержит фрагменты размером 480 × 480 × 3 пикселей (шаг 240 пикселей) с выборками – для обучения 1 842 фрагмента, 224 фрагмента для валидации и 46 фрагментов для тестирования.

Модели нейронных сетей. Для решения задачи мультиклассификации деревьев *Pinus sibirica* в первую очередь были разработаны две модели полносверточных нейронных сетей, каждая из которых основана на модели полносверточной сети *Mo-U-Net* [3] и позволяет вести семантическую сегментацию (попиксельную классификацию) изображений. Первая модель, названная *At-Mo-U-Net*, включает использование механизмов внимания, которые динамически фокусируются на высококачественных информативных

областях изображения с целью улучшения извлечения признаков и подавления нерелевантных областей. Адаптивно взвешивая пространственные и канальные признаки, модель *At-Mo-U-Net* значительно повышает точность мультиклассификации крон деревьев, когда идентификация тонких текстур имеет решающее значение. Вторая модель, получившая название *Res-Mo-U-Net*, интегрирует остаточные блоки на всех уровнях энкодера и декодера исходной модели *Mo-U-Net*. Полученная таким образом новая модель решает проблему затухания градиентов в глубоких сетях, оптимизирует распространение градиентов при обучении и сохраняет ключевые низкоуровневые признаки крон деревьев, что критически важно для точного распознавания тонкой структуры крон хвойных деревьев. Для проведения исследований также была адаптирована и модифицирована модель *Segformer* [4] со следующими ключевыми изменениями: замена *MLP*-слоев в декодере на пространственные блоки с управляющими элементами (англ. *SGU*), добавление механизма кросс-уровневого внимания и использование пирамид признаков со слоями внимания для улучшения сегментации мелких деталей крон деревьев.

Результаты исследования моделей. Исследования каждой разработанной и обученной модели, а также моделей *U-Net* и *Mo-U-Net* проводились с использованием тестовых выборок первого и второго датасетов. Анализ значений метрики *IoUc* и усредненной по всем классам деревьев метрики *mIoU* в табл. 1 и 2 показал, что модифицированная модель *Segformer* обеспечивает вне зависимости от размеров фрагментов лучшее качество сегментации изображений (выделено полужирным шрифтом) по метрике *mIoU* и превышение порога 0,5 по метрике *IoUc* для всех классов состояния деревьев *Pinus sibirica*. Модели *At-Mo-U-Net* и *Res-Mo-U-Net* делят второе и третье места и обеспечивают более высокое качество сегментации, чем классическая модель *U-Net* и ее модификация *Mo-U-Net*, особенно для классов деревьев «Свежезаселенное» и «С усохшей вершиной». Модель *U-Net* для этих двух классов дает значения метрики *IoUc* ниже порогового значения 0,5. Увеличение размера входных фрагментов до 480 × 480 × 3 пикселей привело к росту качества сегментации, даваемого всеми моделями. Таким образом, лучшим выбором для решения данной задачи сегментации является модификация модели *Segformer*, обученная на фрагментах увеличенного размера.

Заключение. Разработаны, обучены и исследованы три модели нейронных сетей при решении задачи семантической сегментации изображений деревьев *Pinus sibirica*, поврежденных союзным короедом. Показано, что эти модели, в отличие от классической модели *U-Net*, позволяют успешно распознавать на изображениях деревья всех классов, однако предпочтение следует отдать модификации модели *Segformer*.

Таблица 1

Качество сегментации изображений деревьев *Pinus sibirica*, полученное с помощью моделей на тестовой выборке с фрагментами размером 256 × 256 × 3 пикселей

Модель	***IoUc***						***mIoU***
	Фон	**Условно здоровое**	**Свежезаселенное**	**С усохшей вершиной**	**Свежий сухостой**	**Старый сухостой**	
Segformer	**0,87**	**0,76**	**0,54**	**0,53**	**0,63**	**0,74**	**0,68**
U-Net	0,82	0,71	0,46	0,47	0,57	0,72	0,63
Mo-U-Net	0,85	0,74	0,51	0,52	0,62	0,72	0,66
At-Mo-U-Net	0,85	0,75	0,53	0,53	0,62	0,73	0,67
Res-Mo-U-Net	0,84	0,75	0,52	0,51	0,61	0,73	0,66

Таблица 2

Качество сегментации изображений деревьев *Pinus sibirica*, полученное с помощью моделей на тестовой выборке с фрагментами размером 480 × 480 × 3 пикселей

Модель	***IoUc***						***mIoU***
	Фон	**Условно здоровое**	**Свежезаселенное**	**С усохшей вершиной**	**Свежий сухостой**	**Старый сухостой**	
Segformer	**0,88**	**0,77**	**0,56**	**0,56**	**0,65**	**0,75**	**0,70**
U-Net	0,85	0,72	0,50	0,50	0,58	0,72	0,65
Mo-U-Net	0,87	0,75	0,53	0,55	0,64	0,74	0,68
At-Mo-U-Net	0,87	0,76	0,55	0,55	0,64	0,74	0,69
Res-Mo-U-Net	**0,88**	0,76	**0,56**	0,55	0,63	**0,75**	0,69

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. Kerchev I. A., Markov N. G., Machuca C. R., Tokareva O. S. Classification of pest-damaged coniferous trees in unmanned aerial vehicles images using convolutional neural network models // Computer Research and Modeling. 2024. Vol. 16, No 5. P. 1271–1294.

4. Xie E., Wang W., Yu Z., Anandkumar A., Alvarez J., Luo P., SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers // Advances in neural information processing systems. 2021. Vol. 34. P. 12077–12090.

C. R. Machuca[1], N. G. Markov[2]
[1, 2]National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
[1]kristianrodrigo1@tpu.ru, [2]markovng@tpu.ru

NEURAL NETWORK MODELS FOR SEMANTIC SEGMENTATION OF IMAGES OF SIBERIAN PINE TREES OBTAINED BY UAVS

Abstract. In this work, the task of semantic segmentation of images of crowns of Siberian pine Pinus sibirica trees affected by bark beetle is addressed. High-resolution images were obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs). To solve this task, three neural network models were developed, trained, and analyzed. The analysis demonstrated that all three models, unlike the classical U-Net model, successfully recognize Pinus sibirica trees across all condition classes in the images. The best image segmentation quality was achieved by the developed modification of the Segformer model.

Keywords: small spruce bark beetle, Siberian pine Pinus sibirica, semantic segmentation, semantic segmentation, neural networks, unmanned aerial vehicle

УДК 519.688

А. В. Мингалев
АО «НПО ГИПО», Казань, Россия
gipo@shvabe.com

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИСТОГРАММЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В МЕТОДЕ И ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ СКАНЕРНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация. Приведены результаты разработки алгоритма преобразования гистограммы, наиболее эффективного по скорости обработки и качеству автоматизированного дешифрирования, с применением алгоритмов семантической сегментации на основе сверточных нейронных сетей, для применения алгоритма на этапе предварительной обработки в составе метода и программного комплекса автоматизированного дешифрирования сканерных тепловизионных изображений. При разработке алгоритма применен метод на основе оценки гистограммы уровней сигнала изображений, учитывающий специфику формирования и особенности методов последующего анализа тепловизионных изображений подстилающей поверхности. Результаты численных экспериментов подтверждают эффективность разработанного алгоритма, что говорит о целесообразности его применения на этапе предварительной обработки в составе метода и программного комплекса автоматизированного дешифрирования сканерных тепловизионных изображений в режиме реального времени непосредственно при проведении съемочных работ в процессе авиационного мониторинга.

Ключевые слова: дешифрирование, статистическое моделирование, нейросетевые модели, алгоритмы обработки изображений, машинное обучение, сканерные тепловизионные съемочные системы

Введение. Мониторинг экологической безопасности и своевременное реагирование на чрезвычайные ситуации (далее – ЧС) является одним из приоритетных направлений деятельности государства. Техническую основу авиационного мониторинга составляют воздушно-космические средства соответствующих министерств и ведомств. Важную роль при выполнении авиационного мониторинга играют тепловизионные приборы (системы) строчного типа с линейным сканированием (далее – сканерные ТВП-системы). Сканерные ТВП-системы [1] позволяют выполнять круглосуточную съемку теплового излучения земной поверхности и обеспечивают обнаружение паводкоопасных и пожароопасных участков местности, диагностику состояния трубопроводов, тепловых сетей, поиск людей, кораблей, самолетов при ЧС и стихийных бедствиях. Ключевая особенность сканерных ТВП-систем – высокая производительность съемки, обеспечиваемая принципом формирования изображения, ведет к необходимости дешифрирования большого объема графической информации.

© Мингалев А. В., 2025

В данной работе представлен алгоритм преобразования гистограммы сканерных тепловизионных изображений (СТВИ), наиболее эффективный по скорости обработки и качеству выполнения автоматизированного дешифрирования изображений [2], обработанных предложенным алгоритмом.

Требования к результату обработки. Гистограмма исходных СТВИ должна быть преобразована из 16-битного в 8-битный формат, при этом вычисления должны выполняться за минимально возможное время, также необходимо обеспечить максимальную точность на этапе обнаружения.

Описание алгоритма. Предлагаемый алгоритм линейного растяжения гистограммы с адаптивным расширением границ состоит из нескольких шагов, включая:

1. Построение гистограммы 16-битного СТВИ:

$$h(s_{16k}) = n_k, \tag{1}$$

где s_{16k} – *k-й* уровень интенсивности 16-битного СТВИ; n_k – число пикселей 16-битного СТВИ со значением интенсивности, равным s_{16k}.

2. Определение граничных уровней интенсивности (границ) с левой U_{mid_min} и правой U_{mid_max} сторон гистограммы 16-битного СТВИ с адаптивным к ширине гистограммы расширением границ:

$$s_{left\Sigma} = \sum_{i=0}^{k_i} n_i, \text{ пока } \frac{s_{left\Sigma}}{w \cdot h} \cdot 100\ \% < 1\ \%,\ l = k_l, \tag{2}$$

где $s_{left\sum}$ – сумма значений столбцов гистограммы n_i, начиная со значения уровня интенсивности $i = 0$ до значения $i = k_l$; w, h – ширина и высота соответственно СТВИ в пикселах; l – значение интенсивности – граница гистограммы с левой стороны,

$$s_{right\Sigma} = \sum_{i=k_r}^{65\,535} n_i, \text{ пока } \frac{s_{right\Sigma}}{w \cdot h} \cdot 100\ \% < 1\ \%,\ r = k_r, \tag{3}$$

где $s_{right\sum}$ – сумма значений столбцов гистограммы n_i с правой стороны гистограммы, начиная со значения уровня интенсивности i = 65 535 с уменьшением до значения $i = k_r$, w, h – ширина и высота соответственно СТВИ в пикселах, r – значение интенсивности – граница гистограммы с правой стороны.

При этом:

$$U_{mid_\min} = l - \Delta,\ U_{mid_\min} = l + \Delta, \tag{4}$$

где Δ – значение смещения, определяемое как:

$$\Delta = \frac{r - l}{ak}, \tag{5}$$

при этом ak – адаптивный коэффициент:

$$ak = \frac{100}{pr},\ pr \in [0,...,100]. \quad (6)$$

3. Вычисление значений интенсивности каждого *i*-го пикселя *j*-й строки результирующего 8-битного СТВИ:

$$U_{256ij} = \frac{D_{256}}{U_{mid_\max} - U_{mid_\min}} \cdot (U_{midij} - U_{mid_\min}), \quad (7)$$

где D_{256} = 256 [ед.] – количество отсчетов гистограммы 8-битного изображения; U_{midij} – значение интенсивности *i*-го пикселя *j*-й строки 16-битного СТВИ.

Тестирование алгоритма. В табл. 1 приведены результаты оценки скорости и степени влияния применения различных алгоритмов преобразования гистограммы на точность обнаружения объектов (семантической сегментации) с использованием сверточной нейронной сети (СНС).

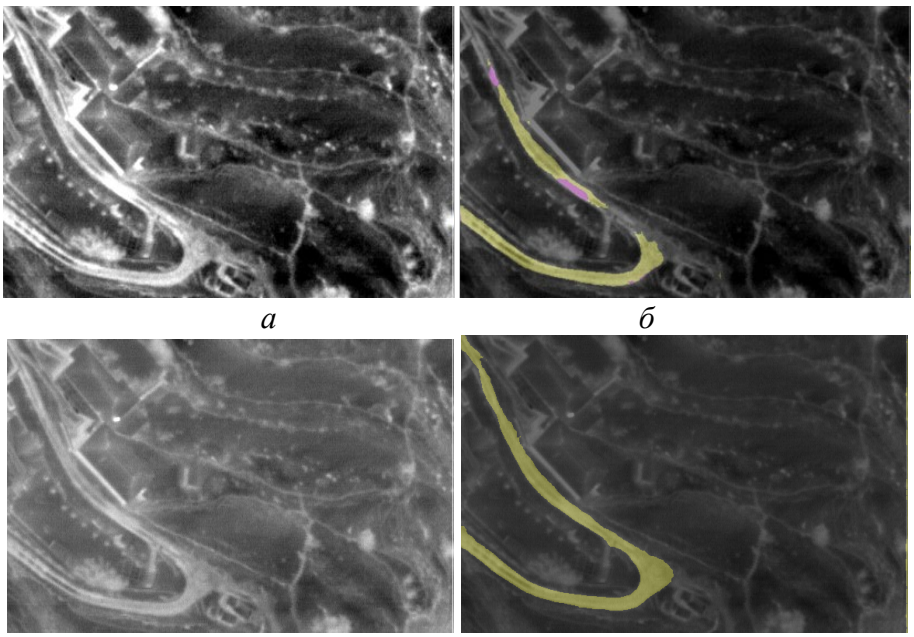
Таблица 1

Результаты оценки скорости и степени влияния алгоритмов преобразования гистограммы на точность обнаружения объектов

Название алгоритма	**Точность семантической сегментации, отн. ед.**	**Время обработки, с 576 × 576 / 16 000 × 576 пикс.**
Линейное растяжение гистограммы [3]	0,77	0,001 / 0,027
Линейное растяжение гистограммы с адаптивным расширением границ	0,82	0,001 / 0,027
DDE [4]	0,82	0,028 / 0,77
DDE+CLAHE [5]	0,81	0,036 / 1,00

Из результатов в табл. 1 следует, что увеличение вычислительной сложности алгоритмов существенно не влияет на точность обнаружения объектов алгоритмами на основе СНС. На рис. 1 приведены примеры исходных СТВИ и результата выполнения семантической сегментации.

На СТВИ, обработанном алгоритмом линейного растяжения гистограммы (рис. 1, *а*), присутствуют переконтрастированные участки изображения с потерей детальности изображения, при этом обнаружение протяженного объекта с применением семантической сегментации выполнено некорректно (рис. 1, *б*). На СТВИ, обработанном алгоритмом линейного растяжения гистограммы с адаптивным расширением границ (рис. 1, *в*), отсутствуют переконтрастированные участки, и обнаружение протяженного объекта с применением семантической сегментации выполнено более корректно (рис. 1, *г*).



а *б*

в *г*

Рис. 1. Примеры исходных СТВИ и результата семантической сегментации, обработанных: *а, б* – алгоритмом линейного растяжения гистограммы; *в, г* – алгоритмом линейного растяжения гистограммы с адаптивным расширением границ

Результаты оценки влияния изменения значений границ гистограммы с ручным подбором значения расширения границ Δ на качество обнаружения объектов приведены в табл. 2, результаты оценки влияния изменения границ гистограммы адаптивным способом с применением коэффициента расширения границ гистограммы *ak* на качество обнаружения объектов приведены в табл. 3.

При регистрации теплового излучения в зависимости от уровня теплового контраста ширина гистограммы (динамический диапазон) СТВИ может существенно изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен единиц. В случае изменения динамического диапазона сигнала при ручном подборе значение Δ также необходимо изменять вручную, адаптивное растяжение границ позволяет автоматически подстраивать наиболее оптимальное с точки зрения точности обнаружения значение Δ.

Таблица 2

Результаты оценки влияния изменения значений границ гистограммы с ручным подбором на качество обнаружения объектов с применением СНС

Δ, абс. ед.	**Средняя точность сегментации, P, отн. ед.**	
	Ширина гистограммы 128 ед.	**Ширина гистограммы 256 ед.**
0	0,73	0,68
25	0,87	0,79
50	0,85	0,82
100	0,77	0,85

Таблица 3

Результаты оценки влияния изменения границ гистограммы адаптивным способом с применением коэффициента расширения границ гистограммы на качество обнаружения объектов с применением СНС

Δ, абс. ед.		***pr*, %**	***ak*, отн. ед.**	**Средняя точность сегментации, P, отн. ед.**	
Ширина гистограммы 128 ед.	**Ширина гистограммы 256 ед**			**Ширина гистограммы 128 ед.**	**Ширина гистограммы 256 ед.**
32	64	25	4	0,84	0,84
42	84	33	3	0,85	0,84
64	128	50	2	0,86	0,86
128	256	100	1	0,79	0.78

По результатам выполненного исследования можно сделать вывод о том, что целесообразность применения линейного растяжения гистограммы с адаптивным расширением границ для применения разработанного алгоритма на этапе предварительной обработки в составе метода и программного комплекса автоматизированного дешифрирования СТВИ в режиме реального времени непосредственно при проведении съемочных работ в процессе авиационного мониторинга подтверждается.

Список источников

1. Патент № 2815392 Российская Федерация, Патент на изобретение «Устройство для дистанционного зондирования Земли в инфракрасной области спектра», авторы: Агафонова Р. Р., Балоев В. А., Батавин М. Н., Белов А. В., Габдуллин И. М., Иванов В. П., Куликов Д. В., Марданова Д. А., Мингалев А. В., Николаев А. В., Савин Д. Е., Шушарин С. Н., RU 2815392.

2. Мингалев А. В. Метод и алгоритмы обработки сканерных тепловизионных изображений на основе сверточных нейронных сетей для автоматического обнаружения заданных типов объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 1.

3. Гонсалес Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М. : Техносфера, 2012. 1104 с.

4. Kaiming He Jian Sun. Fast Guided Filter. arXiv:1505.00996v1 [cs.CV] 5 May 2015.

5. Ali M. Reza Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement / Ali M. Reza // Journal of VLSI Signal Processing. 2004. N 38. P. 35–44.

A. V. Mingalev
JSC “NPO GIPO”, Kazan, Russia
gipo@shvabe.ru

DEVELOPING AND TESTING A HISTOGRAM TRANSLATION ALGORITHM FOR IMPLEMENTATION IN THE METHOD AND THE SOFTWARE PACKAGE FOR AUTOMATED DECODING OF SCANNER THERMAL IMAGES

Abstract. This paper reviews the development results of a histogram translation algorithmm that is the most effective in terms of processing speed and automated decoding quality. It uses semantic segmentation algorithms based on convolutional neural networks and is to be applied at the pre-processing stage as part of the method and the software package for automated decoding of scanner thermal images. When developing this algorithm, a method based on evaluating the histogram of image signal levels was applied, taking into the account the specifics of formation and the features of subsequent analysis methods of the thermal images of the underlying surface. The results of numerical experiments confirm the effectiveness of the developed algorithm, which suggests the expediency of its application at the pre-processing stage as part of the method and the software package for automated decoding of scanner thermal images in real time during survey work in the process of aerial monitoring.

Keywords: decoding, statistical modeling, neural network models, image processing algorithms, machine learning, scanner thermal imaging systems

УДК 004.932

В. Ф. Мочалов[1], О. В. Григорьева[2]
[1, 2]Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург
vka@mil.ru

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ УТОЧНЕННЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

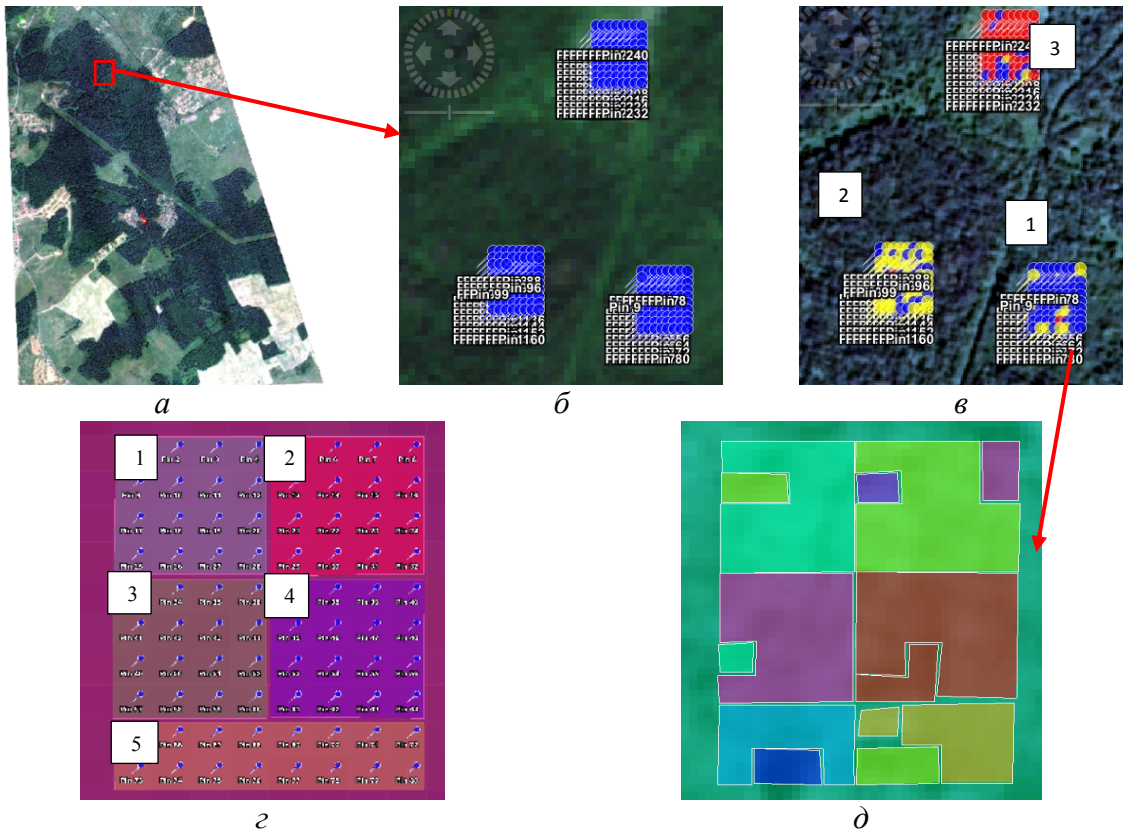
Аннотация. Представлена последовательность этапов работ, направленных на формирование уточненных значений исходных данных при идентификации элементов ландшафта на основе автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съемки. Предложена методика обоснованного формирования уточненных значений исходных данных. Уточнение состава исходных данных осуществляется благодаря применению к предварительным исходным данным математического аппарата нечёткой кластеризации. Показано влияние уточненных значений исходных данных на результаты идентификации элементов ландшафта и показатели качества результатов обработки материалов съемки. В качестве источника исходных данных приняты материалы отечественной мультиспектральной космической съемки. Приведены примеры автоматизированной идентификации элементов ландшафта и расчета улучшенных числовых значений показателей качества результатов обработки.

Ключевые слова: алгоритмы машинного обучения, свёрточная нейронная сеть, математический аппарат нечеткой кластеризации, обучающие и контрольные выборки, показатели качества результатов обработки

Одной из наиболее важных задач, решаемых на основе автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съемки, является семантическая сегментация или идентификация элементов ландшафта. При этом в пределах рассматриваемой сцены идентифицируются все элементы ландшафта с учетом их семантического описания. Глубина семантического описания отражает содержание тематической задачи обработки. В частности, регулярно возникает потребность в разработке цифровых топографических карт, отображающих свойства местности целевого характера. При решении подобных задач часто применяются алгоритмы машинного обучения и нейросетевые алгоритмы. От состава исходных данных для этих алгоритмов зависят перспективы применения указанных алгоритмов, а значит и качество решения задачи обработки. Традиционно в состав исходных данных входят обучающие и контрольные выборки. Вместе с тем процесс формирования достоверных исходных данных является сложной научно-практической задачей, требующей больших временных затрат и привлечения высококвалифицированных специалистов. Как правило, исходные данные формируются путем интерактивной обработки материалов

© Мочалов В. Ф., Григорьева О. В., 2025

съемки, анализа дополнительных архивных материалов и проведения наземных обследований. Авторами предлагается оригинальное применение математического аппарата нечеткой кластеризации для преобразования предварительного состава исходных данных [1]. При этом осуществляется уточнение состава исходных данных путем частичного перераспределения обучающих и контрольных выборок для идентифицируемых элементов ландшафта с учетом их спектрально-энергетических характеристик. Целью настоящей работы является систематизация процесса формирования предварительного и уточненного состава исходных данных, оценивание вклада от уточнения состава исходных данных. На рис. 1 приведены итоги реализации основных этапов методики формирования уточненных значений исходных данных.

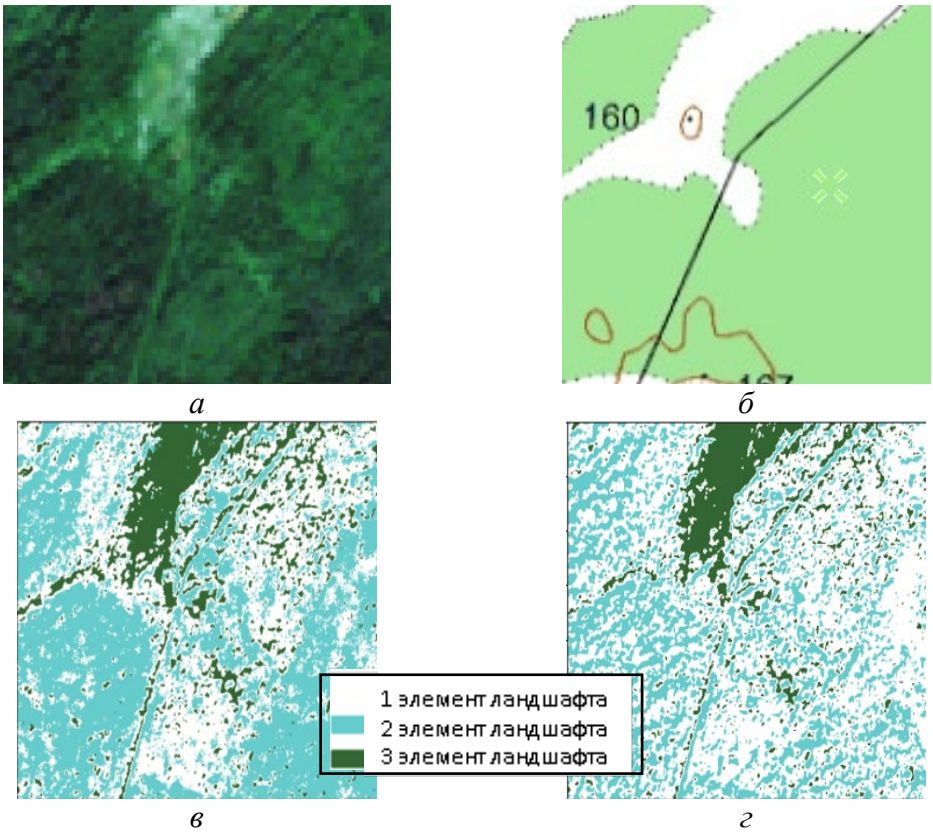


а *б* *в* *г* *д*

Рис. 1. Иллюстрации, отражающие итоги выполнения отдельных этапов методики формирования уточненных значений исходных данных: *а* – фрагмент условного кадра материалов съемки, выполненной с помощью КА «Канопус-В»; *б* – сцена, в пределах которой сформированы предварительные выборки исходных данных для трех элементов ландшафта с известными характеристиками; *в* – результаты перераспределения исходных данных между тремя выборками на основе применения математического аппарата нечеткой кластеризации; *г* – пространственное распределение исходных данных, состоящих из обучающих выборок, обозначенных цифрами 1–3 и контрольных выборок, обозначенных цифрами 4 и 5; *д* – пространственное распределение уточненных исходных данных

Данные, приведенные на рис. 1, сформированы с помощью программного комплекса автоматизированной обработки материалов съемки *SNAP*, разработанного Европейским космическим агентством. Кластеризация осуществлена с помощью программного модуля, реализованного на языке *Python*.

На рис. 2 приведен пример результатов автоматизированной идентификации элементов ландшафта на основе предварительных и уточненных значений исходных данных.



а *б*

в *г*

Рис. 2. Результаты идентификации элементов ландшафта, приведенных на рис. 1, *в*: *а* – сцена; *б* – фрагмент известной цифровой карты; *в* – результаты идентификации элементов ландшафта на основе предварительных значений исходных данных; *г* – результаты идентификации элементов ландшафта на основе уточненных значений исходных данных

Результаты, приведенные на рис. 2, получены с помощью сверточной нейронной сети, реализованной на кросс-платформенной интегрированной среде разработки для языка программирования *Python*.

Предварительный анализ данных, приведенных на рис. 2, *в, г*, позволяет сделать вывод, что на основе уточненных исходных данных получены более детальные контуры и увеличена площадь первого элемента ландшафта, который можно условно характеризовать «редколесьем». Заметно уменьшена площадь третьего элемента ландшафта или «полевой растительности».

Оценивание точности идентификации рассматриваемых элементов ландшафта осуществлялось на основе последовательного расчета индексов

IoU (*Intersection over Union*) (1) и обобщенного усредненного показателя *mIoU* (*mean Intersection over Union*) (2) [2]:

$$I_0U_i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i + FN_i}, \quad (1)$$

$$mIoU = \frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C} IoU_i, \quad (2)$$

где TP_i – пиксели, элемента ландшафта i, корректно идентифицированные как i; FP_i – пиксели других элементов ландшафта, ошибочно идентифицированные как i; FN_i - пиксели класса i, ошибочно идентифицированные как другие классы; C – количество идентифицируемых элементов ландшафта.

В приведенном примере по итогам реализации предлагаемой методики значение показателя качества результатов идентификации *mIoU* увеличилось с 0,56 до 0,62, или практически на 11 %.

Применение предложенной методики формирования уточненных исходных данных и полученные результаты идентификации элементов ландшафта имеют важное практическое значение при оперативном и достоверном отображении свойств местности целевого характера.

Список источников

1. Mochalov V., Grigorieva O., Zhukov D., Markov A., Saidov A. Remote Sensing Image Processing Based on Modified Fuzzy Algorithm Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1225 AISC. C. 563–572 Conference Paper.

2. Maxwell A. E., Warner T. A., Guillén L. A. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies–Part 2: Recommendations and Best Practices. Remote Sens. 2021, 13, 2591. URL: https://doi.org/10.3390/rs13132591.

V. F. Mochalov[1], O. V. Grigorieva[2]
[1, 2]Mozhaisky Military Space Academy
vka@mil.ru

METHOD FOR GENERATING REFINED INPUT DATA FOR ML ALGORITHMS IN MULTISPECTRAL SPACE IMAGERY PROCESSING

Abstract. The sequence of work steps aimed at the formation of refined values of the initial data in the identification of landscape elements based on automated processing of multispectral satellite imagery is presented. A methodology for the reasonable formation of refined values of the initial data is proposed. The refinement of the composition of the source data is carried out by applying the mathematical apparatus of fuzzy clustering to the preliminary source data. The influence of the updated values of the initial data on the results of identification of landscape elements and quality indicators of the results of processing survey materials is shown.

Keywords: ML algorithms, neural networks, fuzzy algorithm, training and control data, quality indicators of processing results

УДК 528.854

И. В. Овсянников[1], С. А. Рылов[2]
[1, 2] Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия
[1] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
[1]i.ovsyannikov2@g.nsu.ru, [2]RylovS@mail.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ ОСАДКОВ ПО ДАННЫМ С КАМЕР НАРУЖНОГО НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Предлагается система, использующая видеопотоки с камер наружного наблюдения, для автоматического определения погодных условий. Представлена методика формирования обучающей выборки, включающая синхронизацию кадров с метеоданными через *API OpenWeatherMap* и процедуру полуавтоматической разметки. Для классификации получаемых изображений применена архитектура глубокого обучения, обеспечивающая высокую точность при работе с данными низкого качества. Реализован веб-интерфейс, отображающий результаты обработки данных с камер на интерактивной карте. Разработанная система может быть использована как для определения текущей погоды в реальном времени, так и для краткосрочного прогнозирования погоды.

Ключевые слова: осадки, распознавание, классификация изображений, камеры наблюдения, глубокое обучение, компьютерное зрение, прогноз погоды

Введение. Необходимость создания автоматизированных систем мониторинга атмосферных осадков с использованием видеопотоков наружных камер наблюдения обусловлена повышенными требованиями к точности метеорологических прогнозов и потребностью в снижении экономических рисков в транспортной и аграрной сферах. Традиционные методы регистрации осадков, основанные на работе метеостанций, обеспечивают высокую точность, однако их пространственное покрытие сильно ограничено, а эксплуатация связана со значительными затратами [1].

Существенный прогресс в области компьютерного зрения открывает возможности для анализа видеоданных с уличных камер в реальном времени [2]. Современные исследования в этой области демонстрируют, что подходы к классификации погодных условий можно условно поделить на два направления: классические алгоритмы, использующие низкоуровневые визуальные признаки [3], и методы, основанные на применении нейронных сетей [4–5].

Целью данной работы является разработка системы автоматического определения атмосферных осадков на основе анализа видеопотоков с камер наружного наблюдения в режиме реального времени, включая необходимые методы классификации изображений и веб-интерфейс для визуализации.

© Овсянников И. В., Рылов С. А., 2025

Методы и материалы. Ключевым этапом разработки системы стало формирование обучающего датасета, обеспечивающего репрезентативность и высокую достоверность поставленных меток классов. Для этого был реализован механизм полуавтоматической разметки, сочетающий использование предобученной модели классификации и внешних метеорологических данных. В качестве целевых классов на данный момент рассматривались три категории: дождь, снег и отсутствие осадков.

Из видеопотоков наружных камер, получаемых через протокол *HLS*, кадры извлекались с фиксированной периодичностью и синхронизировались по времени с прогнозами и наблюдениями сервиса *OpenWeatherMap*. На начальном этапе небольшая часть изображений подвергалась ручной разметке, которая использовалась для обучения базового классификатора. Далее при поступлении новых кадров происходила процедура двойной верификации: предсказание базовой модели сопоставлялось с данными метеорологического сервиса, привязанными к координатам конкретной камеры и моменту съемки. В тех случаях, когда результат классификации совпадал с прогнозом *OpenWeatherMap*, изображение автоматически включалось в обучающую выборку. При обнаружении расхождений кадры направлялись на ручную проверку и уточнение метки.

Такая схема позволила существенно сократить объем ручной работы и одновременно повысить надежность датасета, а также обеспечить сбалансированное распределение по всем классам. В результате был сформирован корпус данных объемом в 200 тыс. изображений, пригодный для обучения современных архитектур глубокого обучения.

Для классификации изображений была выбрана свёрточная нейронная сеть *EfficientNet*, демонстрирующая *state-of-the-art* результаты при оптимальном соотношении вычислительных затрат и точности [6]. Важным аспектом реализации стало применение специальных техник аугментации данных, учитывающих характерные искажения в видеопотоках уличных камер, а также использование взвешенной функции потерь для компенсации дисбаланса классов в обучающей выборке. Точность классификации составила 0,88 по F1-метрике.

Важным элементом разработанной системы [7] является веб-интерфейс [8], обеспечивающий доступ к результатам классификации в режиме реального времени. Интерфейс представляет собой интерактивную карту, на которой отмечены географические координаты всех подключенных камер. Каждая метка на карте связана с конкретным источником видеопотока и при обращении предоставляет пользователю набор информации, включая идентификатор камеры, актуальный кадр с временной отметкой, результаты работы классификационной модели с указанием типа осадков и уровня уверенности предсказания, а также данные из внешнего метеорологического сервиса для сопоставления. Система функционирует в автоматическом режиме и поддерживает обновление информации в реальном времени, что делает ее удобным инструментом для наблюдения за локальными погодными изменениями.

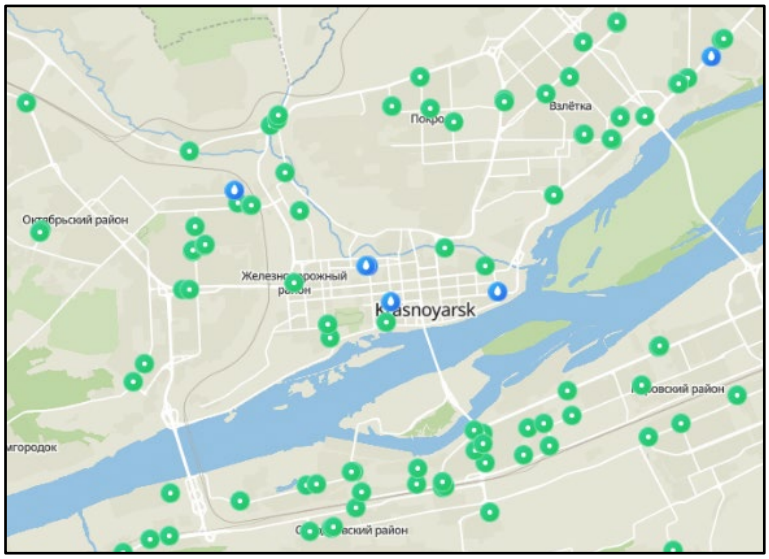


Рис. 1. Интерактивная карта доступных видеокамер в г. Красноярске

Заключение. Проведенное исследование показало, что данные с камер наружного наблюдения могут эффективно использоваться для мониторинга осадков. Разработана методика формирования датасета с использованием предварительной разметки и сверки с данными сервиса *OpenWeatherMap*, которая позволила существенно сократить ручные затраты на формирование датасета. Используемая нейросетевая классификация обеспечила достаточно высокую точность при работе с изображениями низкого качества. Созданный веб-интерфейс обеспечивает удобный доступ к получаемым результатам в режиме реального времени. В дальнейшем планируется увеличение числа распознаваемых по изображениям типов погоды, использование соседних кадров видеопотока для повышения точности классификации и интеграция с системами краткосрочного прогнозирования погоды.

Расчеты были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Центр научных ИТ-сервисов ФИЦ ИВТ».

Список источников

1. Fiallos-Salguero M. et al. Computer Vision-Based Method for Rainfall Estimation Using CCTV Cameras and Smartphone Videos // 15th International Conference on Hydroinformatics. 2024. P. 284.

2. Wang X. et al. Surveillance camera-based deep learning framework for high-resolution ground hydrometeor phase observation // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2025. Vol. 2025. P. 1–38.

3. Manuel F. S. et al. Toward accurate and scalable rainfall estimation using surveillance camera data and a hybrid deep-learning framework // Environmental Science and Ecotechnology. 2025. P. 100562.

4. Byun J. et al. Snowfall intensity estimation based on convolutional neural networks using CCTV data // Journal of Korea Water Resources Association. 2025. Vol. 58. No. 4. P. 313–327.

5. Rajabi F., Faraji N., Hashemi M. An efficient video-based rainfall intensity estimation employing different recurrent neural network models // Earth Science Informatics. 2024. Vol. 17. No. 3. P. 2367–2380.

6. Mutasodirin M. A., Falakh F. M. Efficient Weather Classification Using DenseNet and Ef-ficientNet // Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT. 2024. Vol. 9. No. 2. P. 173–179.

7. Овсянников И. В., Рылов С. А. Использование камер наружного наблюдения для мониторинга осадков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2025. Т. 4. С. 40–45.

8. Официальный сайт системы мониторинга атмосферных осадков CCTVForecast. URL: https://cctvforecast.ru/ (дата обращения: 10.09.2025).

I. V. Ovsyannikov[1], S. A. Rylov[2]
[1,2] Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia
[1] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
[1]i.ovsyannikov2@g.nsu.ru, [2]RylovS@mail.ru

RAINFALL RECOGNITION FROM CCTV CAMERA DATA USING DEEP LEARNING

Abstract. This paper presents a system that utilizes video streams from outdoor surveillance cameras to automatically determine weather conditions. A dataset construction methodology has been developed, which includes synchronization of video frames with meteorological data via the OpenWeatherMap API and a semi-automatic annotation procedure. Deep learning architecture is used to classify the resulting images, providing high accuracy when working with low-quality data. The system also includes a web interface that displays the results of camera data processing on an interactive map. The developed system can be used both to determine the current weather in real time and for short-term weather forecasting.

Keywords: precipitation, rain detection, pattern recognition, image classification, surveillance cameras, deep learning, computer vision, weather forecasting

УДК 551.435.32

Е. Д. Питерниекс[1], А. Р. Данченков[2], Н. С. Белов[3]
[1, 2] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[1, 2, 3] Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
[1]katerina.piterniex@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛЯЖЕЙ

Аннотация. Развитие морского берега происходит в процессе взаимодействия и синхронизации гидродинамических, аэродинамических процессов в условиях постоянной морфологической адаптации рельефа. Проходящие процессы существуют в узких рамках своих лимитирующих факторов, обуславливая необходимость высокочастотных наблюдений за морфологическими характеристиками песчаных пляжей для агрегации в более крупные масштабы времени. Целью работы являлось создание автономной системы регистрации характеристик песчаного пляжа для оценки его динамики. Разработана процедура, включающая использование конволюционной нейросети семантической сегментации изображений камеры наружного наблюдения для определения уреза моря в условиях высокой изменчивости текстур природных объектов, координатной привязки и определения ширины пляжей. В целях определения границы суши и моря для сегментации изображений использовалась конволюционная нейросеть с архитектурой *Unet*. Для определения толщины песка выполнялось наблюдение за фиксированным репером. Верификация результатов выполнялась с использованием наземного лазерного сканирования. Проведено наблюдение за циклом аккумуляции песка в ходе нескольких последовательных умеренных штормов и сформированы модели реакции песчаных пляжей на интенсивные гидрометеорологические события на основе данных высокой дискретности.

Ключевые слова: конволюционная нейросеть, семантическая сегментация, морской пляж, морфодинамика, Куршская коса, Балтийское море

Введение. Пляжи Куршской косы Калининградской области за счет штормовой эрозии претерпевают снижение запасов песков, что приводит к постепенной деградации дюнного вала и увеличению риска его размыва [1]. Наблюдаемый импульсный характер многих значимых процессов, протекающих на морском берегу, в том числе ветропесчаного потока и штормового размыва, требует проведения высокочастотных наблюдений за морфологическими характеристиками песчаных пляжей для приведения их к более крупным масштабам времени.

Актуальной проблемой при проведении непрерывного мониторинга пляжей при помощи камер наружного наблюдения является определение положения береговой линии – моментальной границы «вода-суша» – для ее последующей векторизации и использования в расчетах и анализе.

Целью данной работы является исследование возможности создания автономной системы регистрации характеристик песчаного пляжа.

© Питерниекс Е. Д., Данченков А. Р., Белов Н. С., 2025

Для этого были решены *задачи* создания процедуры, включающей использование специфичной модели семантической сегментации изображений камеры наружного наблюдения для определения уреза моря в условиях высокой изменчивости текстур природных объектов, координатной привязки и определения ширины пляжей.

Район исследования. Камера наружного видеонаблюдения была установлена на здании, расположенном на гребне дюнного вала на 42-м километре Куршской косы (рис. 1, *а*). Крыша здания способствовала защите камеры от воздействия преобладающих ветров и атмосферный осадков. Высота установки камеры составила 12 м над поверхностью пляжа, что обеспечило хороший обзор и небольшой угол наклона (рис. 1, *б*).

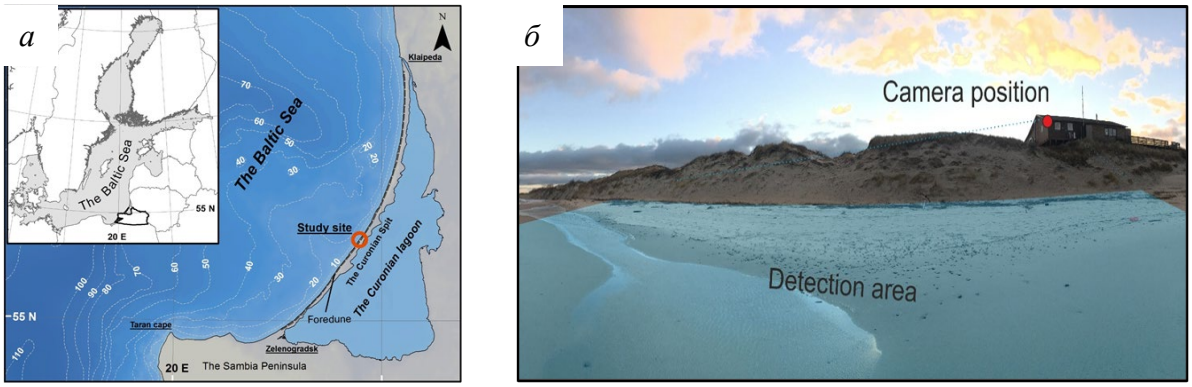
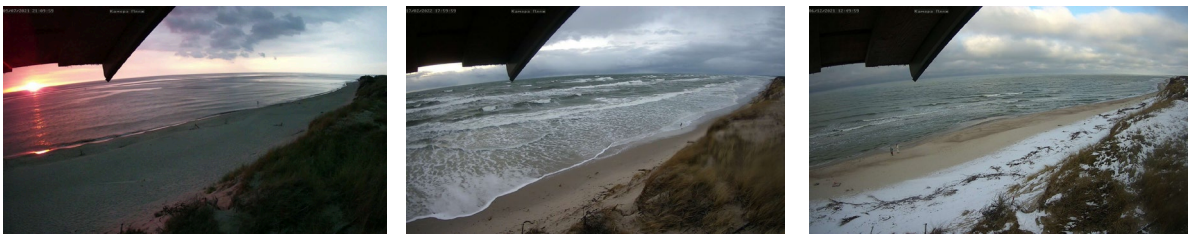


Рис. 1. Район исследования (*а*), место расположения камеры на гребне дюнного вала и связанная область определения ширины пляжа (*б*)

Методы и материалы, основные результаты их реализации. Использовалась стационарная камера наблюдения с 4G-модемом для стабильного интернет-соединения с ftp-сервером. В целях определения границы суши и моря для сегментации изображений камеры использовалась конволюционная нейросеть с архитектурой *Unet* [9]. Для создания модели использовалась методика трансферного обучения, при котором начальные веса сети переносятся из энкодера ранее обученной на неразмеченных примерах модели (модели автоэнкодера). Для обучения итоговой модели использовался оптимизатор *Adam*, в качестве функции потерь – *Focal-Jaccard loss* [10], а в качестве валидационной метрики – *IOU* [11]. Обучение выполнялось в течение 300 эпох; итоговый *IOU* составил 0,86. Были использованы массивы данных: 1) автоэнкодер 256 × 256 – 418 тыс. шт., захватывающих максимальную вариативность текстур (различные гидрометеорологические условия, освещенность, количество людей на пляже, наличие морского мусора, выбросов гальки, снежного покрова (рис. 2); 2) модель сегментации с массивом в количестве 1 266 шт. и соответствующих им разметок. Выборочные изображения захватывали: затопление пляжа, волнение моря, освещенность, наличие морской пены, области осушки, бары и т. д.) (рис. 2). Массив был разделен на обучающую (80 %) и валидационную (20 %) выборки.



а *б* *в*

Рис. 2. Изменчивость текстур природных объектов:
а – широкий пляж; *б* – штормовое волнение; *в* – послештормовое восстановление

В целях координатной привязки была заложена сеть наземных опорных точек с использованием *RTK GNSS* измерений (всего 101 временная точка). Модель *TPS* позволила определить параметры перехода от координатной системы оригинального изображения к метрической координатной системе. Определенная в процессе сегментации векторизованная линия границы суши и моря (уреза) подвергалась аппроксимации посредством алгоритма *RANSAC*, что позволило отфильтровать наиболее значимые шумы (рис. 3, *а*). На следующем этапе производился расчет ширины пляжа как минимальной дистанции между базовой линией (основанием дюнного вала) и урезом для элементарного сегмента 0,5 м. Затем производилось вдольбереговое осреднение, и среднее значение принималось как моментальная ширина пляжа.

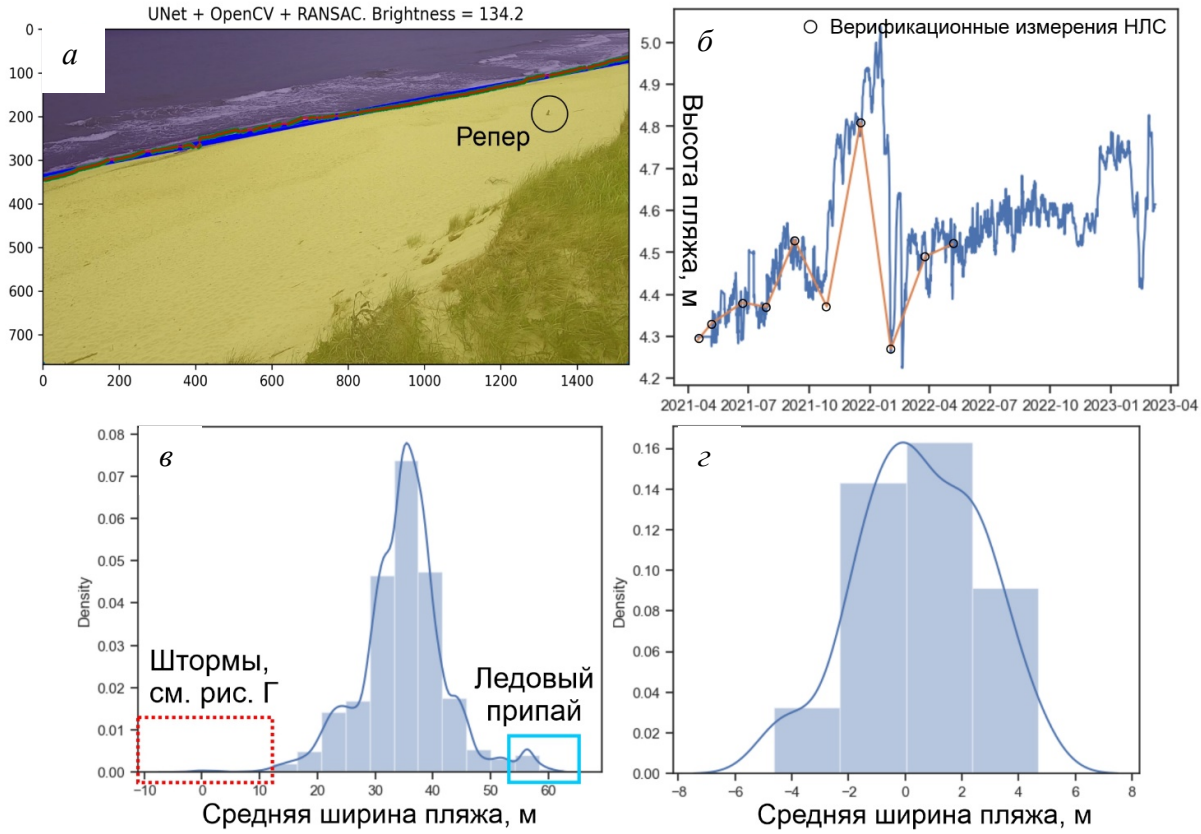


Рис. 3. Работа метода извлечения характеристик (*а*); временной ряд высот пляжа с верификационными измерениями (*б*); распределение ширин пляжа (*в*); распределение штормовых ширин пляжа (*г*)

Фиксированный репер (погруженный на 1,5 м в песок столб) (рис. 3, *а*) наблюдался на границе столб/песок и вершине столба, затем находилась длина видимой части репера в пикселах. Соотнесение ряда подобных промеров с длиной, которая была как измерена рулеткой, так и определена *RTK GNSS*, показало, что разрешение в области репера составляет 0,05 м/пиксель.

Верификация промеров отметок с использованием НЛС (рис. 3, *б*) показала, что СКО таких промеров составляет 0,036 м высоты. Отрицательные значения ширины пляжа (рис. 3*, в, г*) демонстрируют, что урез воды превышал положение основания дюнного вала и происходила эрозия. Такие события на графике хода высоты пляжа выглядят как резкие смены направления, когда происходит подпитка пляжа эродированным материалом дюнного вала, а затем его волновая переработка.

Выводы. Процедура трансферного обучения в условиях береговой зоны позволяет добиться значительных показателей ($IOU = 0{,}86$), благодаря чему при использовании фильтрации алгоритма *RANSAC* и проецировании кадра на метрическую плоскость возможно получать моментальное положение береговой линии.

Точность определения береговой линии варьировалась от 0,1 до 0,5 м/пиксель и зависит от действительного разрешения проецированного на плоскость кадра, который, в свою очередь, зависит от расстояния до камеры и ее параметров. Практическая точность такого определения не менее чем в 2 раза превышает разрешение (0,2–1,3 м).

Для определения толщины песка выполнялось наблюдение за фиксированным репером с ориентацией на длину его открытой части. При этом разрешение было фиксировано и составляло 0,05 см/пиксель. Верификация результатов выполнялась с использованием НЛС в период 2021–2023 гг., и по отметке репера погрешность не превышала 0,04 м.

Распределение ширины пляжа позволило установить распределения, характерные для штормового периода, а также для периода образования ледяного припая. Такие высокочастотные данные дают возможность приводить изменения, вызванные высокоэнергетическими событиями, к характерному времени морфологической реакции пляжей на них, а также исследовать режимные характеристики происходящих процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список источников

1. Aarninkhof S. G. J. et al. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry // Coastal Engineering. 2003. T. 49. N 4. P. 275–289.

2. Brahim K. et al. A deep learning approach for the segmentation of myocardial diseases // 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). IEEE, 2021. P. 4544–4551.

3. Danchenkov A. et al. Foredune defending role: Vulnerability and potential risk through combined satellite and hydrodynamics approach // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. Vol. 30. P. 100934.

4. Hoonhout B. M. et al. An automated method for semantic classification of regions in coastal images // Coastal Engineering. 2015. Vol. 105. P. 1–12.

5. Muhadi N. A. et al. Image segmentation methods for flood monitoring system // Water. 2020. Vol. 12. N 6. P. 1825.

6. Plant N. G. et al. The performance of shoreline detection models applied to video imagery // Journal of Coastal Research. 2007. Vol. 23. N 3. P. 658–670.

7. Rahman M. A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation // International symposium on visual computing. Springer, Cham, 2016. P. 234–244.

8. Ribas F. et al. Automatic shoreline detection from video images by combining information from different methods // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. N 22. P. 3717.

9. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18. Springer International Publishing, 2015. P. 234–241.

10. Valentini N., Balouin Y. Assessment of a smartphone-based camera system for coastal image segmentation and sargassum monitoring // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8. N 1. P. 23.

11. Zhan W. et al. Adaptive semantic segmentation for unmanned surface vehicle navigation // Electronics. 2020. Vol. 9. N 2. C. 213.

E. D. Piterniex[1], A. R. Danchenkov[2], N. S. Belov[3]
[1, 2] Institute of Oceanology, RAS, Kaliningrad, Russia
[1, 2, 3] Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
[1]katerina.piterniex@yandex.ru

COMPUTER VISION FOR BEACH MORPHOLOGY MONITORING

Abstract. Development of the seacoast occurs in the process of interaction and synchronization of hydrodynamic, aerodynamic processes under conditions of post-morphological adaptation of the relief. The processes occurring exist within the narrow limits of their limiting factors, necessitating high-frequency observations on the morphological characteristics of sandy beaches for aggregation at a larger time scale. The aim of the work was to create a novel system for recording characteristics of the sandy beach in order to evaluate its dynamics. Developed a procedure involving the use of a convoluted neural network of semantic segmentation of images from an outdoor observation camera to determine the extent of the sea in conditions of high variability of natural objects, coordinate binding and determine the width of beaches. In order to define the boundary between land and sea, a convoluted neural network with Unet architecture was used for image segmentation. To determine the thickness of the sand, a shot was taken behind a fixed repeater. Verification of results was performed using ground-based laser scanning. Observed the cycle of sand accumulation during several successive moderate storms, and developed models for the response of sandy beaches to intense hydrometeorological events based on high discretion data.

Keywords: commutative neural network, semantic segmentation, beach, morphodynamics, the Curonian Spit, the Baltic Sea

УДК 004.89

Е. С. Подольская
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
epodolskaya@hse.ru

ДАТАСЕТЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОГ

Аннотация. Датасеты машинного обучения создаются и используются в разных тематических областях. На примере публикаций ResearchGate представлена подборка датасетов по распознаванию дорог. Это ниша распознавания объектов инфраструктуры на текущий момент представлена открытыми и доступными для загрузки наборами данных съемки Китая, США, Индии, Великобритании и ряда других стран 2021–2025 гг. на основе лицензии *CC BY* 4.0, количество которых будет определенно увеличиваться в ближайшем будущем.

Ключевые слова: машинное обучение, глубокое обучение, распознавание дорог, датасет, архитектура нейросети

Датасеты машинного (глубокого) обучения являются новой потребностью и интересной областью исследований [1; 2], продуктами проектной деятельности сбора и обработки данных [3–5], которые можно распространять и применять в дальнейшем для разных тематических задач. Датасет является набором данных, у которого есть структура и категории данных, выполнена предварительная обработка данных.

В каждой тематической области можно найти свои рекомендации и подборки датасетов, одним из крупнейших хранилищ к настоящему моменту являются платформы с датасетами и моделями машинного обучения *Kaggle*, появившаяся в 2010 г. (*https://www.kaggle.com/datasets*), и *Hugging face*, ставшая доступной с 2016 г. (*https://huggingface.co*). Для работы с датасетами существуют и другие платформы, такие как *Roboflow*, *SaaS*-стартап (*software as a service*), существующий с 2019 г. (*https://public.roboflow.com*).

Распознавание дорог на снимках разного типа и уровня разрешения, ввиду разнообразия типов дорог и многообразия территорий, является весьма сложной задачей, решаемой при помощи использования нейросетей [6–8]. Распознанные изображения дорог являются источниками данных для обновления инфраструктурных проектов (сельское и лесное хозяйство, нефтегазовая отрасль), а также при чрезвычайных ситуациях. Распознавание дорог является старой темой исследований [9, 10], порядка 30 лет используются методы распознавания образов с помощью различных эвристик, в последние годы распространение получили модели машинного обучения.

© Подольская Е. С., 2025

Датасеты по дорогам не только включают сами линейные объекты дорожной инфраструктуры, но и содержат такие объекты точечной локализации, как дорожные знаки (*https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/road-sign-detection; https://www.twine.net/blog/road-sign-detection-datasets/; https://benchmark.ini.rub.de/index.html*), могут использоваться в распознавании дефектов покрытия дорог (https://roboflow.com/industries/transportation).

Сбор датасетов по распознаванию дорог был проведен по материалам социальной исследовательской сети *ResearchGate* (*https://www.researchgate.net/*): сделаны запросы на русском («датасеты машинного обучения для распознавания дорог») и английском (“machine learning datasets road recognition”) языках. Датасеты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Датасеты по распознаванию дорог

Оригинальное название и год публикации	**Количество изображений**	**География данных**	**Ссылка**
Oxford Road Boundaries (2021)	62 605	Великобритания (*Oxford*)	Датасет: *https://oxford-robotics-institute.github.io/road-boundaries-dataset/*; статья [11]
*RDD*2022 – *The multi-national Road Damage Dataset* (2022)	47 420	Япония, Индия, Чехия, Норвегия, США, Китай	Датасет: *https://figshare.com/articles/dataset/RDD2022_-_The_multi-national_Road_Damage_Dataset_released_through_CRDDC_2022/21431547/1*; статья [12]
Dataset of Unpaved and Paved Road Surface with Seasons (2022)	8 484	Индия	Датасет: *https://data.mendeley.com/datasets/tj2m7zz4rg/2*; статья [13]
Road Surface Reconstruction Dataset (2024)	16 000	Китай (*Beijing, Qingdao*)	Датасет: *https://github.com/ztsrxh/RSRD_dev_toolkit*; статья [14]
HighRPD: *A high-altitude drone dataset of road pavement distress* (2025)	11 696	Китай (*Shanxi*)	Датасет: *https://data.mendeley.com/datasets/sywswj7djj/1*; статья [15]

Сегментация дорог [16; 17] включает эвристические и зависящие от данных модели машинного обучения. Примерами датасетов являются *ChesapeakeRSC* [18] (нейросеть: *U-Net* или *ResNet*-18), *DeepGlobe* (*SPIN Road Mapper*) и *Massachusetts Roads Dataset* (*RSM-SS*). Фреймворк *PyTorch*

содержит набор возможных вариантов для изучения [19]. Оценки следующих датасетов по дорогам даны в обзорной работе [20]: *SpaceNet* (*https://spacenet.ai/spacenet-roads-dataset/*), *DeepGlobe* (*https://www.kaggle.com/datasets/balraj98/deepglobe-road-extraction-dataset*), *Microsoft dataset* (*https://github.com/microsoft/RoadDetections*).

Распознавание дорог по снимкам, полученным космическими аппаратами и дронами, продолжает оставаться актуальной темой исследований. Количество доступных датасетов имеет тенденцию увеличения с новыми возможностями съемки. Все изученные датасеты доступны по лицензии *CC BY* 4.0 (*http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0*) с обязательным указанием разработчика.

Участие в Конференции РП ДЗЗ – 2025 поддержано Фондом Потанина в рамках конкурса «Профессиональное развитие». Результаты работы являются частью выполнения Государственного задания ЦЭПЛ РАН по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

Список источников

1. Вильданов А. Н. Генерация датасетов для учебных задач компьютерного зрения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4. С. 1–10.

2. Ерохин С. Д., Борисенко Б. Б., Мартишин И. Д., Фадеев А. С. Анализ существующих методов снижения размерности входных данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 30–37.

3. Павлов М. П. Подготовка данных для машинного обучения распознавания объектов и их ключевых точек // StudArctic Forum. 2023. Т. 8. № 1. С. 9–14.

4. Парасич А. В., Парасич В. А., Парасич И. В. Формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения. Обзор // Информационно-управляющие системы. 2021. № 4. С. 61–70. DOI:10.31799/1684-8853-2021-4-61-70

5. Подмарькова В. А., Петряева А. А. Методика ручной разметки спутниковых снимков земной поверхности с космического аппарата Аист-2Д // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции в 3 ч. Санкт-Петербург, 2023. С. 250–258.

6. Игнатьев А. В., Куликов М. А., Цапиев Д. Н., Тырин В. В. Методика автоматической классификации дорог с использованием нейронной сети Mask R-CNN // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5. С. 1–9.

7. Корчагин В. Д. Анализ современных SOTA-архитектур искусственных нейронных сетей для решения задач классификации изображений и детекции объектов // Программные системы и вычислительные методы. 2023. № 4. С. 73–87. DOI: 10.7256/2454-0714.2023.4.69306

8. Маркеев М. В. Методика идентификации объектов по уникальным характеристикам на изображениях // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2022. № 11(104). С. 1–4.

9. Орлов В. А. Автоматизированное распознавание лесных дорог по космическим снимкам // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 38–40.

10. 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

11. Suleymanov T., Gadd M., De Martini D., Newman P. The Oxford Road Boundaries Dataset // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Workshop on 3D-Deep Learning for Automated Driving (3D-DLAD), Nagoya, Japan, July 2021. Pp. 1–6.

12. Arya D., Maeda H., Ghosh S. K., Toshniwal D., Sekimoto Y. RDD2022: A multi-national image dataset for automatic road damage detection // Geoscience Data Journal. 2014. No 11. Pp. 846–862. https://doi.org/10.1002/gdj3.260.

13. Bhutad S., Patil K. Dataset of road surface images with seasons for machine learning applications // Data in Brief. 2022. Vol. 42. pp. 1–6. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108023.

14. Zhao T., Xie Y., Ding M., Yang L., Tomizuka M., Wei Y. A road surface reconstruction dataset for autonomous driving // Sci Data. 2024. No 11. 459. Pp. 1–11. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03261-9.

15. He J., Gong L., Xu C., Wang P., Zhang Y., Zheng O., Su G., Yang Y., Hu J., Sun Y. HighRPD: A high-altitude drone dataset of road pavement distress // Data in Brief. 2025. Vol. 59. Pp. 1–8. https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111377.

16. Papers with Code – The latest in machine learning. URL: https://paperswithcode.com/task/road-segementation (дата обращения: 30.06.2025).

17. Махонько Я. В., Петряева А. А., Подмарькова В. А., Галактионов И. Д., Дмитриева Л. А. Обзор методов семантической сегментации спутниковых снимков Земли с применением нейросетевых технологий // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции в 3 т. Санкт-Петербург, 2023. С. 258–266.

18. Robinson C., Corley I., Ortiz A., Dodhia R., Ferres J. M. L., Najafirad P. Seeing the roads through the trees: A benchmark for modeling spatial dependencies with aerial imagery // arXiv preprint arXiv:2401.06762. 2024. Pp. 1–6.

19. Segmentation models. Python library with Neural Networks for Image Segmentation based on PyTorch // GitHub. URL: https://github.com/qubvel/segmentation_models.pytorch (дата обращения: 30.06.2025).

20. Nyandwi E., Gerke M., Achanccaray P. Local evaluation of large-scale remote sensing machine learning-generated building and road dataset: the case of Rwanda // PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2024. Pp. 1–18. https://doi.org/10.1007/s41064-024-00297-9.

E. S. Podolskaia
Center for Environmental and Forest Productivity Studies at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
epodolskaya@hse.ru

MACHINE LEARNING DATASETS TO RECOGNISE ROADS

Abstract. Machine learning datasets are being created and used in different thematic areas. A selection of road recognition datasets is presented based on ResearchGate publications. This niche of recognizing infrastructure objects is currently represented by open and downloadable datasets from China, USA, India, Great Britain and several other countries from 2021–2025 available under the CC BY 4.0 license whose number will certainly increase in the future.

Keywords: machine learning, deep learning, road recognition, dataset, neural network architecture

УДК 528

А. Н. Сафонова[1], Ю. А. Маглинец[2], Д. И. Каплун[3]
[1,3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия
[1] Лейбниц-центр исследования агроландшафтов, Мюнхеберг, Германия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]safonova.nasty1@gmail.com

ТЕХНОЛОГИИ ИИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Аннотация. В 20-е гг. XXI в. Существенно повысилась интенсивность применения методов глубокого обучения (ГО) в задачах классификации, обнаружения объектов и изменений по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сельском хозяйстве. Было опубликовано около тысячи статей, в том числе около 150 обзорных, однако ни одно исследование не охватывало все достижения ГО в ДЗЗ. Авторами подготовлен обзор с целью выявления ключевых тем и пробелов в знаниях о применении ДЗЗ в сельском хозяйстве по результатам анализа обзорных исследований, опубликованных с 2020 по март 2024 г. Используя библиометрический анализ и экспертные мнения, исследование выделяет общие темы, оценивает производительность моделей ГО и определяет направления для будущих исследований. Этот обзор представляет собой наиболее полный анализ в данной области и подчеркивает важные направления для дальнейших научных изысканий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, глубокое обучение, дистанционное зондирование Земли, сельское хозяйство, обзор

Введение. Методы искусственного интеллекта (ИИ), в первую очередь, основанные на алгоритмах глубокого обучения (ГО), в совокупности с технологиями дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), революционизируют мониторинг и прогнозирование в сельском хозяйстве, улучшая точность анализа данных на больших масштабах. ГО помогает автоматизировать анализ больших объемов данных, улучшая прогнозирование урожайности [1], диагностику болезней растений [2], картографирование и управление культурами [3], такими как рис [4], оливки [5, p. 200], кофе [6], соя [7].

С 2016 г. исследователи начали активно применять алгоритмы ГО для анализа изображений с ДЗЗ в сельском хозяйстве, включая классификацию сцен и обнаружение объектов. Изначально использовались глубокие нейронные сети (НС), а позже – рекуррентные нейронные сети (РНС) для обработки последовательных данных. Затем были внедрены автокодировщики, генеративно состязательные сети (ГСС), модели с длинной кратковременной памятью и трансформаторы. К 2023 г. количество публикаций о применении ГО в сельском хозяйстве достигло почти четырех тысяч, и продолжает расти на 60 % в год. С ростом научных исследований в области сельскохозяйственного ДЗЗ увеличивается количество обзорных статей,

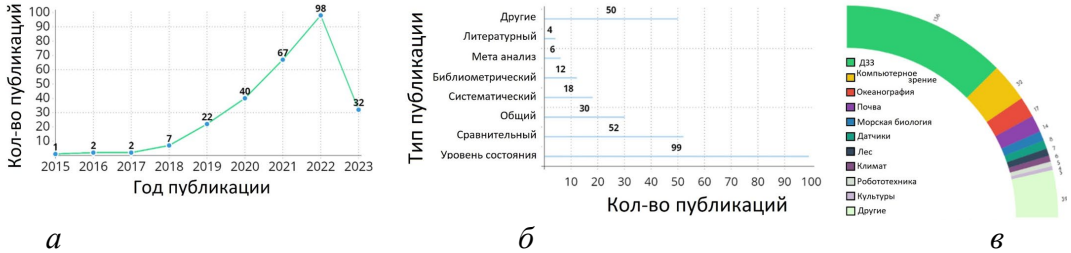
© Сафонова А. Н., Маглинец Ю. А., Каплун Д. И., 2025

которых к июлю 2024 г. насчитывалось около 150. Однако отсутствует всесторонний обзор достижений в ключевых направлениях, что затрудняет понимание состояния исследований. Цель данного исследования – охватить прогресс в приложениях ГО в сельскохозяйственном ДЗЗ за последние 5 лет, анализируя существующие обзорные статьи. Мы выделяем ключевые темы и оцениваем эффективность алгоритмов ГО на основе литературы. Также критически оцениваются методы, включая предварительную обработку данных и архитектуры нейросетей, с выявлением сильных и слабых сторон и потенциала для улучшений.

Методы. Для проведения обзора использовалась методология, описанная в работах О'Мэлли [8] и Левака [9]. Этот подход включает выявление тенденций и проблем в исследуемой области. Методология включает пять шагов: а) выявление релевантных исследований; б) отбор исследований; в) составление диаграммы; г) сравнение и представление результатов; д) определение проблем. Для построения диаграммы использована методика *PRISMA* (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) [10], регламентирующая предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов. Поиск литературы проводился 4 июля 2024 г. в базе данных *Web of Science Core Collection*. Ключевые слова: ДЗЗ, ГО, сельское хозяйство. Критерии отбора: рецензирование, доступ к полной версии и соответствие темам. Отбор статей прошел в три этапа: проверка заголовков, анализ полных текстов и извлечение данных. Полученные данные были объединены в таблицу и проанализированы с использованием программного обеспечения *Zotero*.

Результаты. *Поиск и отбор обзорных публикаций.* В ходе поиска в базе данных *Web of Science* на 4 июля 2024 г. было найдено 69 статей. После удаления дубликатов и исключения нерелевантных работ для дальнейшего анализа было отобрано 69 уникальных статей. На следующих этапах, после анализа полных текстов и исключения статей по ряду критериев, было выбрано 37 релевантных обзорных статей.

Основные характеристики включенных публикаций. Количество обзорных статей в последние годы растет, хотя и остается сравнительно низким (максимум 10 статей в 2023 г.). Типы обзорных статей варьируются от систематических до библиометрических и метаанализов. Наиболее распространенная тематика – это ДЗЗ, технологии, науки об окружающей среде и растениях (рис. 1).



а *б* *в*

Рис. 1. Основные характеристики включенных обзорных статей: *а* – количество обзорных статей в год; *б* – типы обзоров; *в* – области исследований статей

Использование ДЗЗ и ГО решает множество задач, таких как мониторинг болезней растений, точное сельское хозяйство, прогнозирование урожайности и картирование. Разнообразие типов данных включает гиперспектральные, мультиспектральные, оптические изображения, а также данные с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые играют важную роль в мониторинге сельского хозяйства.

В последние пять лет в сельском хозяйстве активно применяются методы ГО, включая сверточные нейронные сети (СНС), временное моделирование, трансферное обучение и другие. СНС применяются для задач сегментации и классификации, а также для выявления болезней растений. Временное моделирование полезно для анализа динамики роста растений, а трансферное обучение улучшает точность классификации объектов с ограниченным количеством данных [11].

Проблемы, ограничения и будущие направления исследований. Основными проблемами применения ИИ и ГО для ДЗЗ в сельском хозяйстве являются ограниченность данных, их высокая стоимость и влияние внешних факторов на качество данных, что снижает производительность моделей ИИ. Для успешного применения ИИ необходимо разрабатывать эффективные и обобщаемые модели, а также обеспечивать прозрачность прогнозов. Несмотря на это, существуют методы ГО для работы с малыми выборками, однако обработка больших данных требует значительных вычислительных ресурсов. Недостаток вычислительных мощностей может снизить эффективность моделей ГО, существует проблема нехватки общедоступных наборов данных и многоклассовой классификации.

Будущие исследования могут быть направлены на интеграцию данных с нескольких сенсоров, использование ансамблевого обучения и генетических алгоритмов для улучшения прогнозов, а также создание высокоточных карт для обнаружения сельскохозяйственных культур. Перспективными являются улучшение методов визуализации и ускорение работы трансформеров, а также 3D-картографирование для лучшего понимания сельскохозяйственных сцен. Кроме того, важным направлением будет разработка недорогих БПЛА с многосенсорными подвесами, интеграция с новыми сельскохозяйственными технологиями и решение этических вопросов, связанных с регулированием технологий.

Заключение. Применение ИИ, ГО и ДЗЗ стало основой для решения практических задач в сельском хозяйстве. Объем и сложность данных, получаемых с помощью ДЗЗ, привели к разработке новых алгоритмов ГО, которые изменили методы сбора, обработки и анализа информации. В данной статье представлен обзор литературы по применению ГО и ДЗЗ в сельском хозяйстве за последние пять лет. В ходе исследования выявлены основные тенденции, оценена эффективность моделей ГО, а также определены ключевые пробелы в знаниях и направления для дальнейших исследований в этой области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 22-76-10042 (https://rscf.ru/project/22-76-10042).

Список источников

1. Darra N., Anastasiou E., Kriezi O., Lazarou E., Kalivas D., Fountas S. Can Yield Prediction Be Fully Digitilized? A Systematic Review // Agronomy, Sep. 2023, vol. 13, no. 9, Art. no. 9, DOI: 10.3390/agronomy13092441.

2. Abbas A. Drones in Plant Disease Assessment, Efficient Monitoring, and Detection: A Way Forward to Smart Agriculture // Agronomy, Jun. 2023, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, DOI: 10.3390/agronomy13061524.

3. Alberto Garcia-Berna J., Ouhbi S., Benmouna B., Garcia-Mateos G., Luis Fernandez-Aleman J., Miguel Molina-Martinez J. Systematic Mapping Study on Remote Sensing in Agriculture // Applied Sciences-Basel, May 2020, vol. 10, no. 10, DOI: 10.3390/app10103456.

4. Zheng J., Song X., Yang G., Du X., Mei X., Yang X. Remote Sensing Monitoring of Rice and Wheat Canopy Nitrogen: A Review // Remote Sensing, Nov. 2022, vol. 14, no. 22, DOI: 10.3390/rs14225712.

5. Messina G. Modica G. The Role of Remote Sensing in Olive Growing Farm Management: A Research Outlook from 2000 to the Present in the Framework of Precision Agriculture Applications // Remote Sensing, Dec. 2022, vol. 14, no. 23, DOI: 10.3390/rs14235951.

6. Hunt D. A. Review of Remote Sensing Methods to Map Coffee Production Systems // Remote Sensing, Jun. 2020, vol. 12, no. 12, p. 2041, DOI: 10.3390/rs12122041.

7. Arjoune Y. Soybean cyst nematode detection and management: a review // Plant Methods, Sep. 2022, vol. 18, no. 1, p. 110, DOI: 10.1186/s13007-022-00933-8.

8. Arksey H., O'Malley L. Scoping studies: towards a methodological framework // International Journal of Social Research Methodology, Feb. 2005, vol. 8, no. 1, pp. 19–32, DOI: 10.1080/1364557032000119616.

9. Levac D., Colquhoun H., O'Brien K. K. Scoping studies: advancing the methodology // Implementation Science, Sep. 2010, vol. 5, no. 1, p. 69, DOI: 10.1186/1748-5908-5-69.

10. Haddaway N. R., Page M. J., Pritchard C. C., McGuinness L. A. PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis // Campbell Systematic Reviews, 2022, vol. 18, no. 2, p. e1230, DOI: 10.1002/cl2.1230.

11. Safonova A., Ghazaryan G., Stiller S., Main-Knorn M., Nende C., Ryo M. Ten deep learning techniques to address small data problems with remote sensing // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, vol. 125, p. 103569.

A. N. Safonova[1], Yu. A. Maglinets[2], Yu. D. I. Kaplun[3]
[1,3] Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia
[1] Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research, Müncheberg, Germany
[2] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1]safonova.nasty1@gmail.com

AI AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

Abstract. In the 2020s, the use of deep learning (DL) methods for classification, object detection, and change detection tasks based on remote sensing (RS) data in agriculture has significantly intensified. Approximately a thousand articles have been published, including around 150 review papers; however, no single study has covered all DL achievements in RS. The authors have prepared a review aiming to identify key topics and knowledge gaps regarding the application of RS in agriculture based on an analysis of review studies published from 2020 to

March 2024. Using bibliometric analysis and expert opinions, the study highlights common themes, evaluates the performance of DL models, and determines directions for future research. This review represents the most comprehensive analysis in the field and emphasizes important avenues for further scientific exploration.

Keywords: artificial intelligence, deep learning, remote sensing, agriculture, review

УДК 004.89

А. Н. Синицина[1], Е. С. Подольская[2]
[1] МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
[2] Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия
[1]sinichka.ann.nik@yandex.ru, [2]ekaterina.podolskaia@gmail.ru

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА АНАЛИЗА ДАТАСЕТА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТА

Аннотация. Статья посвящена разработке программного инструмента для анализа табличных датасетов с применением методов машинного обучения. Предметом исследования является процесс моделирования характеристик сезонных автодорог. Целью работы стало создание программного обеспечения, позволяющего без навыков программирования выполнять корреляционный и регрессионный анализ данных. Методология основана на применении библиотеки *Scikit-learn* и графического интерфейса на *Python*. В результате разработано настольное приложение с поддержкой визуализации и построения прогнозных моделей. Инструмент применим в сфере логистики, территориального планирования и управления дорожной инфраструктурой.

Ключевые слова: разработка программного обеспечения, Python, графический интерфейс (GUI), машинное обучение, регрессионный анализ, Scikit-learn

1. Постановка задачи и описание архитектуры решения. Цель работы состоит в создании простого и интуитивного программного инструмента, позволяющего загружать региональный датасет (в формате *CSV*), выполнять корреляционный анализ и запускать машинное обучение для построения регрессионных моделей [1; 2]. Основной сценарий применения – оценка продолжительности функционирования зимников [3; 4] в зависимости от факторов, содержащихся в исходных данных. Разработка выполнена на языке *Python* с применением следующих компонентов:

– интерфейс: библиотека *Tkinter* [5] для реализации графического интерфейса (*GUI*);

– аналитический модуль: библиотеки *pandas*, *numpy*, *scikit-learn*, *scipy*;

– визуализация: библиотеки *matplotlib* и *seaborn* для построения графиков, диаграмм, матриц корреляций;

– модели машинного обучения: линейная и регуляризованные регрессии, дерево решений, случайный лес, градиентный бустинг.

Все компоненты интегрированы в единое настольное приложение, работающее локально.

2. Реализация программного инструмента. Программа имеет следующую многооконную структуру:

– меню загрузки данных: выбор файла, указание кодировки;

– окно выбора признаков: выделение независимых и зависимой переменных;

© Синицина А. Н., Подольская Е. С., 2025

– выбор метода корреляции: Пирсон, Спирмен, Кендалл;

– параметры модели: выбор типа регрессии, объем обучающей выборки;

– вывод результатов: таблицы значений метрик, графики, тепловые карты.

Интерфейс поддерживает два языка (русский и английский), вид основного меню показан на рис. 1.

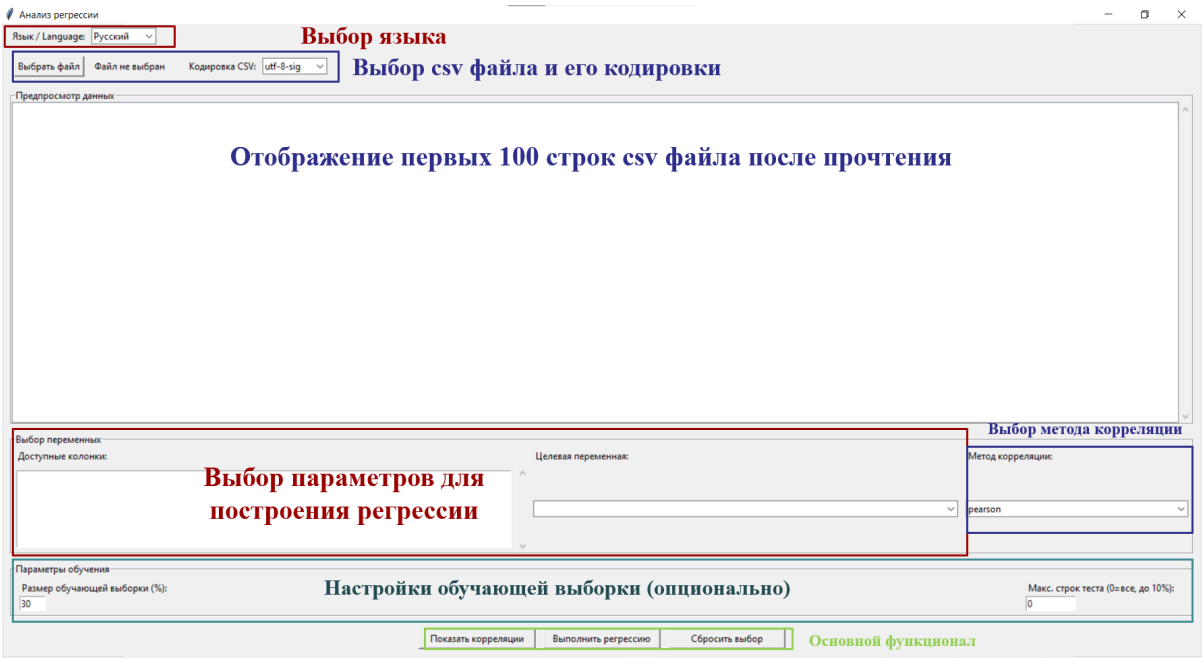


Рис. 1. Интерфейс основного меню инструмента

Функциональность программного обеспечения включает:

– загрузку таблицы и предварительный просмотр первых 100 строк;

– корреляционный анализ с визуализацией: автоматическое построение корреляционной матрицы и ее визуальное представление;

– запуск моделей машинного обучения:

1. *Linear Regression* (линейная регрессия);
2. *Ridge* / *Lasso Regression*;
3. *Decision Tree Regressor* (дерево решений);
4. *Random Forest Regressor* (случайный лес);
5. *Gradient Boosting* (градиентный бустинг);
6. *HistGradientBoosting* (оптимизированный бустинг);

– оценку точности моделей: R, R^2, *RMSE*, *MSE*, коэффициент корреляции;

– визуализацию результатов: графики «факт-прогноз», диаграммы важности признаков;

– экспорт результатов в *PNG*-файл.

Программа автоматически масштабирует входные данные и предупреждает пользователя об отсутствии необходимых признаков, пропущенных значениях или некорректной структуре данных. Графический пример реализации регрессии представлен на рис. 2.

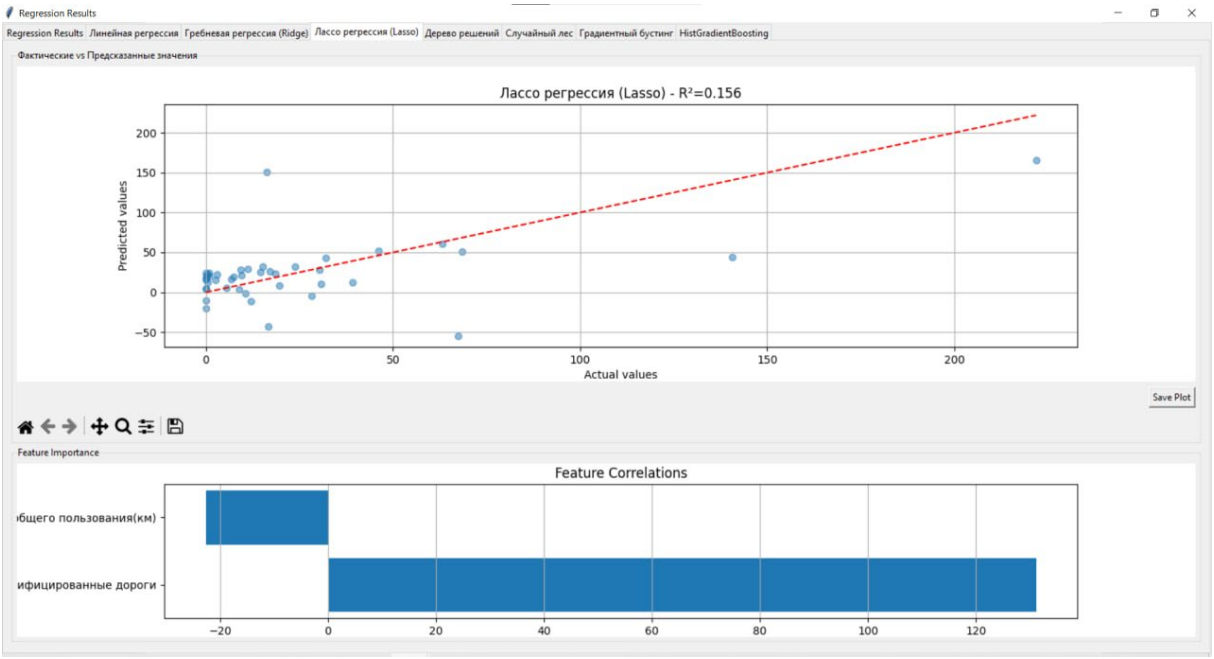


Рис. 2. Пример графического представления регрессии

3. Машинное обучение: логика, модели, интерпретация. Для анализа используются регрессионные модели, реализованные в библиотеке машинного обучения *Scikit-learn* [1–2]. Каждая модель запускается отдельно, при этом пользователь может сравнить точность по стандартным метрикам. Особенности реализации:

– автоматическое масштабирование признаков (*StandardScaler*);

– поддержка случайного разбиения обучающей и тестовой выборок;

– встроенная проверка наличия пропущенных значений;

– возможность пошаговой настройки модели.

На тестовом датасете с более чем 50 наблюдениями, содержащем параметры зимников (краевые и региональные дороги, зимник, площадь лесов, площадь криолитозоны, глубина снега и др.), наилучший результат показала модель *Lasso Regression*: $R^2 \approx 0{,}83$ и *RMSE* $\approx 9{,}81$. Это означает, что модель может предсказывать зависимость зимников от иных факторов с достаточно высокой точностью, что делает инструмент полезным для управленческих и проектных задач.

Интерпретация важности факторов. Модуль оценки *feature importance* реализован для моделей типа «дерево решений» и «случайный лес». В тестовых запусках наибольшую важность показали: глубина снежного покрова; площадь криолитозоны; заболоченность. Такие оценки позволяют пользователю не только прогнозировать значения, но и понимать структуру влияющих факторов.

Заключение. Разработанное программное обеспечение представляет собой гибкий, наглядный и расширяемый инструмент для анализа табличных данных в региональных проектах, особенно в сфере оценки сезонной транспортной инфраструктуры. В отличие от универсальных платформ машинного обучения, инструмент предназначен для следующих случаев применения:

– ограниченного объема данных;

– необходимости пространственной привязки;

– отсутствия у пользователей навыков программирования.

Система успешно апробирована на датасете по зимникам Красноярского края, может быть адаптирована для датасетов других регионов РФ. В дальнейшем планируется: расширение поддержки пространственных моделей на базе языка *R* (пакеты *sf*, *spatialreg*); добавление модуля обработки пространственных файлов (*GeoPackage*, *Shapefile*); интеграция с веб-картами (*Leaflet*, *CesiumJS*) и автоматическая загрузка данных через *Overpass API*; реализация дополнительных методов отбора признаков и *AutoML*-модулей.

Программа может применяться как в научно-исследовательской среде, так и в практике территориального планирования и инженерной геоинформатики.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

Список источников

1. Scikit-learn documentation. URL: https://scikit-learn.org (дата обращения: 27.06.2025).

2. Памфел Ф., Груздев А., Цвиркун Д. Логистическая регрессия. М. : ДМК Пресс, 2023. 218 с.

3. Подольская Е. С., Синицина А. Н. ГИС-проект сезонного использования дорог // Радиоинфоком-2024 : сб. науч. ст. М. : РТУ МИРЭА, 2024. С. 857–861.

4. Подольская Е. С., Синицина А. Н. Сбор и систематизация данных по сезонным дорогам для лесотранспортного моделирования // Актуальные проблемы картографии, моделирования и геоинформационных систем (АКМиГИС–2025) : сб. тез. докл. М. : ЦЭПЛ РАН, 2025. С. 86–88.

5. Tkinter GUI programming. URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (дата обращения: 27.06.2025).

A. N. Sinitsina[1], E. S. Podolskaia[2]

[1] MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia

[2] Center for Environmental and Forest Productivity Studies at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[1]sinichka.ann.nik@yandex.ru, [2]ekaterina.podolskaia@gmail.ru

DEVELOPMENT OF A MACHINE LEARNING DATASET ANALYSIS TOOL FOR A REGIONAL PROJECT

Abstract. Paper presents the development of a software tool for analyzing tabular datasets using machine learning methods. Research focuses on modeling seasonal road characteristics. The main objective is to create software that allows users to perform correlation and regression analysis without programming skills. Its methodology is based on the use of Scikit-learn library and a Python-based graphical user interface. As a result, a standalone desktop

application with visualization and forecasting capabilities was developed. The tool can be used in logistics, regional planning, and road infrastructure management.
Keywords: software development; Python; GUI; machine learning; regression analysis; Scikit-learn

УДК 004.8

В. Д. Урдаев[1], Р. В. Брежнев[2], К. В. Раевич[3], Ю. А. Маглинец[4]
[1, 2, 3, 4]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]vurdaev@mail.ru, [2]brejnev.ruslan@gmail.com,
[3]ksenia_248@mail.ru, [4]maglinets@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В статье рассмотрены текущие проблемы в сфере анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Проведен обзор концепции больших языковых моделей (*LLM*), рассмотрены их основные характеристики и потенциал в области обработки и анализа больших данных. Представлены возможные сценарии интеграции *LLM* в системы анализа ДЗЗ, включая поддержку принятия решений, семантический анализ, взаимодействие с пользователем на естественном языке. Определены преимущества использования *LLM* в сравнении с традиционными подходами, а также обозначены перспективы их развития в рамках интеллектуальной обработки данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, большие языковые модели, искусственный интеллект, анализ данных, интерпретация данных, автоматизация анализа, *Big Data*

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) играет ключевую роль в мониторинге состояния окружающей среды, управлении природными ресурсами, прогнозировании чрезвычайных ситуаций и изучении климатических изменений. Современные спутниковые системы обеспечивают непрерывный поток данных высокого разрешения, что открывает широкие возможности для проведения научных исследований и решения прикладных задач. Однако рост количества и разнообразия данных ДЗЗ приводит к значительному усложнению их обработки, анализа и интерпретации.

На сегодняшний день одной из актуальных проблем является высокая степень сложности в обработке больших массивов гетерогенных данных, поступающих с различных датчиков и в разных спектральных диапазонах. Современные системы анализа ДЗЗ сталкиваются с трудностями в обеспечении оперативности, точности и масштабируемости обработки информации. Это связано как с техническими ограничениями, так и с необходимостью привлечения высококвалифицированных специалистов для интерпретации полученных результатов.

Еще одной значимой проблемой является низкая степень автоматизации аналитических процессов. Многие задачи, такие как выделение объектов, классификация покровов, выявление аномалий и построение прогнозов,

© Урдаев В. Д., Брежнев Р. В., Раевич К. В., Маглинец Ю. А., 2025

до сих пор требуют ручного вмешательства или полуавтоматической обработки. Это замедляет процесс принятия решений и ограничивает доступ к данным ДЗЗ для пользователей без специализированной подготовки.

Кроме того, существует проблема интеграции данных ДЗЗ с другими источниками информации – геоинформационными системами, наземными наблюдениями, социальными и экономическими данными. Отсутствие унифицированных подходов к семантической интерпретации данных затрудняет создание комплексных аналитических решений и ограничивает их применимость в междисциплинарных исследованиях.

В этих условиях всё большее внимание уделяется применению современных технологий искусственного интеллекта, которые могут стать ключевым инструментом для повышения эффективности анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования.

Обзор LLM. *LLM* – это тип искусственного интеллекта, предназначенный для понимания и генерации естественного языка. Они обучаются на существенных объемах текстовых данных и способны выполнять широкий спектр задач: от ответов на вопросы и написания текстов до анализа данных и генерации программного кода. *LLM* основаны на архитектуре трансформеров, что позволяет им учитывать контекст и строить логически связные и грамматически корректные ответы.

Современные *LLM* предоставляют несколько интерфейсов взаимодействия с пользователем:

– текстовый интерфейс – наиболее распространенный способ взаимодействия, при котором пользователь вводит запрос на естественном языке, а модель возвращает текстовый ответ;

– программный интерфейс (*API*) – позволяет интегрировать модель в сторонние приложения, автоматизируя обработку данных, генерацию отчетов, классификацию текста и другие задачи;

– интеграция с системами анализа данных – в таких системах *LLM* могут использоваться как вспомогательный интерфейс для работы с *Big Data*, позволяя, например, запрашивать данные на естественном языке, получать автоматически сгенерированные отчеты или объяснения результатов анализа.

Проектирование системы на основе LLM и ДЗЗ. При проектировании системы анализа и интерпретации данных ДЗЗ на основе *LLM* были взяты в расчет следующие требования:

– обеспечение взаимодействия с данными ДЗЗ через естественный язык, используя *LLM* в качестве посредника;

– автоматизация анализа и интерпретации данных;

– автоматизация создания отчетов и аналитических выкладок на основе данных ДЗЗ;

– возможность интеграции с другими сервисами.

К основным элементам данной архитектуры можно отнести:

– сервис пользовательского интерфейса, предназначенный для взаимодействия клиента и системы;

– сервис обработки данных ДЗЗ, предназначенный для обработки геоданных в их изначальном формате;

– сервис интеграции с *LLM*, предназначенный для анализа и интерпретации обработанных данных ДЗЗ с использованием запросов пользователя;

– сервисы тематической обработки данных, предназначенные для постобработки данных по запросам от других сервисов;

– сервис визуализации, предназначенный для генерации графического представления результатов выполнения запросов пользователя;

– сервис интеграции с внешними системами;

– сервис хранения данных, предназначенный для хранения данных ДЗЗ, а также результатов анализа.

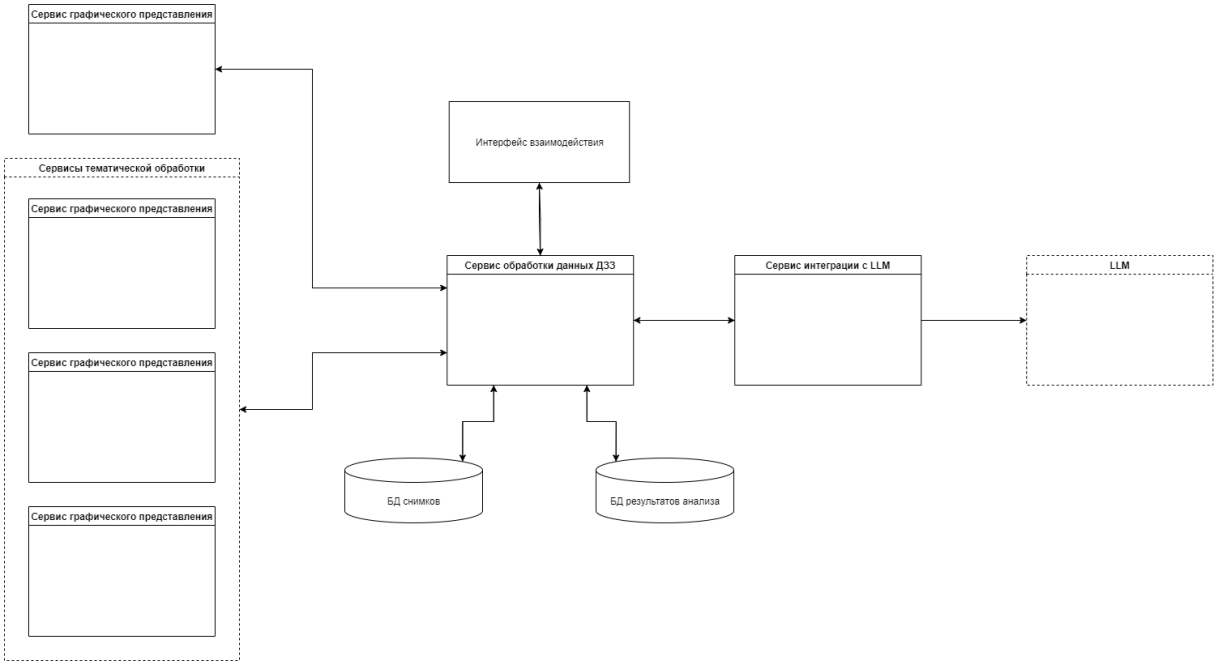


Рис. 1. Модель архитектуры взаимодействия частей системы анализа данных ДЗЗ на основе *LLM*

В работе рассмотрены актуальные проблемы анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли. Показаны возможности применения *LLM* для автоматизации аналитических процессов, процессов интерпретации данных, а также генерации отчетов. Разработано описание архитектуры системы, имплементирующей возможности, представляемые *LLM* в сфере работы с данными ДЗЗ.

Список источников

1. Jiangyun L., Yuanxiu C., Qing L., Mingyin K. A review of remote sensing image segmentation by deep learning methods // International Journal of Digital Earth. 2024 17 (1). Oxfordshire, International Journal of Digital Earth, 2024.

2. Brown T. B., Mann B., Ryder N. Language Models are Few-Shot Learners. // arXiv:2005.14165. New York, arXiv, 2020.

3. Mrinalini K., Matthias K., Michael S., Hannes T., Xiao Xiang Z. Earth Observation and Artificial Intelligence. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2473-2397/22. Boulder, IEEE, 2016.

V. D. Urdaev[1], R. V. Brezhnev[2], K. V. Raevich[3], Yu. A. Maglinets[4]
[1, 2, 3, 4]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1]vurdaev@mail.ru, [2]brejnev.ruslan@gmail.com,
[3]ksenia_248@mail.ru, [4]maglinets@mail.ru

USING LARGE LANGUAGE MODELS FOR ANALYSIS AND INTERPRETATION OF REMOTE SENSING DATA OF THE EARTH

Abstract. The article examines current challenges in the analysis and interpretation of Remote sensing of the earth (RS data). An overview of large language models (LLM) is provided, along with a discussion of their key characteristics and potential in processing and analyzing large datasets. Possible scenarios for integrating LLMs into RS data analysis systems are presented, including decision support, semantic analysis, and natural language user interaction. The advantages of using LLMs over traditional approaches are identified, and prospects for their development within intelligent remote sensing data processing are outlined.

Keywords: Remote sensing of the earth, large language models, artificial intelligence, data analysis, data interpretation, analysis automation, Big Data

УДК 528.88

Е. Д. Фанин[1], Н. А. Позднякова[2]
[1, 2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[1]faninhd@yandex.ru, [2]n.pozdnyakova@spbu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена моделированию температуры поверхности Земли (*LST*) на основе индексов (*NDVI, NDWI, NDBI*) и данных о землепользовании (*LULC*) с использованием алгоритма *XGBoost* (*eXtreme Gradient Boosting*), реализующего метод градиентного бустинга. Цель работы – разработка модели для анализа городского теплового острова на примере Красноярска с применением машинного обучения. Методы работы включали обработку данных *Landsat-8*, оптимизацию гиперпараметров и интерпретацию параметров через значения *SHapley Additive exPlanations* (*SHAP*). Результаты показали высокую точность модели (R^2 = 0,80; *RMSE* = 1,94 °C) с наибольшим вкладом урбанизации (*NDBI*) и растительности (*NDVI*). Для экстремального диапазона температур 35,0–41,1 °C значение среднеквадратичной ошибки (*RMSE* = 4,57 °C) выявило ограничения модели.

Ключевые слова: *LST*, *XGBoost*, *SHAP*, машинное обучение, *Landsat-8*, городской остров тепла

Введение. Актуальность исследования городского теплового острова (ГОТ) обусловлена глобальным изменением климата и интенсивной урбанизацией, приводящей к локальному повышению температуры в городах. По данным Всемирной метеорологической организации, к 2050 г. более 68 % населения мира будет проживать в городских агломерациях, что усилит нагрузку на экосистемы [1]. Мониторинг температуры поверхности Земли с использованием спутниковых данных, таких как *Landsat-8*, стал ключевым инструментом для анализа ГОТ [2]. Однако традиционные методы часто ограничены сложностью учета антропогенных факторов, таких как землепользование (*LULC*) и индексы (*NDVI*, *NDBI*, *NDWI*) [3].

Целью работы является разработка модели прогнозирования температуры поверхности Земли (*LST*) на основе расчета индексов и данных о землепользовании с применением алгоритма *XGBoost* для анализа ГОТ г. Красноярска. Ряд исследований фокусируются на регрессионном анализе, данная работа использует методы, позволяющие оценить влияние различных факторов на предсказания модели, такие как *SHapley Additive exPlanations* (*SHAP*), для интерпретации вклада каждого признака в формирование ГОТ на основе теории игр. Современные исследования [4; 5] активно используют *XGBoost-SHAP* для анализа *LST*, но редко комбинируют индексные изображения с *LULC*-данными.

© Фанин Е. Д., Позднякова Н. А., 2025

Объект исследования – Красноярск, город с континентальным климатом и неоднородной застройкой. Использование открытых данных *Landsat-8* и геоинформационных систем обеспечивает возможность повторения метода для других регионов. Результаты работы дополняют инструментарий устойчивого городского планирования, ориентированный на снижение тепловых рисков в условиях урбанизации.

Материалы и методы. В статье рассматриваются общедоступные данные *Collection 2 Level 1* со спутника *Landsat-8* за 26 июля 2021 г. (*PATH/ROW*: 142/21; *Cloud cover*: 8,75 %). К набору данных были применены радиометрические и геометрические коррекции. По стандартным алгоритмам рассчитаны индексные изображения *NDVI*, *NDWI*, *NDBI* и *LST*. Данные о землепользовании (*LULC*) были взяты с сайта администрации города и векторизованы, укрупнены классы: производственная зона; зона сельскохозяйственного использования; зона рекреационного назначения; водные ресурсы; зона смешанной и деловой застройки. Растровые данные преобразованы в *CSV*-формат (422,485 точек).

В *Python* с библиотекой *XGBoost* реализован алгоритм для моделирования *LST* на основе индексов и *LULC* (рис. 1). Данные загружаются из текстового файла с расширением *CSV*, объединяются и предобрабатываются (проверка на целостность и тип). Значения индексов (*NDVI*, *NDBI*, *NDWI*, *LULC*) и целевая переменная (*LST*) разделены, координаты центров пикселов сохранены для визуализации. Обучение модели включает стандартную 5-кратную кросс-валидацию и оптимизацию гиперпараметров (глубина дерева, скорость обучения) через *GridSearchCV*. Для оценки точности рассчитаны *RMSE*, *MAE*, R^2 и *T*-статистика, а *SHAP*-анализ выявил вклад отдельных признаков.

Результаты визуализированы в виде графиков корреляций, кривых обучения, карт ошибок в формате *GeoJSON*. Интеграция *SHAP* обеспечивает прозрачность модели и анализ влияния антропогенно-природных факторов на *LST*.

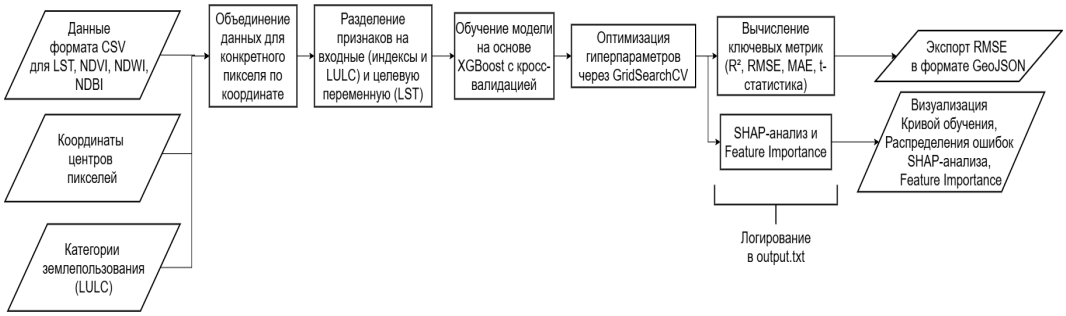


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы программы
на основе модели градиентного бустинга

Итоговая карта распределения *RMSE* (рис. 2) была визуализирована интерполированием из файла *GeoJSON* с 126,746 точками методом кубического сплайна в ПО *QGIS*.

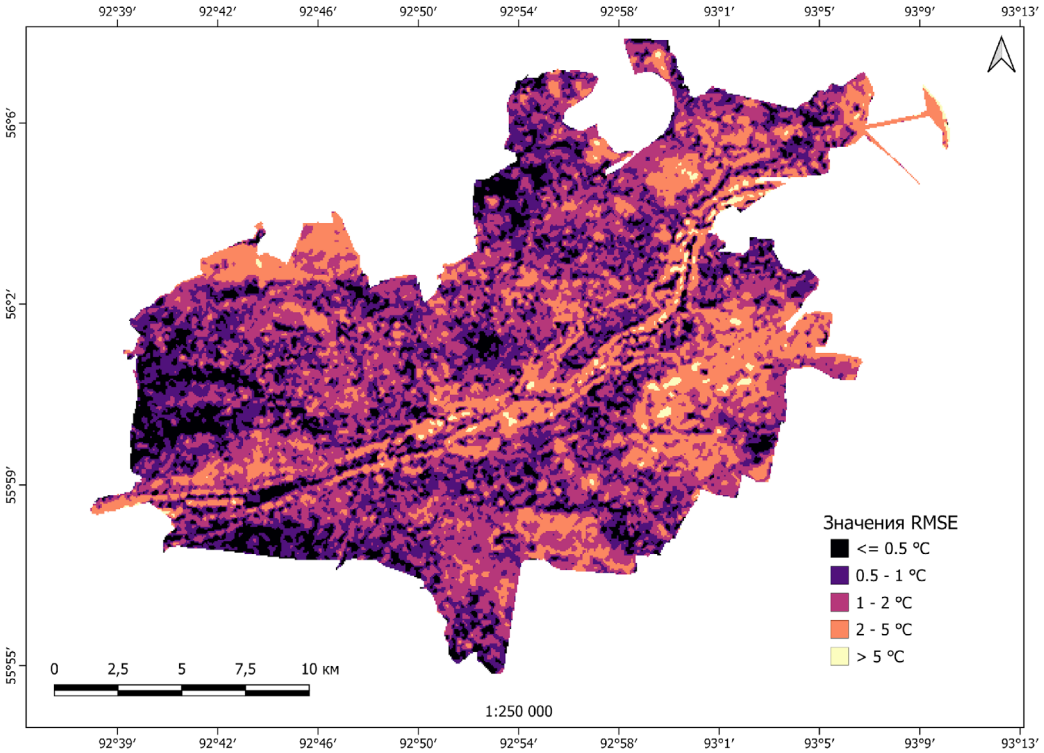


Рис. 2. Карта распределения *RMSE*-модели на территории Красноярска

Результаты и обсуждение. Модель градиентного бустинга *XGBoost* продемонстрировала высокую точность прогнозирования *LST* (R^2 = 0,8029), объясняя 80,29 % дисперсии данных. Средние ошибки *RMSE* = 1,94 °C и *MAE* = 1,43 °C демонстрируют низкие значения и подтверждают применимость модели для анализа городского теплового острова (табл. 1).

Статистический анализ не выявил значимых различий между предсказанными и фактическими значениями *LST* ($p > 0,05$), что подтверждает корректность калибровки модели на данном участке. Однако низкое значение *t*-статистики может указывать на необходимость дополнительной проверки гипотез при расширении выборки.

Таблица 1

Основные метрики модели

R^2	*RMSE*	*MAE*	*t-test*	*p-value*
0,8029	1,9398	1,4337	0,4044	0,6859

Интерпретация *SHAP*-значений выявила ключевые факторы, влияющие на *LST*. Наибольший вклад в прогноз вносят индекс урбанизации (*NDBI*: +0,428) и индекс растительности (*NDVI*: +0,260), что согласуется с известными эффектами теплопоглощения искусственных поверхностей и охлаждения зеленых зон [6]. Отрицательное влияние *NDWI* (–0,664) отражает роль водных объектов в снижении температур. Классы землепользования (*LULC*) оказались статистически незначимыми (–0,022).

Рост *RMSE* до 4,57 °C для экстремального диапазона температур (35,0–41,1 °C) указывает на ограничения модели в условиях сильного нагрева, тогда как для умеренного диапазона (22,9–29,0 °C) точность максимальна (*RMSE* = 1,64 °C). Пространственное распределение ошибок (рис. 2) демонстрирует повышенные значения *RMSE* в промышленных зонах (высокий *NDBI*) и в зоне водных объектов.

Выводы. Разработанная модель на основе *XGBoost* и *SHAP*-анализа продемонстрировала высокую точность моделирования *LST* (R^2 = 0,80) в условиях г. Красноярска, подтвердив ключевую роль урбанизации (*NDBI*) и растительности (*NDVI*) в формировании ГОТ. Ограничения связаны с ростом *RMSE* до 4,57 °C при экстремальных температурах и низкой значимостью классов *LULC*, что требует интеграции дополнительных данных для устойчивости прогнозов.

Список источников

1. WMO Urban Climate Atlas. 2020. URL: https://public.wmo.int/en.

2. Li X. et al. Remote sensing of the surface urban heat island // Remote Sensing. 2020. Vol. 12 (12). P. 2010.

3. Estoque R.C. et al. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature // Environmental Research Letters. 2017. Vol. 12 (3).

4. Wei J. et al. The Impact of Spatiotemporal Effect and Relevant Factors on the Urban Thermal Environment Through the XGBoost-SHAP Model // Land. 2025. Vol. 14. N 2. P. 394.

5. Hu Y. et al. Pixel level spatial variability modeling using SHAP reveals the relative importance of factors influencing LST //Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. N 3. P. 407.

6. Malik M. S., Shukla J. P., Mishra S. Relationship of LST, NDBI and NDVI using landsat-8 data in Kandaihimmat watershed, Hoshangabad, India. 2019.

E. D. Fanin[1], N. A. Pozdnyakova[2]

[1, 2]Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

[1]faninhd@yandex.ru, [2]n.pozdnyakova@spbu.ru

MODELING LAND SURFACE TEMPERATURE BASED ON DERIVED IMAGES USING MACHINE LEARNING METHODS

Abstract. The article is devoted to modeling the Earth's surface temperature (LST) based on indexes (NDVI, NDWI, NDBI) and land use data (LULC) using the XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) algorithm, which implements the gradient boosting method. The aim of the paper is to develop a model for analyzing the urban heat island (UHI) using the example of Krasnoyarsk using machine learning. Working methods include processing Landsat-8 (2021) data, hyperparameter optimization, and parameter interpretation through SHapley Additive exPlanations (SHAP) values. The results showed high accuracy of the model (R^2 = 0.80; RMSE = 1.94°C), with the greatest contribution from urbanization (NDBI) and vegetation (NDVI). For the extreme temperature range of 35.0–41.1°C, the root mean squared error (RMSE = 4.57°C) revealed the limitations of the model.

Keywords: LST, XGBoost, SHAP, machine learning, Landsat-8, urban heat island

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.515.8

И. М. Акимов[1], К. Н. Пустовалов[2], О. И. Кучинская[3], И. Д. Брюханов[4]
[1, 2, 3, 4]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
[1]ima8908@mail.ru, [2]const.pv@yandex.ru,
[3]olesia.kuchinskaia@cern.ch, [4]plyton@mail.tsu.ru

ПОИСК ВЫСОТЫ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В МОМЕНТ РЕГИСТРАЦИИ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА

Аннотация. В данной работе рассматривается возможность определения высоты фронтальной поверхности в условиях наличия облаков верхнего яруса. В работе предложен метод поиска границы на основе полиномиальной аппроксимации зависимости градиента температуры от высоты, что позволяет повысить точность и надежность определения границ воздушных масс. Проведенные сравнения с существующими теориями подтверждают эффективность разработанного подхода. Верификация полученных результатов проводилась с использованием экспериментальных данных лидарного зондирования атмосферы. Решение данной задачи важно для повышения качества прогнозов погоды и улучшения понимания динамики верхней тропосферы.

Ключевые слова: облака верхнего яруса, атмосферный фронт, машинное обучение, прогнозирование погоды и климата

Введение. Влияние антропогенных факторов на климатические процессы активно исследуется учеными по всему миру с применением современных инструментов и технологий [1]. Особое значение при этом придается облачности – одному из ключевых компонентов климатической системы. Облака выполняют двойственную функцию: с одной стороны, они отражают часть солнечного излучения обратно в космос (эффект альбедо), а с другой – способствуют удержанию теплового излучения, исходящего от поверхности Земли (парниковый эффект). В связи с этим облачность является важнейшим регулятором радиационного баланса планеты. Вместе с тем облака остаются одним из основных источников неопределенности в климатических моделях, поскольку их динамику и свойства сложно точно описать и смоделировать [2].

В Национальном исследовательском Томском государственном университете разработан высотный матричный поляризационный лидар, позво-

ляющий дистанционно (до высот 15 км) определять геометрические и оптические характеристики облаков верхнего яруса (ОВЯ) [3]. Для разработки более точных и универсальных моделей, описывающих такие облака, лидарные данные должны дополняться информацией о состоянии атмосферы на соответствующих высотах. Важным направлением является анализ зависимости параметров ОВЯ от метеорологических величин (влажность воздуха, температура, давление, параметры ветра и динамики атмосферы). Такой подход позволит выявить ключевые факторы, влияющие на микроструктуру и оптические свойства облаков, а также определить закономерности их формирования и эволюции в различных климатических условиях. Для достижения этой цели необходимо проводить комплексные экспериментальные исследования, объединяющие лидарное зондирование ОВЯ с метеорологическими наблюдениями.

Нижняя граница ОВЯ. Точное предсказание высоты нижней границы ОВЯ важно для определения типа облаков и микроструктуры льда, что влияет на радиационные свойства атмосферы. ОВЯ формируются на высоте, превышающей высоту фронтальной поверхности, что подчеркивает важность понимания пространственной динамики воздушных масс для прогноза облачности [4]. При этом вблизи границ атмосферного фронта отмечается возрастание абсолютных значений градиентов метеорологических величин. При вертикальном «разрезе» фронтальной поверхности должен изменяться знак первой производной температуры по высоте, что показывает резкие изменения температуры и может служить индикатором наличия фронтальной поверхности [5]. На рис. 1 представлено значение разницы температур между двумя точками: одной, расположенной на высоте выше заданного уровня на 50 м, и другой – ниже этого уровня также на 50 м. Поделив эту разницу температур на общую разность высот (100 м), мы получаем график производной температуры от высоты. В качестве исходных метеорологических данных использовался реанализ *ERA5*: данные для точки расположения лидарной установки 22 марта 2013 г. в 14:30. На графике наблюдается тенденция к снижению значения производной, а затем к ее увеличению.

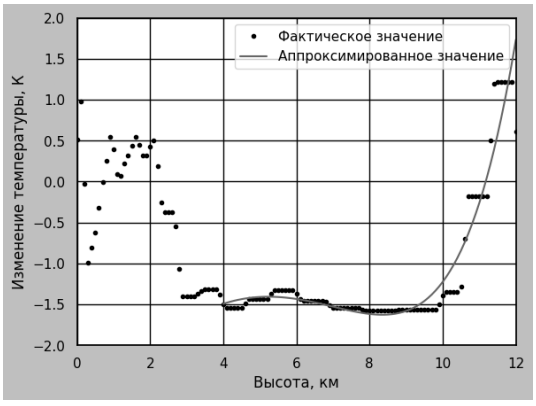


Рис. 1. График приращения температуры с высотой

Для более точного поиска высоты границы между двумя фронтами была аппроксимирована зависимость приращения температуры от высоты полиномом пятой степени (непрерывная линия), что позволяет учесть нелинейные изменения температурного градиента с высотой и возможность более точно описать его поведение. В качестве точной высоты фронтальной поверхности использовано значение высоты, где находится максимум функции слева от ее минимума. Данная точка может соответствовать нижней границе слоя с максимальными абсолютными значениями производной температуры воздуха, который можно идентифицировать как переходную зону между двумя воздушными массами (атмосферный фронт).

Для верификации полученных результатов использовались данные лидарных наблюдений с 2009 г. [3]. На рис. 2 представлена гистограмма распределения разницы между высотой фронтальной поверхности, определенной нашим методом, и высотой нижней границы ОВЯ, определенной с помощью наземного лидарного зондирования. Анализ данных показывает, что в большинстве случаев высота нижней границы ОВЯ существенно выше границы фронтов, что соответствует теоретическим ожиданиям и подтверждает корректность разработанного подхода [4].

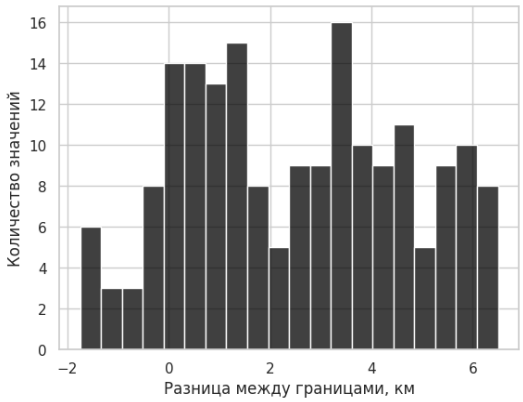


Рис. 2. Гистограмма распределения разницы высот
между фронтальной поверхности и нижней границей ОВЯ

Однако в большинстве случаев искомый максимум явно не проявляется, в связи с чем необходимо продолжить исследования по подбору более подходящих математических моделей и функций аппроксимации. Уровень совпадений может быть обусловлен сложностью и нелинейностью взаимосвязей между параметрами, а также наличием шумов и выбросов в исходных данных, что затрудняет точное моделирование с помощью полиномиальных функций. Будут рассмотрены функции с более гибкой структурой (например, сплайны, экспоненциальные или гиперболические функции), а также исследовано применение методов машинного обучения и регрессионных алгоритмов, способных лучше учитывать сложные зависимости. Такой подход позволит повысить точность определения искомого максимума и улучшить качество моделирования в рамках поставленной задачи.

Заключение. В данной работе задача определения нижней границы ОВЯ сведена к подбору параметров для алгоритмов машинного обучения.

В качестве одного из основных параметров предлагается использовать высоты фронтальной поверхности. Предложен метод определения данных высот на основе анализа высотного распределения градиента температур. Для верификации использовались данные лидарных наблюдений, начиная с 2009 г., что подтвердило теоретические предположения о расположении нижней границы относительно границ атмосферных фронтов. Анализ распределения разницы между высотой фронтальной поверхности и нижней границы ОВЯ показал согласованность с существующими теориями [5]. Выявленная низкая частота совпадений высоты фронтальной поверхности (определенная экспериментальным и теоретическим способом) при использовании полиномиальных функций указывает на необходимость поиска более подходящих математических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-72-10127.

Список источников

1. Daniel S. Wilks. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences // Academic Press, International Geophysics, 2006. Vol. 100. P. 627. ISSN 0074-6142.

2. Liou K. N. Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes: A Global Perspective / K. N. Liou // Monthly Weather Review. 1986. Vol. 114, № 6. P. 1167–1199.

3. Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы и Томская ионосферная станция «ЛИДАР-ИОНОЗОНД». URL: https://ckprf.ru/usu/73573 (дата обращения: 21.06.2025).

4. Рыбакова Ж. В. Облака и их трансформация / науч. ред. И. В. Кужевская. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. 234 с.

5. Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey. Elsevier Academic Press.

I. M. Akimov[1], K. N. Pustovalov[2], O. I. Kuchinskaia[3], I. D. Bryukhanov[4]

[1, 2, 3, 4]National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

[1]ima8908@mail.ru, [2]const.pv@yandex.ru,

[3]olesia.kuchinskaia@cern.ch, [4]plyton@mail.tsu.ru

DETERMINATION OF THE FRONTAL SURFACE HEIGHT AT THE MOMENT OF HIGH-LEVEL CLOUDS REGISTRATION

Abstract. This study explores the possibility of determining the altitude of the frontal surface in the presence of high-level clouds. A method based on polynomial approximation of the dependence of the temperature gradient on altitude is proposed to identify the boundary, which enhances the accuracy and reliability of air mass boundary detection. Comparisons with existing theories confirm the effectiveness of the developed approach. The verification of the obtained results was carried out using experimental data from lidar atmospheric sensing. Solving this problem is important for improving weather forecast accuracy and deepening understanding of upper troposphere dynamics.

Keywords: high-level clouds, atmospheric front, machine learning tools, weather and climate forecasting

УДК 519.6

В. М. Белолипецкий[1], С. Н. Генова[2]
[1, 2]Институт вычислительной математики СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[1]belolip@icm.krasn.ru, [2]sv@icm.krasn.ru

ТОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ КРАСНОЯРСКА

Аннотация. Резкое возрастание концентраций загрязняющих веществ в приземном слое происходит в период возникновения температурных инверсий, препятствующих рассеиванию примесей по вертикали. Рассматривается точечная модель переноса примесей в приземном слое крупного города (на примере г. Красноярска) с использованием среднесуточных значений скоростей ветра из прогнозов погоды. Расчеты концентраций примеси над Красноярском согласуются с натурными измерениями.

Ключевые слова: температурная инверсия, приземный слой, концентрации примесей, точечная модель

Высокие концентрации загрязняющих веществ наблюдаются над крупными населенными пунктами. К наиболее загрязненным городам относится Красноярск. Существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере оказывают метеоусловия. Особый интерес представляют температурные инверсии. Температурная инверсия – повышение температуры воздуха с высотой вместо обычного понижения. Инверсия температуры препятствует вертикальным перемещениям воздуха и способствует образованию смога. Увеличение температуры в инверсионном слое колеблется от десятых долей градуса до 15–20 °С и более. Наибольшей мощностью обладают приземные инверсии температуры в зимний период.

Информация о наличии температурных инверсий необходима при определении потенциала атмосферы рассеивать загрязняющие вещества.

Резкое возрастание концентраций загрязняющих веществ происходит в период возникновения неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению в нижних слоях атмосферы промышленных, автомобильных выбросов и выбросов частного сектора. К таким неблагоприятным условиям относятся слабый ветер и инверсия. В приземном слое инверсии приводят к обострению неблагоприятной экологической ситуации территории, над которой она располагается. 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 [1–4].

© Белолипецкий В. М., Генова С. Н., 2025

В работе [5] для определения условий образования и разрушения температурной инверсии применяется упрощенная одномерная в вертикальном направлении математическая модель с использованием температуры воздуха и скорости ветра из прогнозов погоды.

Для исследования различных сценариев распространения загрязняющих веществ в атмосфере предлагается упрощенная точечная (нульмерная) модель. Упрощенная модель переноса примесей основана на одномерном уравнении диффузии с учетом горизонтального переноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial C}{\partial z} - V_a \frac{\partial C}{\partial x}, \qquad (1)$$

здесь $C(t, x, z)$ – концентрация примесей; t – время; z – вертикальная; x – горизонтальная координаты; K – коэффициент турбулентной вязкости; H – толщина слоя; V_a – скорость ветра. Граничные условия: на верхней границе $z = H$ и на подстилающей поверхности $z = 0$ заданы потоки примесей (Q_H и Q_0 соответственно):

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=0} = -Q_0, \; K_z \frac{\partial C}{\partial z}\bigg|_{z=H} = -Q_H \qquad (2)$$

начальное условие $C\big|_{t=0} = C^0(z)$.

Из проинтегрированного по вертикальной координате уравнения (1) в рассматриваемом слое и условий (2) следует:

$$\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} = \frac{Q_0 - Q_H}{H} - V_a \frac{\partial \hat{C}}{\partial x}, \qquad (3)$$

где $\hat{C}(t) = \frac{1}{H}\int_0^H C\,dz$ – средняя концентрация в рассматриваемом слое.

Из начального условия получаем $\hat{C}(0) = \frac{1}{H}\int_0^H C^0\,dz$. Дополнительные условия: $\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} \approx \frac{\partial C_0}{\partial t}$, $\frac{\partial \hat{C}}{\partial x} \approx \frac{\partial C_0}{\partial x}$.

Постановка задачи: краткосрочный прогноз аномального загрязнения приземного слоя атмосферы над Красноярском с использованием среднесрочного прогноза погоды (u^n – среднесуточные значения скоростей ветра на $N = 4$–10 суток вперед). Размерности: $[C] = [\hat{C}] = \frac{\text{мкм}}{\text{м}^3}$, $[Q_0] = \frac{\text{мкм}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$, $[C_q] = \frac{\text{мкм}}{\text{м}^3}$, $[u^n]$ = м/с, Δt = 1 сут.

Выбираются интервалы из N смежных среднесуточных значений скорости ветра $[u^1, u^2, \ldots, u^N]$, удовлетворяющих условиям $u^n < u^*$, $u^* = 1{,}5 - 1{,}7$ м/с.

С учетом уравнения (3) получены балансовые соотношения:

$$C^{n+1} = (C^n + C_q - \frac{C^n \cdot u^n}{2 \cdot u_{cr}}) / (1 + \frac{u^{n+1}}{2 \cdot u_{cr}}), \quad (4)$$

u_{cr} – средняя среднесуточная скорость ветра в рассматриваемом временном интервале

$$u_{cr} = (u^1 + u^2 + u^3 + ... + u^{N-1} + u^N) / N .$$

Для определения C_q используется формула, полученная из (4) при $n = 1$:

$$C_q = C^2 - C^1 + 0{,}5 \cdot (C^1 \hat{u}^1 + C^2 \hat{u}^2) / u_{cr} .$$

Численный алгоритм рассмотрим на примере.

Данные для периода 19.01.2024–28.01.2024, $N = 10$, $C^1 = 144{,}28$, $C^2 = 147{,}4$. Вычисляются средняя скорость ветра $u_{cr} = 0{,}326$, параметр модели $C_q = 101{,}5$ и сглаженные значения скоростей ветра $\hat{u}^n = (u^n + u^{n+1}) / 2$.

Концентрации примесей определяются по формулам (2). Использовались среднесуточные значения температуры воздуха, скорости ветра и PM2.5 по данным мониторинга состояния атмосферного воздуха г. Красноярска (*air.krasn.ru*). Результаты расчетов, представленные в табл. 1, согласуются с данными натурных измерений.

Таблица 1

Результаты расчетов

Дата	Ветер		Концентрация pm2.5	
	Среднесуточн.	Сглажен.	Измеренная	Рассчитанная
19 янв. 2024 г.	0,14	0,23	144.28	144.28
20 янв. 2024 г.	0,32	0,21	147.37	147.37
21 янв. 2024 г.	0,1	0,10	153.64	174.58
22 янв. 2024 г.	0,1	0,26	183.28	178.20
23 янв. 2024 г.	0,42	0,45	149.02	123.97
24 янв. 2024 г.	0,47	0,56	82.4	75.75
25 янв. 2024 г.	0,65	0,46	50.2	65.75
26 янв. 2024 г.	0,27	0,22	48.73	90.33
27 янв. 2024 г.	0,17	0,40	154.61	100.45
28 янв. 2024 г.	0,62	0,38	77.62	89.11
Среднее значение $C_{cr} = (C^1 + C^2 + ... + C^{N-1} + C^N) / N$			119,12	118,98

Заключение. Разработанная точечная модель позволяет с использованием среднесуточных значений скоростей ветра из прогнозов погоды оценить изменения среднесуточных концентраций примесей в атмосфере г. Красноярска на 4–10 суток вперед.

Список источников

1. 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.

2. 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. 1000–1006.

3. 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.

4. 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.

5. Белолипецкий В. М., Генова С. Н. Двухслойная параметризация температурной инверсии над городом Красноярском // 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. С. 156–159.

V. M. Belolipetskii[1], S. N. Genova[2]

[1, 2]Institute of Computational Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate division of the FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

[1]belolip@icm.krasn.ru, [2]sv@icm.krasn.ru

POINT MODEL OF CHANGES IN POLLUTANT CONCENTRATIONS IN THE SURFACE LAYER OF KRASNOYARSK

Abstract. A sharp increase in the concentration of pollutants in the ground layer occurs during the period of temperature inversions, as a result of which the impurities are dispersed vertically. A point model of impurity transfer in the ground layer of a large city (like Krasnoyarsk) is considered using average daily wind speeds from weather forecasts. Calculations of impurity concentrations over Krasnoyarsk are consistent with natural measurements.

Keywords: temperature inversion, surface layer, impurity concentrations, point model

УДК 528.837 : 629.78 : 621-83 : 517.938 : 004

С. А. Бронов[1], М. А. Вайман[2], Д. А. Никонов[3],
Д. Д. Кривова[4], А. В. Зазнобина[5], И. А. Заболотский[6]
[1, 2, 3] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[4, 5, 6] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;
nul-sapr@mail.ru

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Для систем моделирования прецизионных устройств, к которым относится в том числе аппаратура космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, предложены новые принципы построения, основанные на использовании моделей блоков с различной степенью детализации. В процессе моделирования осуществляется переключение с одной модели на другую в зависимости от режима работы: в некоторых режимах используются упрощенные модели, а в тех, где требуется высокая точность, детализированные и, следовательно, более сложные. Эти переключения синхронизируются с адаптивным выбором шага интегрирования, что обеспечивает уменьшение времени вычислений при сохранении высокой точности расчета.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, моделирование, системы автоматизированного проектирования

Введение. Моделирование является обязательной составляющей в процессе автоматизированного проектирования технических объектов, в том числе исполнительных устройств космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли [1]. В настоящее время существует большое число систем моделирования – как универсальных, так и специализированных. Универсальными можно считать программы *Matlab*, *MathCAD*, *Prime* (дальнейшее развитие *MathCAD*) и др. Специализированными являются программы моделирование процессов в электронных устройствах, механических конструкциях и т. п. Эти программы различаются в основном интерфейсом, библиотеками готовых моделей, процедурами разработки новых моделей и др. Такие системы моделирования имеют ряд недостатков [2], которые в данной работе предлагается устранить изменением архитектуры и принципов работы системы моделирования.

Все системы моделирования построены по одному и тому же принципу: математической основой являются системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которые решаются теми или иными методами численного интегрирования, реализованными в соответствующих подпрограм-

© Бронов С. А., Вайман М. А., Никонов Д. А., Кривова Д. Д., Зазнобина А. В., Заболотский И. А., 2025

мах (функциях). В зависимости от предметной области (электроника, механика и др.) могут использоваться различные способы формирования модели всего исследуемого устройства. Это может быть одна модель, которая включает в себя математические выражения всех блоков как единую систему уравнений. Может использоваться модульный принцип, в соответствии с которым каждый блок имеет свою математическую и реализующую ее программную модели, которые объединяются в процессе задания объекта, в результате чего создаются единые математические модели всего устройства. При этом связь между программными моделями осуществляется путем передачи данных с выходов одних программных моделей на входы других. Модульный принцип позволяет легко менять состав всего устройства, заменяя его отдельные блоки и сохраняя другие. Модульный принцип предполагает расчленение математической модели всего устройства на составные части и выявление связей между ними. В реальном устройстве все блоки могут быть связаны между собой без явного механического разделения. Например, электронные схемы могут располагаться на одной печатной плате, но состоять из отдельных узлов, которые можно представить себе в качестве отдельных блоков-модулей. Разделение общей модели на модели отдельных блоков связано в основном с особенностями математического описания: что является входом, выходом, внутренними переменными и параметрами.

Модульный принцип позволяет не только заменять один блок на другой (например, один тип электродвигателя на другой тип электродвигателя), но также менять модели одного и того же блока. Например, можно использовать источник питания электродвигателя в виде напряжения переменного тока или в виде устройства, формирующего широтно модулированные импульсы. В первом случае источник питания является весьма идеализированным, а во втором – более соответствующим реальному инвертору.

Кроме того, можно использовать различное число уравнений для отражения процессов в конкретном блоке. Можно пытаться учесть все протекающие процессы и записать большое число уравнений, а можно пренебречь некоторыми процессами и уменьшить число уравнений.

Современные системы моделирования позволяют всё это реализовать, но в них заложено общее ограничение: формировать исследуемую систему из отдельных блоков можно только перед началом моделирования.

Можно выбрать различные программные модели для одного и того же блока с различными математическими моделями, но в процессе моделирования состав моделей невозможно менять.

В то же время возможность изменять состав моделей в процессе расчетов может быть использована для повышения точности и скорости моделирования.

Работа систем моделирования оценивается в основном двумя показателями – погрешностью вычислений (точностью) и временем выполнения расчетов (скоростью вычислений). Основой вычислений являются методы численного интегрирования и алгоритмы их программной реализации.

Эффективность численных методов решения систем дифференциальных уравнений существенно зависит от размеров уравнений, входящих в них математических функций и численных значений параметров. В частности, используются такие взаимозависимые понятия, как жесткость дифференциальных уравнений и устойчивость их решения.

Под устойчивостью понимается свойство приближения найденного решения реальному процессу в объекте. А устойчивость связана с жесткостью уравнений. При численном решении систем дифференциальных уравнений задается шаг интегрирования, т. е. приращение по времени, при котором ищется следующая точка переходного процесса. Допустимый шаг зависит от вида и параметров дифференциальных уравнений. В некоторых случаях неправильно выбранный шаг интегрирования приводит к потере устойчивости, т. е. рассчитываемая кривая процесса не соответствует реальному. Шаг интегрирования влияет на процесс вычислений следующим образом. Большой шаг интегрирования уменьшает время вычислений, но снижает точность, так как некоторые процессы могут протекать быстро по сравнению с этим шагом. При наличии импульсов они могут вообще не фиксироваться системой моделирования, так как могут оказываться внутри шага интегрирования. При уменьшении шага интегрирования точность вычислений повышается и возможен учет всех быстро протекающих процессов, в том числе импульсных, но при этом время вычислений увеличивается.

Системы автоматического регулирования, реализуемые в устройствах для перемещения измерительной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, работают в различных режимах. Это может быть установившийся режим (например, при фиксации угла поворота или скорости перемещения измерительной аппаратуры), переход из одного установившегося режима в другой, непрерывное медленное плавное изменение регулируемой координаты (скорости, угла поворота), быстрое изменение, точное позиционирование и др. Причем эти режимы постоянно меняются и переходят один в другой. Это всё приводит к сложным процессам внутри исследуемого устройства, которые система моделирования должна воспроизвести.

В существующих системах моделирования используются методы численного интегрирования с адаптивным выбором шага. В режиме плавного изменения переменных выбирается сравнительно большой шаг, а в режиме быстрого изменения переменных – малый. В результате организуется подстройка величины шага к режимам работы. Но величина шага определяется также особенностями математических моделей. При наличии уравнений, отражающих быстрые процессы или импульсы, необходимо уменьшать шаг, но это приводит к увеличению времени вычислений.

В данной работе для управления процессом моделирования предлагается, наряду с изменением параметров численного интегрирования, использовать изменение структуры математических моделей. Фактически это может выглядеть как изменение самих моделей. При этом вводится понятие степени детализации моделей. Детализация означает учет малых процессов

и параметров с помощью дополнительных математических выражений, использование нелинейных функций, переменных коэффициентов, дифференциальных уравнений с малыми постоянными времени и т. п. Такая детализация необходима в моделях, отражающих процессы в прецизионных устройствах, к которым относится измерительная аппаратура космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Используемые в них исполнительные устройства на основе электроприводов различного типа должны иметь высокую точность позиционирования и перемещения некоторых специальных измерительных приборов, что связано с большим удалением их от поверхности Земли. В этом случае требуется обеспечить погрешности в несколько угловых минут и менее. При проектировании таких устройств требуется моделировать процессы с учетом таких погрешностей, что приводит к необходимости учета колебаний вала рабочего механизма из-за отклонения параметров питающих напряжений от номинальных, несимметрии параметров обмоток и т. д. При наличии датчиков угла поворота необходимо моделировать процессы в датчике с еще меньшей погрешностью, чем погрешность позиционирования. Возможно, при этом потребуется численное решение дополнительных алгебраических или дифференциальных уравнений.

Таким образом, в некоторых режимах работы прецизионных устройств совпадают два обстоятельства – повышение сложности моделей и появление быстрых процессов, включая импульсы. Оба обстоятельства увеличивают время вычислений иногда на 2–3 порядка.

В то же время легко заметить, что расчеты с малым шагом необходимы только вблизи точек прецизионного позиционирования, а при движении к этим точкам можно использовать увеличенный шаг интегрирования. Методы численного интегрирования с адаптивным выбором шага в какой-то степени справляются с этой задачей – подбора величины шага в зависимости от режима работы устройства. Но остается проблема детализированных (а потому сложных для вычисления) математических моделей.

Представляется целесообразным в режимах, не требующих высокой точности вычислений, использовать более простые модели, а при подходе к точкам прецизионного позиционирования переходить к более детализированным и, соответственно, более сложным моделям.

При этом возникает ряд вычислительных проблем, связанных с особенностями упрощения (усложнения) модели.

1. Упрощение за счет замены сложных алгебраических выражений более простыми при сохранении входных (задаваемых) и выходных (рассчитываемых) переменных. Это наиболее простая в реализации ситуация. В ее рамках все изменения происходят внутри модели. Например, вместо нелинейных функций могут использовать линейные и т. п. Важно, что связь между отдельными моделями не нарушается, так как входные и выходные переменные (и соответствующие им результаты текущих вычислений) остаются неизменными при замене одних моделей на другие.

2. Упрощение, связанное с изменением числа (и состава) входных или выходных переменных (или одновременно и тех и других). В этом случае возникает ряд математических проблем. Если происходит переход к упрощенной модели и уменьшается число выходных и входных переменных, то исчезающие переменные из исходной более сложной модели должны принять какие-то значения. Если происходит переход к более сложной детализированной модели, то появляются новые переменные, и они должны получить свои значения с учетом того, что до такого переключения эти значения отсутствовали. После переключения к программной модели с другой степенью детализации (с другой математической моделью) возможно обратное переключение к исходной модели. Таким образом, возможно появление и исчезновение значений некоторых переменных. Это необходимо учитывать на стадии разработки математических моделей отдельных блоков с разной степенью детализации.

Всё это создает ряд особенностей при реализации алгоритмов организации вычислений.

Основные пути решения заключатся в том, что при задании структуры исследуемого объекта необходимо включить в нее все виды моделей каждого блока, которые будут затем использоваться при вычислениях. В соответствии с наиболее сложной моделью каждого блока для него формируются массивы входных, выходных переменных, а также переменных состояния. Это создает запас по объему ожидаемых вычислений. Сам переход от одной модели к другой должен соответствовать режиму работы, который контролируется внутри программных моделей самих блоков с учетом информации извне. Модели разной степени детализации могут размещаться внутри одной программной модели для облегчения переключений между ними.

Заключение. Предложенный принцип создания системы моделирования с изменением состава блоков позволяет адаптировать процесс вычислений к режимам работы исследуемого устройства. При этом возникает ряд теоретических проблем, которые должны решаться при анализе конкретных моделей конкретных устройств. Это должно повысить точность и уменьшить время вычислений, что позволит в целом улучшить эффективность работы систем моделирования, созданных на основе предложенных принципов, в том числе при проектировании космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

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. Амбросенко Н. Д., Миндалев И. В., Титовская Н. В., Шевцова Л. Н. Цифровые образовательные модели и технологии: анализ возможностей и опыт применения //

Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. Красноярск, 2022. С. 12–15.

S. A. Bronov[1], M. A. Vayman[2], D. A. Nikonov[3],
D. D. Krivova[4], A. V. Zaznobina[5], I. A. Zabolotskiy[6]
[1,2,3] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
[4,5,6] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
nul-sapr@mail.ru

THE BASIC PRINCIPLES OF BUILDING AN ADAPTIVE SIMULATION SYSTEM FOR SPACECRAFT ACTUATORS FOR REMOTE SENSING ARE

Abstract. New design principles based on the use of block models with varying degrees of detail have been proposed for precision device modeling systems, which include the equipment of Earth remote sensing spacecraft. During the modeling process, switching from one model to another is carried out depending on the operating mode: in some modes, simplified models are used, and in those where high accuracy is required, detailed and, therefore, more complex. These switches are synchronized with the adaptive selection of the integration step, which reduces the calculation time while maintaining high calculation accuracy.

Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, modeling, computer-aided design systems

УДК 630*11:630*165:551.8(571.51)

А. А. Горошко[1], Д. А. Демидко[2], Д. И. Ликсонова[3], М. А. Масюк[4], Е. В. Филюшина[5], А. В. Хныкин[6]
[1, 2, 4, 5]Сибирский государственный университет им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
[3, 6]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
HYPERLINK "mailto:11111@mgpu.rusawer_beetle@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ ОЧАГОВ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА

Аннотация. Сибирский шелкопряд является одним из самых опасных вредителей таежных лесов Сибири. Уменьшить масштаб наносимого им ущерба можно, подавляя очаги его массового размножения до достижения популяциями шелкопряда максимума численности. Однако для этого необходимо ведение мониторинга на больших площадях и в труднодоступных районах, что невозможно реализовать на практике. Способом уменьшить площадь обследуемой территории является использование моделей, предсказывающих вероятное место и время появления очагов. Такие модели для южной тайги и подтайги Томской области и Красноярского края были разработаны с применением методов машинного обучения. В качестве предикторов положения очагов в пространстве использовали данные дистанционного зондирования Земли, описывающие теплообеспеченность участков, их положение в рельефе, растительность и расстояние от нарушенных древостоев. Для предсказания времени начала массового размножения лучшими предикторами были температурные характеристики вегетационного периода. Лучшие результаты показали модели, основанные на градиентном бустинге (алгоритм *XGBoost*). Площадь под кривой (*ROC-AUC*) и точность (*accuracy*) для них были на уровне 0,9, что позволяет при их использовании кардинально оптимизировать планирование мониторинга численности сибирского шелкопряда.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, прогнозирование массовых размножений, градиентный бустинг

Сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus,* Tschetverikov, 1908) известен как наиболее опасный дефолиатор сибирских и дальневосточных лесов. Из древесных растений, повреждаемых им в Сибири (пихта сибирская, кедр сибирский и разные виды лиственниц), первые два переносят потерю хвои особенно тяжело. Дефолиация от 50 % и более, как правило, приводит к гибели древостоев [1; 2]. При этом в равнинных лесах южной тайги Сибири площадь наносимых им повреждений в ходе вспышки массового размножения может превышать 1 млн га [2; 3].

Масштаб ущерба, наносимого сибирским шелкопрядом, может быть снижен при своевременном подавлении роста его численности. Этому, однако, мешает сложность своевременного обнаружения формирующихся очагов, связанная с низкой освоенностью находящейся под угрозой территории. В регионах Сибири, сильнее всего страдающих от повреждения

© Горошко А. А., Демидко Д. А., Ликсонова Д. И., Масюк М. А., Филюшина Е. В., Хныкин А. В., 2025

D. sibiricus кедровых и пихтовых лесов (Красноярский край и Томская область), их площадь в сумме достигает почти 18 млн га [4]. Плотность же автодорог в этих регионах составляет 0,0137 и 0,0360 км на 1000 км^2 [5].

Экологическая ниша сибирского шелкопряда очерчена достаточно четко. Так, характеристики лесов, находящихся под угрозой повреждения этим видом, достаточно подробно описаны А. С. Исаевым и В. Я. Ряполовым [6]. Теоретически это позволяет выделить участки, для которых риск появления очагов *D. sibiricus* максимален, и там вести надзор за его популяциями. Но на практике точные сведения о таксационных признаках древостоев при обследовании больших территорий получить невозможно, что заставляет обращаться к использованию дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [7].

Другой аспект составления прогнозов массовых размножений вредителей леса, в том числе сибирского шелкопряда, заключается в предсказании времени нанесения повреждений. Из теорий, которые описывают влияние внешних факторов на динамику численности лесных насекомых (паразитарная, алиментарная, погодная) [8] наиболее практичной является последняя. Ранее предполагали, что нарастание численности популяций этого филлофага следует за периодами с засушливой погодой [2]. Длительный период наблюдений показал, что, несмотря на отдельные успешные случаи прогноза [2], результаты применения этого подхода неустойчивы [9]. Достигнуть лучших результатов возможно за счет применения как более современных подходов к прогнозированию, так и ранее не использованных признаков погоды из их обширного перечня [10].

Таким образом, целью наших исследований стала разработка методов локализации очагов массового размножения сибирского шелкопряда как в пространстве, так и во времени, а также создание на основе полученных результатов автоматизированной системы прогнозирования.

Модельной территорией для разработки системы предсказания риска появления очагов сибирского шелкопряда на данном участке было выбрано Енисейское лесничество (Красноярский край). Эта территория сильно пострадала от последнего массового размножения сибирского шелкопряда [3]. Исходными данными для моделирования служили созданные по материалам ДЗЗ карта лесной растительности [11], карта изменений лесного покрова [12], индексы *CHILI* (*continuous heat-insolation load index*) и *mTPI* (*multi-scale topographic position index*) [13]. Последние две характеристики описывают, соответственно, тепловой баланс территории и ее положение в рельефе.

Лучшая модель риска возникновения первичных очагов *D. sibiricus* была создана с помощью алгоритма *XGBoost* [14] (*ROC-AUC* на тестовой выборке 0,91). Из предикторов наибольшее значение имеет расстояние до нарушенных лесных участков (риск максимален при дистанции ~5 км). Вклад других предикторов был меньше, но также существенен: на увеличение риска дефолиации указывали возрастание доли темнохвойных пород

в древостое, умеренная теплообеспеченность и расположение на повышенных формах рельефа [15].

Разработка метода прогноза времени начала массовых размножений сибирского шелкопряда была основана на представлении о зависимости изменений его численности от погоды. Исходными данными были сведения о вспышках *D. sibiricus*, собранные для Красноярского края и Томской области с конца XIX в. [2; 13]. Результаты наблюдений за погодой получены из базы данных ВНИИГМИ-МЦД для 14 метеостанций. Для оптимизации использования вычислительных ресурсов из массива потенциальных предикторов (характеристик погоды) с помощью факторного анализа для смешанных данных предварительно были выбраны наиболее тесно связанные с повреждением шелкопрядом.

Лучшие результаты, как и для предыдущей задачи, были получены с помощью *XGBoost*. Точность (*accuracy*) прогнозирования для тестовой выборки составила 0,896 при ошибке во времени начала массового размножения ±1 год. Ранее считали, что на вспышки сибирского шелкопряда наиболее сильное влияние оказывают засухи [2]. Нами было показано, что наиболее тесную связь со вспышками имеют температурные характеристики мая – сентября за 4–5 лет до появления первых очагов. При этом негативное влияние на вероятность подъема численности оказывают отклонения от оптимальных значений как в меньшую, так и в большую сторону [10].

Разработанные модели были положены в основу автоматизированной системы прогнозирования массовых размножений сибирского шелкопряда. ПО имеет клиент-серверное исполнение. Клиентская часть, разработанная на основе *Quantum GIS*, предназначена для работы в браузере. Она обозначает на карте ближайшие окрестности метеостанций, на которых появление очагов возможно в данном году, а в пределах этих территорий маркирует участки с наибольшим риском повреждения. Серверная часть, помимо моделей, состоит из базы данных на основе *PostgreSQL*, которая хранит входящую информацию, результаты работы моделей и передает необходимые данные в клиентскую часть.

Список источников

1. Деградация древостоев в таежных шелкопрядниках / Д. Л. Гродницкий, В. Г. Разнобарский, В. В. Солдатов, Н. П. Ремарчук // Сиб. экол. ж. 2002. Прил. 1. С. 3–12.

2. Кондаков Ю. П. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири : сб. трудов. Новосибирск : Наука, 1974. С. 206–265.

3. Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range / V. I. Kharuk, S. T. Im, K. J. Ranson, M. N. Yagunov // Forests. 2017. V. 8. Iss. 8. P. 301.

4. Алексеев В. А., Связева О. А. Древесные растения лесов России. Красноярск : Институт леса им. В. Н. Сукачева, 2009. 182 с.

5. Федеральная служба государственной статистики. Транспорт. URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/transport (дата обращения: 03.09.2024).

6. Исаев А. С., Ряполов В. Я. Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами : сб. тр. Новосибирск : Наука, 1979. С. 152–167.

7. Predictive Model for Bark Beetle Outbreaks in European Forests / Á. Fernandez-Carrillo, A. Franco-Nieto, M. J. Yagüe-Ballester, M. Gómez-Giménez // Forests. 2024. V. 15. Iss. 7. P. 1114.

8. Популяционная динамика лесных насекомых / А. С. Исаев [и др.]. М. : Наука, 2001. 373, с.

9. Тарасова О. В., Волков В. Е. Влияние погодных условий на развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда в Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2021. № 5. С. 49–59.

10. Опыт прогнозирования массовых размножений сибирского шелкопряда Dendrolimus sibiricus Tschetv. по метеоданным / Д. А. Демидко, А. А. Горошко, С. М. Сультсон, Н. Н. Кулакова, П. В. Михайлов // Сиб. экол. журн. 2024. № 3. С. 427–443.

11. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев [и др.]. М. : Институт космических исследований РАН, 2016. 208 с.

12. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen [et al.] // Science. 2013. Iss. 342. P. 850–853.

13. Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine / Q. Zhao, L. Yu, X. Li, D. Peng, Y. Zhang, G. Peng // Remote Sens. 2021. V. 13. Iss. 18. P. 3778.

14. XGBoost Documentation. URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/ (дата обращения: 12.09.2024).

15. Risk Modeling for the Emergence of the Primary Outbreak Area of the Siberian Moth Dendrolimus sibiricus Tschetv. in Coniferous Forests of Central Siberia / A. A. Goroshko [et al.] // Forests. 2025. V. 16. Iss. 1. P. 160.

A. A. Goroshko[1], D. A. Demidko[2], D. I. Liksonova[3],
M. A. Masyuk[4], E. V. Filyushina[5], A. V. Khnykin[6]
[1, 2, 4, 5]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
[3, 6]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
HYPERLINK "mailto:11111@mgpu.rusawer_beetle@mail.ru

PREDICTION OF SIBERIAN SILK MOTH OUTBREAKS

Abstract. Siberian silk moth is one of most harmful pests of Siberian taiga forests. To reduce the extent of its damage it is possible control its populations before they reach the maximal density. But it requires monitor the huge and remote territores and it is unrealistic. The way to reduce the monitored territory is usage of models to predict possible time and coordinates of outbreak foci. We have developed such machine learning models for southern taiga and subtaiga of Tomsk oblast and Krasnoyarsk krai. As predictors of outbreak coordinates we used the remote sensing data about heat balance, relief, vegetation type and distance from disturbed stands. To predict the time of outbreak start the better predictors are temperatures of vegetation period. The better models are based on gradient boosting (XGBoost). ROC-AUC and accuracy values are ca. 0,9. It is allow us to radically optimize the monitoring of Siberian silk moth populations.

Keywords: Siberian silk moth, outbreak prediction, gradient boosting

УДК 528.873

М. Ю. Грищенко[1], В. А. Фурунжиева[2]
[1, 2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[1] Государственный природный заповедник «Курильский», Южно-Курильск, Россия
[1]m.gri@geogr.msu.ru

ЛЕСНЫЕ И ТУНДРОВЫЕ РАСТИТЕЛЬНЫЕ СООБЩЕСТВА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Аннотация. Настоящая работа посвящена дешифрированию лесных и тундровых сообществ Дальнего Востока по тепловым космическим снимкам со спутников *Landsat-8, -9* на примере ключевых участков на о. Кунашир (Курильские о-ва) и п-ове Дауркина (Чукотский п-ов). В ходе работы проведены корреляционный анализ показателей *NDVI* и *LST*, неконтролируемая классификация тепловых разносезонных космических снимков, сопоставлены результаты контролируемой классификации многозональных снимков в оптическом диапазоне и снимков, составленных из зеленого, красного и теплового каналов. Результаты классификаций сопоставлены с тематическим картами. В результате исследования статистической связи между *NDVI* и *LST* не выявлено. Определено, что эффективность использования тепловых снимков для дешифрирования растительных сообществ максимальна при дешифрировании лесных и горных территорий.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, географическое дешифрирование, *Landsat*, Кунашир, Чукотский полуостров

Введение. Актуальность дешифрирования растительного покрова по космическим снимкам едва ли подлежит сомнению. Растительный покров является одним из наиболее физиономичных компонентов природно-территориальный комплексов и может быть дешифрирован по космическим снимкам различных спектральных диапазонов, среди которых тепловой. Использование тепловых космических снимков для изучения растительного покрова уже доказало свою эффективность [1]. В частности, исследования показывают, что разные растительные сообщества характеризуются разной сезонной изменчивостью теплового излучения [2], а также выявлена дифференциация тепловых и излучательных характеристик растительных сообществ в разных природно-климатических условиях [3]. Целью настоящей работы является оценка применимости различных методик дешифрирования растительного покрова с использованием тепловых космических снимков. Работа выполнена на ключевых участках на о. Кунашир (Курильские о-ва) и на п-ове Дауркина (Чукотский п-ов). Разнообразие природных условий и характеристик растительного покрова на ключевых участках обеспечивает широкий географический охват нашего исследования.

Материалы и методы. На о. Кунашир выделено два ключевых участка, значительно отличающихся по растительному покрову. Северный

© Грищенко М. Ю., Фурунжиева В. А., 2025

ключевой участок на острове Кунашир ограничен следующими координатами: с севера – 44°17′ с. ш., с юга – 44°15′ с. ш., с востока – 146°07′ в. д., с запада – 146°04′ в. д. Этот участок представляет собой подгорную равнину с небольшими перепадами высот, не превышающими 100 м. Преобладающая растительность – леса и редколесья из ели Глена (*Picea glehnii*) и пихты сахалинской (*Abies sachalinensis*). Приуроченность ключевого участка к тихоокеанскому побережью Кунашира, для которого характерны большая относительная влажность и меньшее количество солнечных дней, определяет более широкое распространение бореальных элементов в сообществах этого участка. Южный ключевой участок на острове Кунашир расположен в пределах координат: с севера – 43°55′ с. ш., с юга – 43°53′ с. ш., с востока – 145° в. д., с запада – 144°57′ в. д. Эта территория имеет более сложный и пересеченный рельеф с перепадами высот до 300 м. В отличие от описанного выше ключевого участка, этот находится на охотоморском побережье острова, более сухом и солнечном. Растительный покров представлен, главным образом, лесами, характеризующимися богатыми видовым разнообразием, в которых доминируют пихта сахалинская (*Abies sachalinensis*) и береза Эрмана (*Betula ermanii*). Хозяйственная деятельность на рассматриваемых участках минимальна.

На Чукотском п-ове выбран один участок, ограниченный следующими координатами: с севера – 65°40′ с. ш., с юга – 65°24′с. ш., с востока – 171°02′ з. д., с запада – 170°11′ з. д. Эта тундровая зона находится в области распространения многолетнемёрзлых пород и расположена вблизи сел Лорино и Лаврентия, население которых составляет около 600 и 300 человек соответственно. Рельеф участка представлен южными отрогами хребта Гэнканый (Тенианый), для которого характерна высотная поясность геосистем (гольцы, горные тундры), а также равнинными участками, в пределах которых распространены различные тундры: кустарничковые, осоковые, моховые. Суровый арктический климат оказывает значительное влияние на растительный покров данной территории.

В представленном исследовании использованы тепловые снимки со спутников *Landsat-8* и *Landsat-9*, разработанных Национальным управлением по исследованию космического пространства США (*NASA*). Спутники производят съемку с помощью сенсоров *OLI* и *TIRS*; первый ведет съемку в видимом, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах спектра (пространственное разрешение 30 м), второй – в тепловом (пространственное разрешение 100 м).

В качестве источника детальной тематической информации о растительном покрове ключевых участков в нашей работе использованы карты растительного покрова, составленные по результатам детальных полевых обследований [4–6].

Для оценки применимости тепловых снимков для дешифрирования растительных сообществ ключевых участков использовано три методики. Из научной литературы известна выраженная обратная корреляция между значениями нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI*

и значениями температуры земной поверхности *LST* [7]. По космическим снимкам в красном и ближнем инфракрасном диапазонах рассчитан *NDVI*, а по снимкам в тепловом диапазоне – *LST*, затем между показателями построена линейная корреляция. Вторая методика – дешифрирование многовременных разносезонных тепловых космических снимков; составлены снимки на ключевые участки, к составленным снимкам применен метод неконтролируемой классификации *ISODATA*, результаты сопоставлены с тематическими картами. Третья методика заключается в сопоставлении результатов контролируемой классификации многозональных снимков в оптическом диапазоне (зеленый, красный и ближний инфракрасный каналы) и многозональных снимков, составленных из зеленого, красного и теплового канала; результаты классификации сопоставлены с тематическими картами.

Результаты. Расчет линейной корреляции не выявил статистически значимой связи между *LST* и *NDVI*. Это, вероятно, связано не столько с ограничениями глобальных моделей, сколько с особенностями исследуемых территорий. Небольшой размер участков приводит к тому, что локальные факторы, определяющие пространственную дифференциацию теплового поля и интенсивность вегетации (например, тип почвы, рельеф, близость водоемов, режим увлажнения и другие элементы геосистемы), играют доминирующую роль, нивелируя потенциальное влияние глобальных процессов. Таким образом, изменения температуры земной поверхности и состояния растительности на исследуемых участках в большей степени определяются этими уникальными местными условиями.

Результаты указывают на то, что метод линейной корреляции между *LST* и *NDVI* может быть недостаточно эффективным для количественной оценки информации о растительном покрове, предоставляемой тепловым каналом на данных участках. Возможно, это связано с недостаточным размером участков для выявления устойчивой связи между этими показателями. Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода к исследованию геосистем, требующего учета не только общих закономерностей, но и специфических локальных условий, влияющих на растительный покров в конкретных регионах.

Метод неконтролируемой классификации тепловых разносезонных снимков демонстрирует различную эффективность в зависимости от характеристик территории и структуры растительного покрова. Наиболее успешно метод сработал на южном участке о. Кунашир, где преобладает низкогорный рельеф, позволяя с высокой достоверностью выделить доминирующие растительные сообщества, такие как каменноберезовые бамбуковые и каменноберезово-пихтовые леса. Напротив, на северном участке Кунашира, характеризующемся равнинным рельефом, где преобладают еловые бамбуковые леса, метод оказался менее эффективным, и установить однозначные соответствия между полученными кластерами и растительными сообществами не удалось. Ситуация на ключевом участке Чукотского

п-ова представляется особой. Доминирующим сообществом являются кочкарные осоково-кустарничковые тундры, которые не выделились в отдельные кластеры, а распределились по всем кластерам, что указывает на низкую чувствительность метода к слабоконтрастным различиям в тундровых геосистемах. Однако введение снимков со снежным покровом несколько улучшило результаты анализа: удалось выявить гольцы и горные тундры, особенно на склонах. Тем не менее в целом по Чукотскому п-ову метод не позволил достичь выраженной дифференциации, особенно на равнинах. Таким образом, можно сделать вывод о том, что этот метод наиболее эффективен в низкогорных районах, таких как юг Кунашира, где растительные сообщества характеризуются высокой контрастностью и тесно связаны с рельефом. На равнинных территориях, включая север Кунашира, эффективность данного метода существенно снижается. Введение зимних снимков может способствовать улучшению результатов, однако не решает проблему полностью. Ключевой участок, расположенный на Чукотском п-ове, также демонстрирует данную закономерность: результаты неконтролируемой классификации позволяют выявить более высокую дифференциацию горных ландшафтов по сравнению с равнинными.

Анализ результатов контролируемой классификации многозональных снимков также выявил, что эффективность использования теплового канала существенно зависит от рельефа местности, однако зависимость в данном случае иная. В условиях сложного рельефа и разнообразной экспозиции склонов, таких как на южном участке о. Кунашир, тепловой канал подчеркивает экспозиционные различия, что не всегда соответствует реальной дифференциации растительных сообществ. Однако в более однородных условиях (как на северном участке о. Кунашир), он может улучшать результат классификации. На ключевом участке Чукотского п-ова, несмотря на наблюдаемую тенденцию к выделению гольцов, влияние теплового канала на выделение растительных сообществ остается неопределенным. Это свидетельствует о неоднозначной эффективности данного метода в условиях данного региона. Таким образом, решение об использовании теплового канала должно быть основано на тщательном анализе характеристик исследуемой территории и поставленных задач.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило значимость теплового канала при анализе растительных сообществ, особенно в контексте дешифрирования лесных территорий. Это связано с тем, что лесные сообщества оказывают существенное влияние на локальный климат и тепловое излучение по сравнению с растительностью тундровых ландшафтов. Эффективность использования теплового канала во многом зависит от рельефа и локальных условий территории. Особенности рельефа, такие как амплитуда высоты и экспозиция склонов, существенно влияют на распределение температур и, следовательно, на характеристики мест обитания различных растительных сообществ. Однако более однородные условия могут затруднить детальную интерпретацию полученных данных.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121051400061-9.

Список источников

1. Neinavaz E., Gharehchopogh F. F., Shokouhian M., Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. Vol. 102. No. 102415.

2. Грищенко М. Ю., Балдина Е. А. Исследование возможностей применения снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для создания тематических карт // Вопросы географии. Т. 144. Картография в цифровую эпоху. М. : ИД «Кодекс». 2017. С. 358–375.

3. Грищенко М. Ю., Лучер Д. А., Бочарников М. В. Оценка возможности дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам на примере Южного Урала и Кузнецкого Алатау // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 496–507.

4. Грищенко М. Ю., Жданова Е. Ю., Ивлева Т. Ю. Изучение и картографирование растительного покрова южной части острова Кунашир (Курильские острова) в крупном масштабе // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. Т. 65. № 6. С. 647–654.

5. Grishchenko M. Y., Grigoryan A. G., Aldoshin I. A., Lipovetskaya M. A., Krylova A. A., Podgornyi O. M. Studying and mapping natural complexes of the piedmont plain of the Dokuchaev ridge (Kunashir island, Great Kuril ridge) // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 555. P. 01002.

6. Maslakov A., Grischenko M., Grigoryan A., Zamolodchikov D. Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi peninsula (Russian northeast) // Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA. 2024. Vol. 3. No. 74. P. 291–309.

7. Sun D., Kafatos M. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. No. 24. P. 2007GL031485.

M. Y. Grishchenko[1], V. A. Furunzhiyeva[2]

[1,2] Lomonosov MSU, Faculty of Geography, Moscow, Russia

[1] State nature reserve “Kurilskiy”, Yuzhno-Kurilsk, Sakhalinskaya oblast, Russia

[1]m.gri@geogr.msu.ru

FOREST AND TUNDRA PLANT COMMUNITIES OF THE FAR EAST ON THERMAL SATELLITE IMAGES

This work is devoted to the interpretation of forest and tundra communities of the Far East based on thermal satellite images from Landsat 8-9 satellites using the example of key areas on Kunashir Island (Kuril Islands) and the Daurkin Peninsula (Chukotka Peninsula). A correlation analysis of NDVI and LST indicators was carried out, an unsupervised classification of thermal multi-seasonal satellite images was carried out, the results of the supervised classification of multi-spectral images in the optical range and images composed of green, red and thermal channels were compared. The classification results were compared with thematic maps. As a result of the study, no statistical relationship was revealed between NDVI and LST. It was determined that the efficiency of using thermal images for interpreting plant communities is maximum when interpreting forest and mountain areas.

Keywords: thermal satellite images, geographical interpretation, Landsat, Kunashir, Chukchi peninsula

УДК 519.24

Б. С. Добронец[1], А. Р. Кемельбаева[2]
[1, 2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]bdobronets@yandex.ru, [2]kemelbaevaar@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭРМИТОВЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ СПЛАЙНОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

Аннотация. Распределительная регрессия позволяет моделировать не только среднее значение, но и полное распределение целевой переменной. В статье представлен метод вычислительного вероятностного анализа, в котором данные представляются в виде функций распределений. Предложен подход к аппроксимации плотности ошибок с использованием эрмитовых сплайнов пятой степени и метода наименьших квадратов, эффективный при сложных формах распределений.

Ключевые слова: распределительная регрессия, вычислительный вероятностный анализ, эрмитовы сплайны, метод наименьших квадратов

Традиционные регрессионные методы фокусируются на оценке условного математического ожидания. Однако для точного моделирования сложных систем, например, таких как климатические процессы, необходимо учитывать всю структуру распределения $Y \mid X$, включая дисперсию и хвостовые характеристики. Распределительная регрессия решает эту задачу, моделируя параметры распределения как функции от предикторов X.

Подходы, такие как *GAMLSS*, работают с параметрическими распределениями, а символьный анализ данных ограничен гистограммами [1]. Функциональный анализ данных (*FDA*) использует функциональный метод главных компонент (*FPCA*) [5], но не гарантирует неотрицательность и нормирование плотностей. Вычислительный вероятностный анализ (ВВА) предлагает альтернативу, основанную на кусочно-полиномиальных моделях, что делает его особенно подходящим для задач дистанционного зондирования, где данные содержат значительные неопределенности.

Вычислительный вероятностный анализ. Вычислительный вероятностный анализ – это методология численного моделирования, ориентированная на работу с данными, содержащими неопределенности [2]. Отличительной особенностью ВВА является оперирование функциями распределения, которые описывают вероятностную природу входных и выходных параметров.

Основные элементы ВВА:

– численные арифметики для плотностей вероятности;

– вероятностные расширения;

– анализ неопределенностей.

© Добронец Б. С., Кемельбаева А. Р., 2025

Модель регрессии в пространстве распределений имеет вид:

$$Y = f\left(X\right) + \varepsilon, \tag{1}$$

где f отображает распределения X в распределения Y, а ε – ошибка модели.

ВВА работает над кусочно-полиномиальными функциями, которые определяются сеткой ω

$$\omega = \left\{-\infty, x_0\ , x_1\ , \ldots , x_n\ , \infty\right\}, \tag{2}$$

где x – это полиномиальное выражение, которое может быть представлено: кусочно-постоянной функцией (гистограммы), кусочно-линейной функцией (частотный полигон), сплайном, обобщенной кусочно-полиномиальной функцией [4].

Для построения регрессии от их параметров необходимо приведение к некоторому стандартному шаблону, затем строить регрессии. Кусочно-полиномиальные функции x_i и сетки ω_i преобразуем с помощью специального отображения $S(t)$, а затем с помощью обратного отображения переходим в исходное состояние.

Для аппроксимации используются три базисные функции Эрмита:

– $\varphi_0\left(x\right)$ – значение функции в узле;

– $\varphi_1\left(x\right)$ – первая производная;

– $\varphi_2\left(x\right)$ – вторая производная.

Аппроксимирующая функция:

$$S\left(t\right) = \Sigma_{j=1}^{m} a_j \cdot \varphi_{j(t)}, \tag{3}$$

где коэффициенты a_j определяются методом наименьших квадратов путем минимизации функционала ошибки:

$$E = \Sigma_{i=1}^{n} \left(y_i - S\left(x_i\right)\right)^2 \to \min, \tag{4}$$

где (x_i, y_i) – исходные данные; n – количество точек.

Аппроксимация температур методом наименьших квадратов. Для апробации метода была построена аппроксимация распределения температур за 1960 г. в Красноярске. Для построения сплайновой аппроксимации функции плотности вероятности f на первом этапе использовались ядерные оценки с параметром $h = 1$. Для разбиения данных на интервалы заданы узлы сетки $\omega = \left\{-22, -2, 5, 25, 39\right\}$.

В результате применения метода наименьших квадратов с базисными функциями Эрмита пятой степени была получена гладкая кривая, аппроксимирующая исходные данные. На рис. 1 представлен результат аппроксимации (красная линия). Кривая демонстрирует плавное изменение значений, сохраняя непрерывность как самой функции, так и ее первых и вторых производных на границах интервалов.

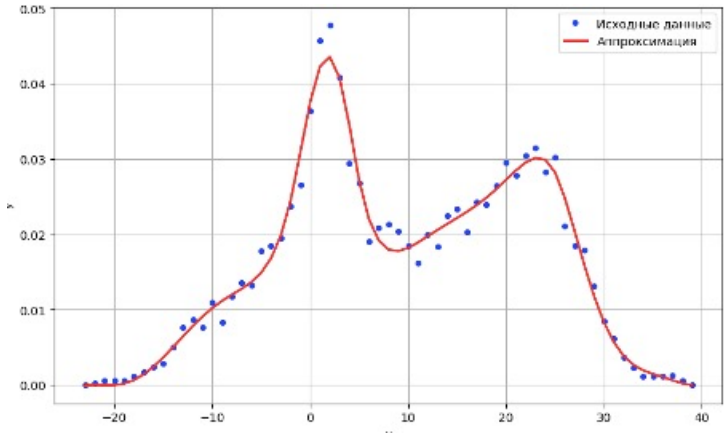


Рис. 1. Аппроксимация данных методом наименьших квадратов

Предложенный метод на основе ВВА и эрмитовых сплайнов эффективен для построения регрессионных моделей в пространствах распределений, что критически важно для анализа данных дистанционного зондирования, содержащих неопределенности. Метод обеспечивает высокую точность аппроксимации, гибкость и устойчивость. Перспективы включают его применение к многомерным спутниковым данным.

Список источников

1. Billard L., Diday E. Symbolic Data Analysis: Conceptual Statistics and Data Mining. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

2. Добронец Б. С., Попова О. А. Вычислительный вероятностный анализ: модели и методы. Красноярск : СФУ, 2020.

3. Rigby R. A., Stasinopoulos D. M. Generalized additive models for location, scale and shape // Journal of the Royal Statistical Society: Series C. 2005.

4. Добронец Б. С., Попова О. А., Кемельбаева А. Р. Новые подходы в регрессионном анализе данных // Информатизация и связь. 2022.

5. Yoshiyuki A. A Functional Linear Regression Model in the Space of Probability Density Functions // RIETI. 2017.

B. S. Dobronets[1], A. R. Kemelbaeva[2]
[1, 2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1]bdobronets@yandex.ru, [2]kemelbaevaar@gmail.com

USING HERMITIAN SMOOTHING SPLINES IN DISTRIBUTIONAL REGRESSION

Abstract. The article proposes an approach to approximating the error density using Hermitian splines and the least squares method, which is effective for complex distributions.

Keywords: distributional regression, computational probability analysis, Hermitian splines, least squares method

УДК 504.064, 528.854

В. К. Дубинина[1], Д. М. Ермаков[2]
[1] Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
[2] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]vkdubinina@edu.hse.ru

ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВОДНОГО ЗЕРКАЛА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *GOOGLE EARTH ENGINE* НА ПРИМЕРЕ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Аннотация. Одной из актуальных задач дистанционного зондирования является выделение границ водных объектов по спутниковым снимкам. К наиболее распространенным методам относятся использование мультиспектральных водных индексов и тематическая классификация изображений. Однако зачастую дешифрирование водного зеркала осложняется изменением отраженных яркостей от акваторий различных водоемов в связи с выносом речных наносов, загрязнением или цветением. Целью данной работы является разработка алгоритма выделения областей открытой воды по данным спутника *Sentinel-2*. В качестве объекта исследования выбрано Камское водохранилище (Пермский край), которое находится в зоне влияния ликвидированного Кизеловского угольного бассейна и подвержено загрязнению тяжелыми металлами кислых шахтных вод. Работа выполнена на платформе *Google Earth Engine.*

Ключевые слова: поверхность водного зеркала, дистанционный мониторинг, Камское водохранилище, Sentinel-2, Google Earth Engine

Введение. Существенная проблема многих традиционных подходов, основанных на применении различных водных индексов, заключается в том, что воды с высокой концентрацией загрязнений могут резко менять свои оптические характеристики в красной и инфракрасной области спектра в связи с ростом рассеяния на частицах взвеси. Это, в частности, характерно для Камского водохранилища, подверженного спорадическому влиянию стоков кислых шахтных вод.

Камское водохранилище расположено в пределах ликвидированного угледобывающего комплекса – Кизеловского угольного бассейна. Комплекс прекратил работу в начале 2000-х гг., после чего шахты были закрыты и прекращена откачка шахтных вод. С восстановлением уровня грунтовых вод образовался сток кислой шахтной воды с высокой концентрацией железа, алюминия и ряда тяжелых металлов [1]. Самыми загрязненными притоками Камского водохранилища являются реки Яйва, Косьва, Чусовая и Северная Вильва. Кроме того, в августе экологическая ситуация осложняется цветением воды.

Материалы и методы. С целью выделения водной поверхности Камского водохранилища на платформе анализа геопространственных данных *Google Earth Engine (GEE)* были составлены многоканальные медианные

© Дубинина В. К., Ермаков Д. М., 2025

изображения за разные даты. Для проведения границы «суша – вода» были использованы значения красного (*Red*), а также ближнего (*NIR*) и коротковолнового (*SWIR*) инфракрасного каналов.

Основная идея метода состоит в учете динамики распространения загрязнений. Формируется достаточно длинная последовательность безоблачных изображений Камского водохранилища. Для этих изображений рассчитываются по одному или нескольким критериям предварительные маски воды (с возможными дефектами в местах сильных загрязнений). Далее специальной итерационной процедурой над последовательностью масок воды, привязанных к различным моментам времени наблюдений, осуществляется принятие окончательного решения, назначающего каждому пикселю признак «вода» или «суша». Осуществляется своего рода «голосование» масок в пользу того или иного решения. Простейшим критерием присвоения признака «вода» данному пикселю может быть принадлежность этого пикселя хотя бы к одной маске воды в анализируемой последовательности. Этот метод хорошо работает для внутренних областей водоема, однако может давать ошибки в случае сильной динамики (в том числе сезонной) береговых линий. Усовершенствованные варианты методики принятия решения могут включать требования преодоления минимального порога голосов для каждого пикселя, получения хотя бы одного голоса в каждый из периодов сезонного цикла, а также более сложные правила, зависящие от близости суши.

Результаты и обсуждение. В работе продемонстрированы некоторые результаты применения методики к исследованию Камского водохранилища. Показаны ограничения подхода, связанные с простым расчетом водного индекса (рис. 1, *а*), в сопоставлении с предложенным подходом (рис. 1, *б*). Для выделенной области водного зеркала, соответствующей построенной маске воды, рассчитан индекс кислых шахтных вод (*AMWI*).

Полученная маска может быть использована для повышения точности расчета водных индексов на территорию водохранилища. Одним из примеров является индекс *AMWI,* который применяется для детектирования и оценки уровня загрязненности пресных водоемов изливами кислых шахтных вод [2]. Основная проблема его использования заключается в том, что диапазоны значений индекса для областей загрязненной воды и некоторых участков суши существенно перекрываются, поэтому необходимо сначала построить маску водных объектов [3].

Построенные изображения индекса *AMWI* позволяют проанализировать процесс излива кислых шахтных вод в Камское водохранилище из притоков и дальнейшее распространение загрязнений вдольбереговыми течениями.

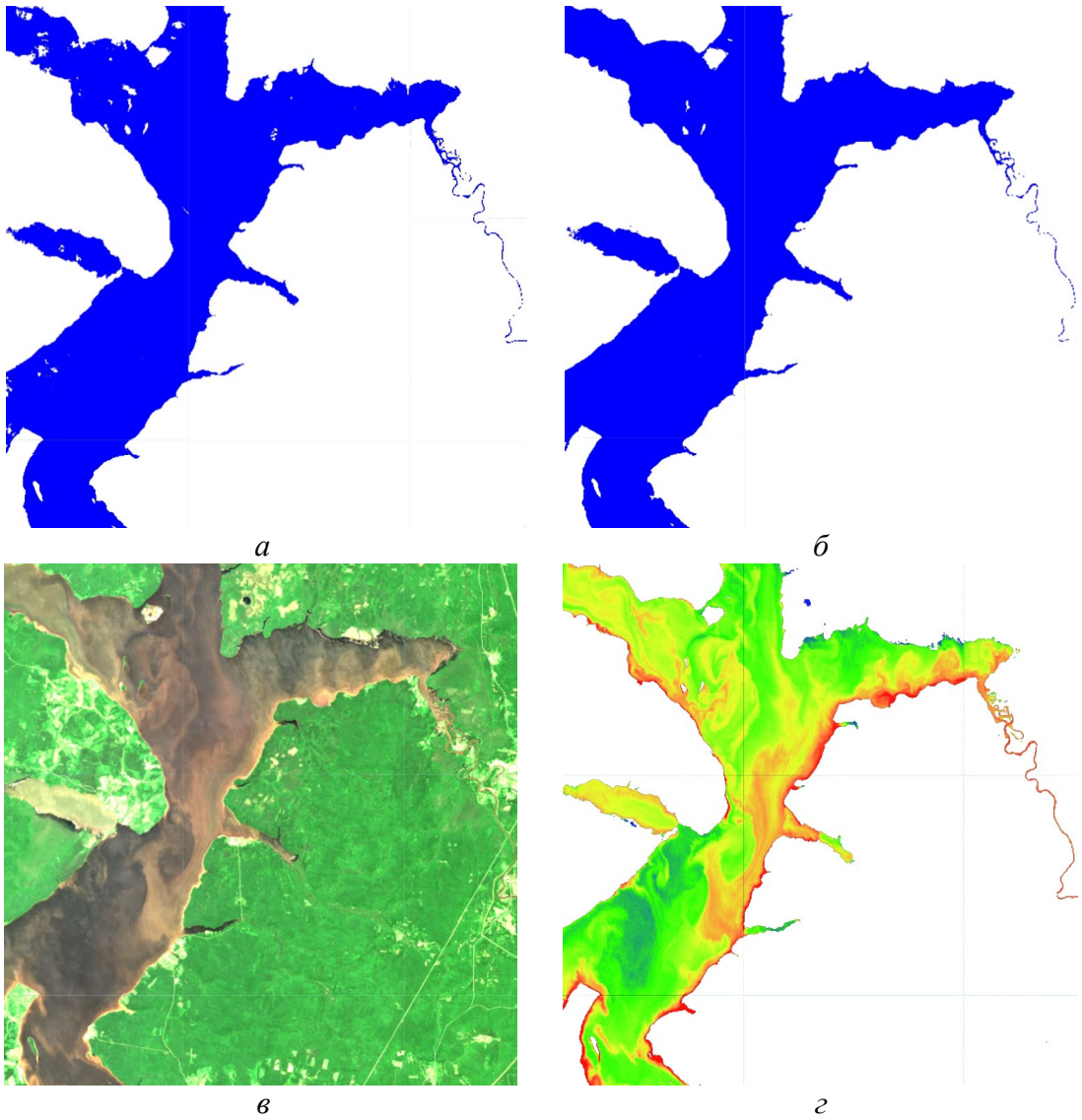


Рис. 1. Фрагмент снимка Камского водохранилища за 5 июня 2019 г. (*в*), построенная по нему маска (*а*), справа сверху маска, построенная с использованием предложенной методики (*б*), справа снизу рассчитанный индекс *AMWI* (*г*)

Список источников

1. Ermakov D. M. et al. Selecting a set of remote indices for comprehensive monitoring of acid mine drainages // International Perm Forum Science and Global Challenges of the 21st Century. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 329–342.

2. Березина О. А., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К. Применение многолетних рядов данных космической съемки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 144–158.

3. Ермаков Д. М. и др. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 222.

V. K. Dubinina[1], D. M. Ermakov[2]
[1] National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
[2] Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
[1]vkdubinina@edu.hse.ru

WATER SURFACE IDENTIFICATION OF POLLUTED OBJECTS USING GOOGLE EARTH ENGINE USING THE EXAMPLE OF THE KAMA RESERVOIR

Abstract. One of the urgent tasks of remote sensing is to identify the boundaries of water bodies using satellite images. The most common methods include the use of multispectral water indices and thematic classification of images. However, often the interpretation of the water surface is complicated by changes in the reflected brightness from the water areas of various water bodies due to the removal of river sediments, pollution or bloom. The purpose of this work is to develop an algorithm for identifying areas of open water using Sentinel-2 satellite data. The Kama Reservoir (Perm Krai) was chosen as the object of the study. It is located in the zone of influence of the liquidated Kizelovsky coal basin and is subject to pollution by heavy metals of acidic mine waters. The work was carried out on the Google Earth Engine platform.

Keywords: water surface, remote monitoring, Kama Reservoir, Sentinel-2, Google Earth Engine

УДК 528.77

М. С. Еременко[1], А. Д. Элешкевич[2]
[1, 2]АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия
[1]EremenkoMS@tomsknipi.ru, [2]EleshkevichAD@tomsknipi.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ

Аннотация. Современные методы создания топографических планов обладают рядом недостатков, включая высокую трудоемкость, зависимость от человеческого фактора и ограниченную скорость обработки данных. В данной статье исследуются возможности повышения эффективности этого процесса за счет внедрения автоматизированных технологий на основе искусственного интеллекта и геоинформационных систем. Предлагаемое решение включает применение сверточных нейронных сетей для автоматического распознавания и классификации объектов на топографических снимках. Это позволяет значительно ускорить обработку данных и снизить количество ошибок, связанных с ручным вводом. Дополнительно разрабатывается специализированный модуль для геоинформационной системы *QGIS*, обеспечивающий интеграцию нейросетевых моделей и последующую геообработку результатов.

Ключевые слова: топографические планы, автоматизация, компьютерное зрение, нейронный сети

Введение. В процессе проектирования и разработки месторождения важную роль играют данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они используются в задачах концептуального и интегрального проектирования, задачах инженерно-строительных изысканий, а также в рамках экологического мониторинга. Данные ДЗЗ представляют из себя большой массив данных космических снимков, аэрофотосъемки, данных лазерного сканирования, которые необходимо обрабатывать и интерпретировать для дальнейшего использования при развитии месторождения.

Большой объем данных, ручное дешифрирование, постоянное поступление новых снимков и ограниченные сроки – всё это приводит к следующим проблемам:

– высокой трудоемкости и низкой скорости ручного дешифрирования;

– ошибкам распознавания, вызванным человеческим фактором;

– использование устаревших картографических данных.

Для решения указанных проблем предлагается использовать автоматизированное дешифрирование данных ДЗЗ с использованием нейросетевых алгоритмов. Методы распознавания объектов с помощью нейросетей по своей точности на данный момент могут сравниться с результатами ручного распознавания человеком, но кратно превосходят ручные методы по скорости распознавания.

© Еременко М. С., Элешкевич А. Д., 2025

Описание эксперимента. Для демонстрации работы разрабатываемой технологии и ее эффективности, в сравнении с ручным дешифрированием, мы предлагаем рассмотрим задачу формирования топографических планов, выполняемую в рамках камеральных работ по данным цифровой аэрофотосъемки и воздушного-лазерного сканирования. На рис. 1 представлен процесс формирования топографического плана.

Рис. 1. Вид исходных данных, промежуточного распознавания объектов и топографическом план

Аэрофотосъемка выполнялась в конце июля – начале августа, что обеспечило благоприятные условия для автоматизированной обработки: отсутствие облачности, снежного покрова и других факторов, способных исказить результаты дешифрирования.

Перед обучением нейросетевых моделей исходные снимки прошли предварительную обработку, включающую:

– аугментацию данных (повороты, зеркальные отражения) для увеличения разнообразия обучающей выборки;

– разбиение на фрагменты размером 512 × 512 пикселей с перекрытием 10 %, что позволило сформировать 127 983 отдельных изображений;

– разделение на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80 % и 20 % соответственно.

Результаты. Для решения предложенной задачи предлагается создание нейросетевых моделей для распознавания водных объектов, кустарников, мхов. Модели обучаются на размеченных данных, предоставленных управлением инженерно-строительных изысканий. В основе каждой модели использовалась архитектура сверточной нейронной сети *Unet*. В табл. 1 представлены значения метрик обученных моделей.

Таблица 1

Статистические показатели моделей

Метрики моделей	***F*1-мера**	***Precision***	***Recall***	***IoU***
Водные объекты	0,974	0,961	0,988	0,95
Кустарники	0,809	0,796	0,814	0,783
Мох	0,842	0,839	0,846	0,821

Результаты распознавания представлены на рис. 2.

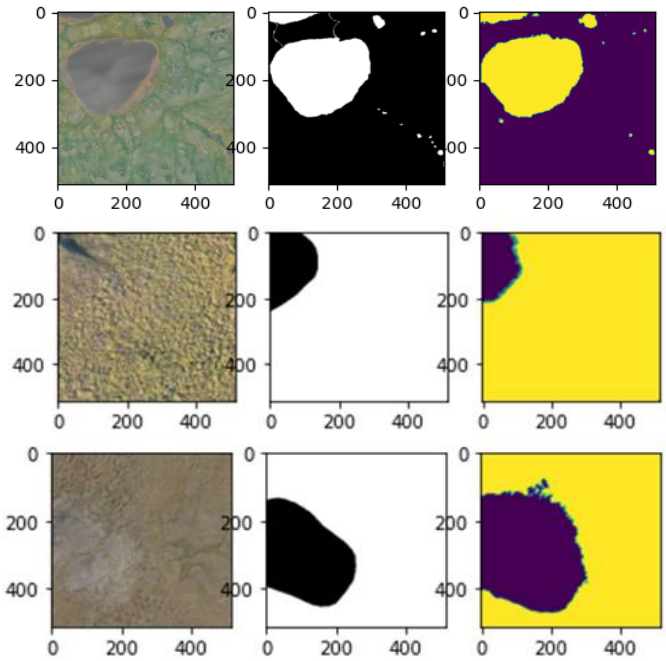


Рис. 2. Демонстрация моделей слева направо: исходные данные, маска, результаты модели; сверху вниз: водные объекты, кустарники, мох

Заключение. В результате проведенного эксперимента можно сказать, что достигнутый порог ошибки и визуальный осмотр результатов нейросети свидетельствуют о высокой степени автоматизации процесса дешифрирования водных объектов. Таким образом, технология распознавания данных ДЗЗ при помощи нейросетевых моделей при дальнейшем развитии и применении в других задачах дешифрирования может показать хороший результат. Что позволит существенно сократить трудозатраты и ускорить обработку большого массива данных ДЗЗ.

Для удобства работы пользователей с созданными моделями в производственных задачах создан модуль по распознаванию данных ДЗЗ, который устанавливается в *QGIS*. Общая картинка интеграции представлена на рис. 3. В *QGIS* будут загружаться данные ДЗЗ, после чего модуль распознавания данных ДЗЗ будет формировать векторные слои дешифрированных объектов, которыми можно пользоваться как в системе *QGIS*, так и выгрузить в геопространственную базу данных.

Рис. 1. Архитектура взаимодействия модуля распознавания данных ДЗЗ

Список источников

1. Ковин Р. В., Марков Н. Г. Геоинформационные системы : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 175 с.

2. Рылов С. А. Алгоритм спектрально-текстурной классификации спутниковых изображений с использованием частичного обучения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 4, № 1. С. 37–43. DOI 10.33764/2618-981X-2019-4-1-37-43. EDN ZAXPEB.

3. Шеломенцева И. Г. Обзор базовых алгоритмов классификации в задаче распознавания изображений анализов мокроты, окрашенной по методу Циля – Нильсена // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, Махачкала, 31 августа 2017 года. Махачкала : Общество с ограниченной ответственностью «Апробация», 2017. С. 18–21. EDN ZMFPFH.

4. Алгоритмы поиска и классификации изображений линейных объектов на космоснимках / И. Н. Кандоба, В. Б. Костоусов, К. В. Костоусов, Д. С. Перевалов // Математические методы распознавания образов. 2009. Т. 14, № 1. С. 536–539. EDN YNUMPF.

5. Бычков А. Г., Киселева Т. В., Маслова Е. В. Использование сверточных нейросетей для классификации изображений // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 39–49. DOI 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-39-49. EDN SOHCMR.

6. Bousias Alexakis E. Evaluation of unet and unet++ architectures in high resolution image change detection applications / E. Bousias Alexakis, C. Armenakis // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives: 24, Nice, Virtual, 31 августа – 02 2020 года. Vol. 43. Nice, Virtual, 2020. P. 1507–1514. DOI 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1507-2020. EDN DCMWON

7. Соснин А. С., Суслова И. А. Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, relu, tahn // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы XII международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 25 февраля – 01 2019 года. Екатеринбург : Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2019. С. 237–246. EDN VUZYBA.

M. S. Eremenko[1], A. D. Eleshkevich[2]
[1, 2]JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russia
[1]EremenkoMS@tomsknipi.ru, [2]EleshkevichAD@tomsknipi.ru

AUTOMATION OF THE TOPOGRAPHIC BASE CONSTRUCTION PROCESS

Abstract. Modern methods of creating topographic plans have a number of disadvantages, including high labor intensity, dependence on the human factor and limited data processing speed. This article explores the possibilities of increasing the efficiency of this process through the introduction of automated technologies based on artificial intelligence and geographic information systems. The proposed solution includes the use of convolutional neural networks for automatic recognition and classification of objects in topographic images. This allows you to significantly speed up data processing and reduce the number of errors associated with manual input. Additionally, a specialized module for the QGIS geoinformation system is being developed, providing integration of neural network models and subsequent geo-processing of the results.

Keywords: topographic plans, automation, computer vision, neural networks

УДК 519.6

Н. Б. Захарова[1], В. Д. Макарычев[2]
[1] Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники», Зеленоград, Москва, Россия
[1]n.zakharova@inm.ras.ru

АССИМИЛЯЦИЯ СПУТНИКОВЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ ДАННЫХ В МОДЕЛИ *INMOM*: ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ДЛЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Аннотация. В работе проведена верификация трех вариантов расчетов модели *INMOM* для акватории Черного моря: 1) базовой версии модели без ассимиляции; 2) с вариационной ассимиляцией спутниковых данных о температуре поверхности моря (ТПМ); 3) с комбинированной вариационной ассимиляцией ТПМ и профилей температуры (в качестве эталонных данных использовались измерения буев *ARGO*). Результаты показывают, что комбинированная ассимиляция позволяет достичь существенного улучшения точности, снижая среднеквадратичное отклонение (rmse) температуры в 2–4 раза для слоев 30–300 м по сравнению с базовой моделью. Наибольший эффект ассимиляции наблюдается в промежуточных слоях (100–800 м), тогда как в поверхностном слое 0–30 м сохраняются значительные погрешности (*rmse* > 2 °C). На глубинах свыше 800 м все три варианта расчетов модели демонстрируют сопоставимую высокую точность (*rmse* < 0,3 °C).

Ключевые слова: математическое моделирование, ассимиляция данных, данные дистанционного зондирования, профили температуры, верификация, анализ данных

Модель и методы. В работе выполнены расчеты с использованием модели *INMOM* (*Institute of Numerical Mathematics Ocean Model*) [1], описывающей термодинамические процессы на основе уравнений в приближениях Буссинеска и гидростатики, дополненных соответствующими начальными и граничными условиями. Численная реализация использует метод расщепления по физическим процессам, при котором на каждом временном подынтервале последовательно решаются уравнения переноса-диффузии для температуры и солености, а затем уравнения для горизонтальных компонент скорости и уровня моря. Такая полудискретная схема обеспечивает эффективное численное решение полной системы уравнений.

Для ассимиляции данных о температуре моря в модель введен вариационный алгоритм [2], где в качестве управляющего параметра выбран поверхностный тепловой поток (для спутниковых данных) и функция поправки к внешнему воздействию (для профильных данных). Формулируется обратная задача оптимизации с функционалом стоимости, минимизирующим расхождение между модельными и наблюдаемыми значениями температуры. Решение задачи приводит к системе оптимальности, включающей

© Захарова Н. Б., Макарычев В. Д., 2025

прямое и сопряженное уравнения, ковариацию фоновых ошибок и граничное условие для теплового потока, что обеспечивает физически согласованное решение с учетом наблюдательных данных.

Данные. В качестве данных наблюдений для ассимиляции в модели в настоящем исследовании используются данные о температуре поверхности моря и данные профилей. Данные о ТПМ включают наблюдения со спутников Aqua и Terra (*MODIS*), *Suomi NPP* (*VIIRS*), предоставлены ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [3].

В качестве профилей по глубине в работе использовались средненедельные трехмерные поля температуры из глобального продукта *ARMOR3D*, созданного на основе комплексной обработки спутниковых и натурных данных [4]. Данный продукт формируется в два этапа: 1) вертикальная проекция спутниковых измерений (*SLA, SST, SSS*) методом множественной линейной регрессии с использованием исторических ковариаций для получения синтетических полей до глубины 1 500 м; 2) оптимальная интерполяция этих полей с данными натурных профилей температуры и солености. Для глубин свыше 1 500 м применялась климатология (*WOA*18). Данные продукта были получены на сетке с шагом ¼ градуса и пересчитаны в профили на сетке численной модели *INMOM*.

Оценка результатов проводится на основе сопоставления результатов расчетов с измерениями буев *ARGO* [5]. Температурные данные *ARGO* имеют погрешность ≤0,002 °С после калибровки [6], поэтому могут использоваться для оценки точности расчетов.

Анализ. В работе проведен анализ результатов расчетов численной модели термодинамики Черного моря для трех расчетов: 1) расчет по модели без ассимиляции; 2) расчет по модели с включенными процедурами ассимиляции ТПМ; 3) расчет по модели с включенными процедурами ассимиляции как температуры поверхности, так и профилей. В таблице представлены значения систематических и среднеквадратичных ошибок в разных глубинных слоях.

Таблица 1

Относительные (δ) и среднеквадратичные (*rms*) ошибки температуры (°С) в различных глубинных слоях Черного моря

Глубина слоя, м	**Расчет без ассимиляции**		**Ассимиляция ТПМ**		**Ассимиляция ТПМ и профилей температуры**	
	δ	***rmse***	**δ**	***rmse***	**δ**	***rmse***
0–5	–0,023	1,225	0,004	1,038	0,003	0,845
5–30	–0,069	2,439	–0,055	2,334	–0,017	2,164
30–100	0,173	2,125	0,178	2,172	0,023	1,015
100–300	0,151	1,429	0,154	1,451	–0,000	0,322
300–800	0,073	0,703	0,074	0,706	–0,005	0,201
800–1 500	0,003	0,215	0,003	0,215	–0,001	0,176

Проведенный анализ демонстрирует значительное улучшение точности модели *INMOM* при последовательном включении различных типов ассимиляции данных. Наибольшие ошибки наблюдаются в верхних слоях 0–30 м (что согласуется с результатами работы [7]), где исходная модель без ассимиляции показывает систематическое занижение температуры с максимальным разбросом ошибок (2,4 °C). Ассимиляция только данных о температуре поверхности моря (ТПМ) устраняет систематическое смещение в приповерхностных слоях, но практически не оказывает влияния на слои глубже 30 м.

Ключевой результат исследования – существенное повышение точности при комбинированной ассимиляции поверхностных и профильных данных. В слое 30–300 м это позволяет снизить среднеквадратичную ошибку в 2–4 раза (с 1,4–2,1 °C до 0,3–1,0 °C) и практически полностью устранить систематические отклонения. На глубинах ниже 800 м все варианты расчетов модели показывают высокую точность ($rmse < 0{,}3$ °C).

Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к ассимиляции данных, особенно для корректного воспроизведения вертикальной термодинамической структуры в критически важных слоях 5–300 м.

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

Список источников

1. Залесный В. Б., Гусев А. В., Мошонкин С. Н. Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености. Известия РАН, физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6, с. 699–716.

2. Агошков В. И., Шутяев В. П., Пармузин Е. И., Захарова Н. Б., Шелопут Т. О, Лезина Н. Р. Вариационная ассимиляция данных наблюдений в математической модели динамики Черного моря // Морской гидрофизический журн. 2019. Т. 35. № 6. С. 585–599.

3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. 12 № 5. С. 263–284.

4. Guinehut S., A.-L. Dhomps, G. Larnicol and P.-Y. Le Traon, 2012: High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. Ocean Sci., 8, 845-857, doi:10.5194/os-8-845-2012.

5. Argovis: Interactive Visualization of Argo Float Data. URL: https://argovis.colorado.edu (дата обращения: 10.10.2024).

6. Wong Annie P. S., Wijffels Susan E. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations from a Global Array of Profiling Floats // Frontiers in Marine Science. 2020. №7 DOI 10.3389/fmars.2020.00700.

7. Коршенко Е. А., Дианский Н. А., Фомин В. В. Воспроизведение глубоководной циркуляции Черного моря с помощью модели INMOM и сопоставление результатов с данными буев ARGO // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 220–232.

N. B. Zakharova[1], V. D. Makarychev[2]
[1] Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Moscow, Russia
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET),
Zelenograd, Moscow, Russia
[1]n.zakharova@inm.ras.ru

ASSIMILATION OF SATELLITE AND PROFILE DATA IN THE INMOM MODEL: ACCURACY ASSESSMENT FOR THE BLACK SEA

Abstract. The study conducted verification of three INMOM model calculation scenarios for the Black Sea: (1) baseline version without data assimilation, (2) with variational assimilation of satellite sea surface temperature (SST) data, and (3) with combined variational assimilation of both SST and temperature profiles, using ARGO buoy measurements as reference. The results demonstrate that combined data assimilation provides maximum accuracy improvement, reducing the root-mean-square temperature error by 2-4 times for the 30–300 m layers compared to the baseline model. The variational assimilation shows highest effectiveness in intermediate layers (100–800 m), while significant errors (rmse>2°C) persist in the surface layer (0–30 m). Below 800 m depth, all three model calculation scenarios demonstrate comparable high accuracy (rms<0,3°C).

Keywords: mathematical modeling, data assimilation, remote sensing data, Profile Data, verification, data analysis

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

УДК 004.932

В. А. Зеленцов[1], В. Ф. Мочалов[2], Д. И. Мухаметов[3]
[1, 2, 3]Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, Россия
[1]v.a.zelentsov@gmail.com

МЕТОДИКА НАЗЕМНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РАЗМЕТКИ МАТЕРИАЛОВ СЪЕМКИ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. Рассматриваются вопросы проведения наземных обследований для организации автоматизированной обработки материалов мульти- и гиперспектральной космической съемки. Представлена последовательность работ, направленных на формирование исходных данных в части разметки материалов съемки для идентификации состояния лесной растительности, выполняемой с использованием алгоритмов машинного обучения. Систематизирован состав исходных данных, уточнено пространственное расположение на местности элементов ландшафта, требующих повышенного внимания. Методика предусматривает возможность обоснованного выбора приоритетных точек для проведения наземных обследований как до, так и после применения алгоритмов машинного обучения. Благодаря применению математического аппарата нечеткой кластеризации обеспечивается интеллектуальная предварительная разметка исходных данных. Приведен пример реализации методики.

Ключевые слова: семантическое описание элементов ландшафта, алгоритмы машинного обучения, нечеткая кластеризация, наземные обследования, исходные данные

Под идентификацией состояния лесной растительности подразумевается решение задачи семантической сегментации элементов ландшафта в пределах рассматриваемой сцены – части условного кадра материалов космической съемки. Основной задачей проведения наземных обследований является выполнение семантического описания элементов ландшафта с учетом содержания тематической задачи обработки материалов съемки. При этом наземные обследования могут быть направлены на реализацию следующих основных операций обработки материалов космической съемки: формирование исходных данных в части обучающих и контрольных выборок для дальнейшей идентификации элементов лесной растительности на основе алгоритмов машинного обучения; итоговое оценивание качества результатов автоматизированной идентификации элементов ландшафта с учетом контроля состояния лесной растительности в выборочных точках (т. е. на локальных участках) наземных обследований. Результаты идентификации состояния лесной растительности, зависящие от данных наземных обследований, влияют на качество решения целого ряда важных прикладных задач: определение видового состава растительности; выявление очагов заболеваний, обнаружение мест ветровалов; оценивание последствий лесных пожаров; оценивание обобщенных свойств растительности,

© Зеленцов В. А., Мочалов В. Ф., Мухаметов Д. И., 2025

влияющих на устойчивость лесных насаждений к неблагоприятным воздействиям; оценивание свойств лесной растительности целевого характера, и др. Основные трудности при проведении наземных обследований связаны с большими временными и материальными затратами на проведение полевых работ, сложностью перемещения в пространстве в условиях труднопроходимой лесной растительности. В связи с этим разработка методического аппарата для интеллектуальной разметки материалов съемки и обоснованного выбора точек наземных обследований является актуальной задачей.

Рассмотрим организацию наземных обследований в интересах формирования исходных данных для решения задачи определения видового состава лесной растительности. Методика проведения наземных обследований при решении этой задачи предусматривает выполнение ряда операций, представленных на схеме (рис. 1).

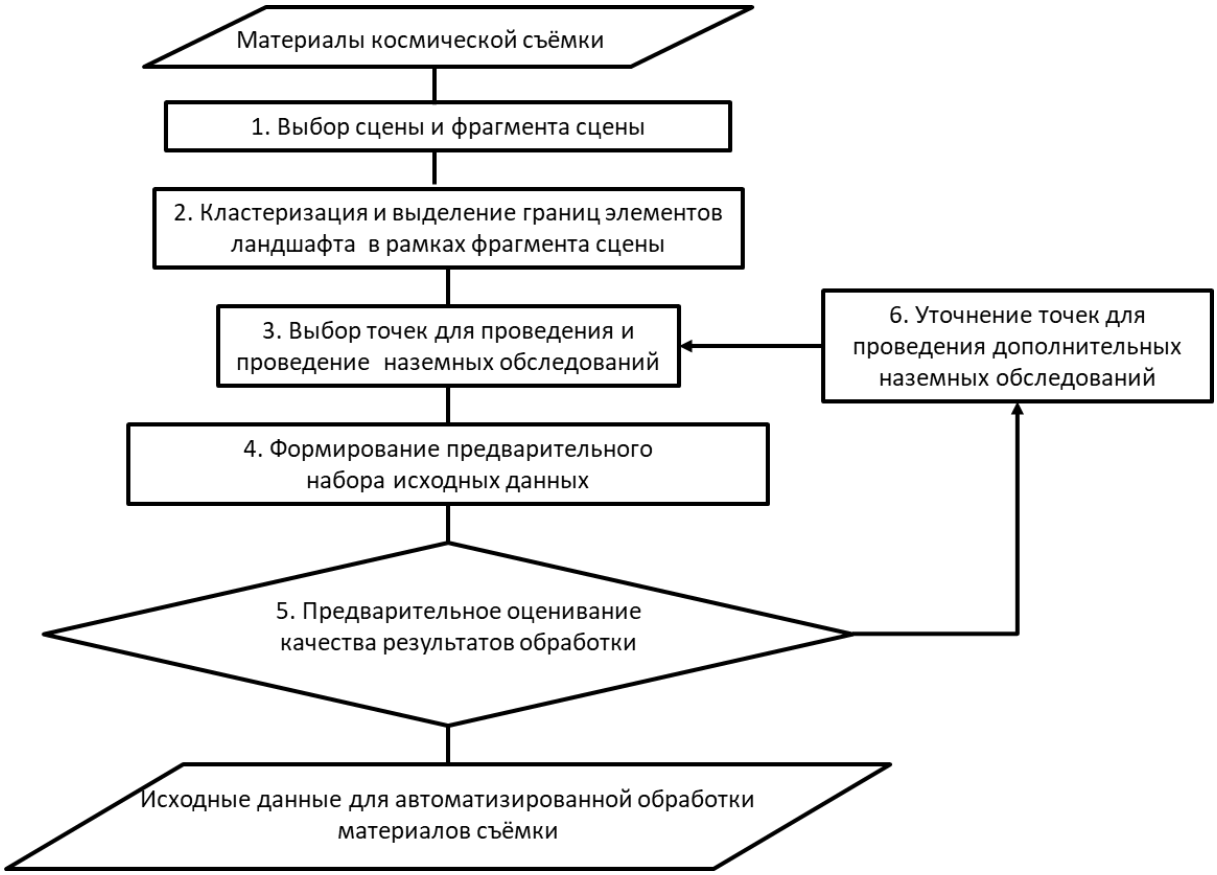


Рис. 1. Схема методики проведения наземных обследований лесной растительности

Цифрами на схеме обозначены основные этапы реализации методики.

На этапе 1 оператором на основе визуального анализа материалов съемки выбираются границы сцены и фрагмента сцены.

На этапе 2 в рамках фрагмента сцены в режиме интеллектуальной разметки исходных данных на основе использования математического аппарата нечеткой кластеризации [1] определяются границы идентифицируемых элементов ландшафта с известными свойствами. Количество идентифицируемых элементов ландшафта определяется исходя из анализа содержания целевой тематической задачи обработки материалов съемки.

На этапе 3 выбираются географические координаты точек для проведения наземных обследований. При этом основными задачами наземных обследований являются: подтверждение принадлежности точки рассматриваемому элементу ландшафта (кластеру) с заданными свойствами; уточнение свойств элемента ландшафта.

На этапе 4 формируется предварительный набор исходных данных для алгоритмов машинного обучения [2].

На этапе 5 на основе данных обучающих выборок рассчитываются предварительные значения базовых и обобщенных показателей качества результатов обработки материалов съемки [3; 4].

На этапе 6 при необходимости уточняется перечень точек для проведения дополнительных наземных обследований. При этом на основании данных интеллектуальной разметки учитывается степень принадлежности точек рассматриваемым кластерам. Пример выбора точек для проведения дополнительных наземных обследований представлен на рис. 2.

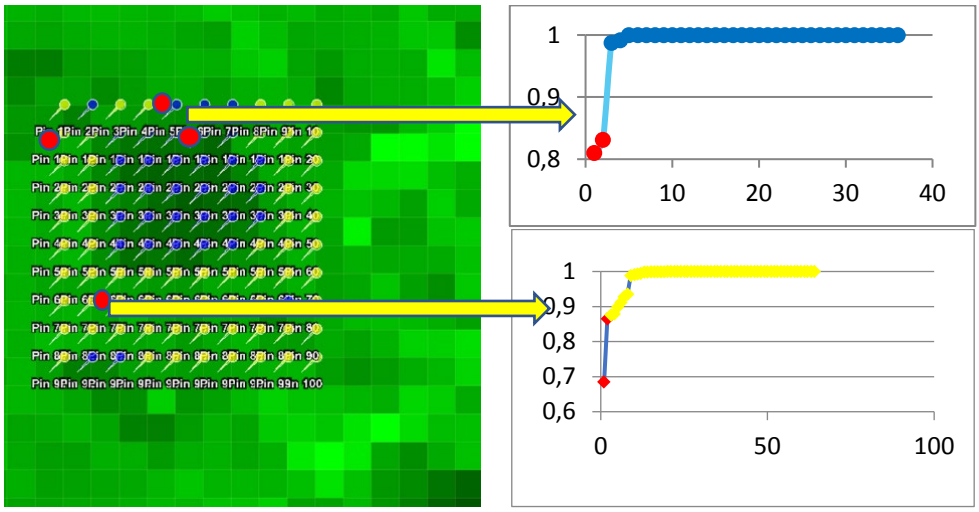


Рис. 2. Фрагмент сцены и исходные данные,
иллюстрирующие результат реализации методики

На рис. 2 слева синие пиксели представляют условно элемент ландшафта № 1, желтые – элемент ландшафта № 2. Красными точками отмечены пиксели с невысокой степенью принадлежности рассматриваемым кластерам и подлежащие, при необходимости, контролю состояния растительности в ходе проведения дополнительных наземных обследований. Желтые стрелки обозначают пространственное расположение пикселей с невысокой степенью принадлежности элементам ландшафта. Графики степени принадлежности пикселей соответствующим элементам ландшафта приведены справа. На графиках по оси ординат отложено количество пикселей, а по оси абсцисс – степень их принадлежности рассматриваемым кластерам.

Если при реализации рассматриваемой методики на этапе 5 будет принято решение о возможности передачи исходных данных для обработки материалов съемки без проведения дополнительных наземных обследований,

то данные, приведенные на рис. 2, могут быть учтены в ходе наземных обследований для дополнительного контроля оценивания качества результатов обработки материалов съемки.

Предложенная методика проведения наземных обследований обеспечивает комплексное выполнение следующих операций: формирование исходных данных для алгоритмов машинного обучения; предварительное оценивание качества результатов идентификации состояния элементов ландшафта на примере лесной растительности до применения алгоритмов машинного обучения; обоснованный выбор точек для проведения наземных обследований. Оригинальность методики заключается в организации интеллектуальной разметки материалов съемки на основе математического аппарата нечеткой кластеризации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00684, https://rscf.ru/project/25-29-00684.

Список источников

1. Mochalov V., Grigorieva O., Zhukov D., Markov A., Saidov A. Remote sensing image processing based on modified fuzzy algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. T. 1225. P. 563–572.

2. Рашка С. Python и машинное обучение, пер. с англ. А. В. Логунова. М.: ДМК Пресс, 2017. 418 с.

3. Зеленцов В. А., Мочалов В. Ф. Показатели и алгоритмы оценивания качества результатов идентификации состояния прилегающих территорий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 3 (39). С. 73–82.

4. Maxwell A. E., Warner T. A., Guillén L. A. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies–Part 2: Recommendations and Best Practices. Remote Sens. 2021, 13, 2591. https://doi.org/10.3390/rs13132591.

V. A. Zelentsov[1], V. F. Mochalov[2], D. I. Muhametov[3]
[1, 2, 3] Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
[1]v.a.zelentsov@gmail.com

FIELD SURVEY METHODOLOGY FOR INTELLIGENT LABELING OF REMOTE SENSING DATA IN FOREST VEGETATION STATUS IDENTIFICATION

Abstract. The issues of ground-based surveys for the organization of automated processing of multi- and hyperspectral remote sensing data are considered. The sequence of works aimed at generating initial data for identifying the state of forest vegetation based on the use of machine learning algorithms is presented. The composition of the initial data in terms of the spatial location of landscape elements and survey materials on the ground is systematized. The methodology provides for the possibility of a reasonable selection of priority points for conducting ground surveys both before and after the operation of machine learning algorithms. example of the implementation of the technique is given.

Keywords: semantic description of landscape elements, machine learning algorithms, fuzzy clustering, ground-based surveys, initial data

УДК 528.88

Ю. С. Иванова[1], М. Ю. Горбунов[2], М. В. Уманская[3], В. А. Федосеев[4]
[1,4] Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия
[2,3] Институт экологии Волжского бассейна РАН,
Самарский федеральный научный центр РАН, Тольятти, Россия
[4]vicanfed@gmail.com

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* В АКВАТОРИИ СРЕДНЕЙ ВОЛГИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ПРИ ПОМОЩИ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможности оценивания концентрации хлорофилла *a* в водоемах Среднего Поволжья по спутниковым данным *Sentinel-2* посредством обучения регрессионных моделей. Рассматриваются различные стратегии подготовки данных, включающие удаление выбросов и кластеризацию, а также сравниваются 11 различных регрессионных моделей. Результаты исследования показывают возможность оценивания количественных показателей цветения водоемов с достаточной надежностью для оперативного мониторинга распространения фитопланктона.

Ключевые слова: фитопланктон, дистанционное зондирование Земли, хлорофилл *a*, *Sentinel-2*, машинное обучение, регрессия

Введение. «Цветением» воды называется любое чрезмерное развитие планктонных водорослей, при котором они наблюдаются визуально, или оказывают влияние на водохозяйственную деятельность, или вызывают гибель гидробионтов [1]. Многолетний мониторинг фитопланктона и оценка концентрации хлорофилла *a* в Куйбышевском водохранилище и в водоемах Среднего Поволжья в окрестностях города Тольятти осуществляется по сетке постоянных станций [2; 3] с различной частотой – от ежемесячных до 1–3 наблюдений в год. Наблюдения последних лет показывают, что сроки начала цианобактериальных цветений и их продолжительность существенно изменились по сравнению с многолетними данными за 1960–2000 гг. [2], что говорит о необходимости увеличения числа наблюдений в течение года. Кроме того, большая площадь водного зеркала волжских водохранилищ не позволяет сформировать максимально полное и всеобъемлющее представление об изменении концентрации хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона во времени и пространстве.

Для решения рассмотренных проблем могут быть применены методы дистанционного мониторинга. Согласно ряду исследований [4], этот подход может быть эффективен для обнаружения пятен цветения на крупных водоемах, отслеживания сезонной динамики и других особенностей массового развития цианобактерий в разнообразных пресных водоемах [5]. Задачей

© Иванова Ю. С., Горбунов М. Ю., Уманская М. В., Федосеев В. А., 2025

настоящей работы является анализ возможности использования спутниковых данных для количественного оценивания цианобактериального цветения водоемов в окрестности города Тольятти.

Материалы и методы. В исследовании использовались результаты полевых измерений концентрации хлорофилла *a*, выполненных в 187 точках с известными географическими координатами. Для обучения моделей регрессии в качестве признаков использовались спутниковые данные оптического сенсора MSI миссии *Sentinel-2*, наиболее близкие по дате к дате замера пробы воды. Для каждой точки рассчитывались медианные значения в окне 5 × 5 пикселей по 10 спектральным каналам.

Целевой переменной выступала концентрация хлорофилла *a*. Исходный набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в пропорции 3:1. В качестве основной метрики использовался коэффициент детерминации R^2.

В ходе экспериментов были рассмотрены следующие модели регрессии: *Linear Regression*, *Ridge Regression* (*RR*), *Lasso*, *ElasticNet*, *Random Forest* (*RF*), *Support Vector Regression* (*SVR*), *Gradient Boosting Regression* (*GBR*), *CatBoost Regression* (*CBR*), *XGBoost Regression* (*XGB*), *LightGBM Regression* (*LGB*), *Stacking Regressor* (*SR*).

Также при выборе наилучшей стратегии обучения моделей регрессии рассматривались две процедуры предобработки исходной выборки: удаление выбросов и кластеризация очищенных данных.

Описание полученных результатов. На первом этапе исследования проверялась эффективность применения процедуры удаления выбросов из исходной выборки. Наиболее подходящим для этого методом оказался метод межквартильного расстояния (*IQR*), который применялся с порогом 1,5. В результате удаления выбросов из исходных 187 записей осталось 138. Далее признаки были стандартизированы. Значения в табл. 1 показывают, что для большинства моделей удаление выбросов позволяет улучшить качество модели.

Замеры концентрации хлорофилла *a* осуществлялись в разных типах водоемов, в разные годы и в разных погодных условиях. В этой связи была рассмотрена гипотеза о целесообразности предварительной кластеризации общей выборки для последующего обучения моделей регрессии на отдельных кластерах. Ввиду небольшого объема исходной выборки было рассмотрено разделение на два кластера. Для этого применялись методы *k-means* и *DBSCAN*. Поскольку они по-разному разбивают исходную выборку, для корректного сравнения методов при прогнозировании целевого показателя использовалась единая тестовая выборка, к элементам которой применялась одна из двух обученных моделей согласно принадлежности к одному из двух кластеров.

Полученные результаты, отраженные в табл. 1, свидетельствуют о целесообразности кластеризации данных для повышения качества оценки.

Сравнивая методы кластеризации, нельзя отдать явного предпочтения какому-либо из них, поскольку для разных моделей регрессии лучшие показатели были получены на основе разных методов кластеризации.

По итогам всех проведенных экспериментов наилучшие результаты были достигнуты при использовании модели *GBR* и кластеризации методом *DBSCAN*. Для этой модели значение R^2 на тестовой выборке составило 0,78, а на полной выборке – 0,99, что позволяет сделать вывод о достаточно высоком качестве оценивания. Немногим уступают этому результату *RR* и *SVR* ($R^2 = 0{,}77$) на основе кластеризации *k-means*. Наилучший результат, полученный по исходной выборке, показала модель *RF* с $R^2 = 0{,}48$, а наилучший результат по очищенным данным показала модель *SR* ($R^2 = 0{,}69$).

Таблица 1

Значения *R*2 на тестовой выборке для разных моделей и стратегий предобработки

Модель	**Сырые данные**	**Очищенные данные**	**После *k-means***	**После *DBSCAN***
Объем выборки	187	138	91 + 47	86 + 52
Linear	0,432	0,634	0,577	0,709
Ridge	0,432	0,643	0,767	0,720
Lasso	0,407	0,649	0,703	0,690
ElasticNet	0,406	0,647	0,735	0,715
RF	0,476	0,358	0,381	0,653
SVR	0,139	0,563	0,765	0,665
GBR	0,195	0,283	0,476	0,777
CBR	0,379	0,467	0,434	0,730
XGB	0,173	0,119	0,413	0,683
LGB	0,396	0,283	0,334	0,240
SR	0,342	0,690	0,393	0,749

Заключение. В работе анализировалась возможность оценивания концентрации хлорофилла *a* в водоемах по спутниковым данным *Sentinel-2*. Были исследованы различные стратегии подготовки данных, включающие удаление выбросов и кластеризацию, а также 11 различных регрессионных моделей. В результате по выборке объемом 187 записей удалось получить достаточно адекватное качество оценивания, что достигнуто с использованием модели *Gradient Boosting Regression* на основе кластеризации *DBSCAN* с предварительным удалением выбросов. Полученный результат говорит о перспективности оценивания количественных показателей цветения водоемов по доступным данным *Sentinel-2* для оперативного мониторинга распространения фитопланктона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-14-20005, https://rscf.ru/project/23-14-20005.

Список источников

1. Lopez C. B. et al. Scientific assessment of freshwater harmful algal blooms. Washington, D.C.: Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology, 2008. 65 p.

2. Розенберг Г. С., Выхристюк Л. А. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.

3. Шерышева Н. Г. и др. Экологическое состояние урбанизированного высокопродуктивного водоема (оз. Большое Васильевское). Тольятти: Анна, 2021. 187 с.

4. Li S. et al. Quantification of chlorophyll-a in typical lakes across China using Sentinel-2 MSI imagery with machine learning algorithm // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 778. P. 146271.

5. Rolim S. B. A. et al. Remote sensing for mapping algal blooms in freshwater lakes: a review // Environ Sci Pollut Res. 2023. Vol. 30, № 8. P. 19602–19616.

Yu. S. Ivanova[1], M. Yu. Gorbunov[2], M. V. Umanskaya[3], V. A. Fedoseev[4]
[1,4] Samara National Research University, Samara, Russia
[2,3] Institute of Ecology of Volga Basin RAS, Samara Federal Research Center RAS, Togliatti, Russia
[4]vicanfed@gmail.com

ESTIMATION OF CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION IN THE MIDDLE VOLGA BASED ON SATELLITE DATA USING REGRESSION MODELS

Abstract. The paper discusses the possibility of estimating the concentration of chlorophyll "a" in water bodies of the Middle Volga region using Sentinel-2 satellite data by training regression models. Various data preparation strategies are considered, including the removal of outliers and clustering, and 11 different regression models are compared. The results of the study show the possibility of estimating quantitative indicators of water body bloom with sufficient reliability for operational monitoring of phytoplankton distribution.

Keywords: paradigms of engineering education, STEM-education, forms and ways of realization of STEM-education, electronic technological resources, course “Technology”

УДК 528.88, 528.06, 551.5

А. В. Картушинский[1], С. А. Картушинский[2], И. Ю. Ботвич[3]
[1, 2] Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, Красноярск, Россия
[1, 3] Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
[1]kartalvas@rambler.ru, [2]kartushka@mail.ru

ОБ ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ТОНКОМ ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ПО ДАННЫМ ДЗЗ И КОНТАКТНЫМ ДАННЫМ

Аннотация. В работе обсуждается проблема оценки влияния термодинамического состояния воздуха на продуктивность растений в приземном слое на уровне произрастания сельскохозяйственных культур на примере опытного поля Минино (Красноярский край). Рассматривается возможность оценки по метеорологическим параметрам, измеренным контактным методом и по данным дистанционных измерений при помощи беспилотных летательных аппаратов самолетного типа (БПЛА) и дронов (квадрокоптеров) с возможностью зависания над исследуемой площадью. Основное внимание в работе уделяется возможности оценки статистически обоснованных связей между метеорологическими параметрами, такими как температура и влажность воздуха, атмосферное давление и скорость ветра измеренными контактным методом в микроклиматических условиях и данными по температуре поверхности земли, а также вегетационными показателями по дистанционным данным. Для совершенствования математических моделей по моделированию влияния факторов окружающей среды на мелкомасштабном уровне оценивается влияние факторов физических, исходя из пространственно-временных масштабов изменчивости термодинамических условий, на произрастание сельскохозяйственных посевов в вегетационный период (на примере посевов пшеницы).

Ключевые слова: микроклимат, погода, вегетационный индекс, урожайность, термодинамические параметры, БПЛА, дроны, спектральные измерения

Введение. Определяющими условиями, влияющими на устойчивое развитие растений и урожайность сельхозкультур, являются погодные изменения воздушной среды. Основные факторы влияния – колебания температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и скорости ветра [1; 2]. В современных условиях глобальных климатических изменений необходимо учитывать резкие переходы погоды от комфортных для вегетации до тормозящих развитие листового покрова и даже прекращающих их рост. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в настоящее время считается наиболее распространенным методом исследования земной поверхности, в особенности для реализации технологий для точного земледелия [3; 4]. Такие методы в сочетании с современными достижениями в области машинного обучения при построении математических моделей применяются для мониторинга состояния полей в течение вегетационного периода

© Картушинский А. В., Картушинский С. А., Ботвич И. Ю., 225

и обеспечивает эффективность технологий при внесении удобрений в почву [4; 5]. Наиболее распространенными в настоящее время, наряду со спутниковыми измерениями, являются измерения с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дронов с аппаратными средствами с высоким пространственным разрешением [6; 7].

Основными параметрами, которые могут определяться как факторы, оказывающие влияние на ростовые характеристики растений, является температура и влажность почвы, а также режим температуры и влажности воздуха на уровне масштабов произрастания самого растения. Кроме этих факторов, особую значимость приобретает в совокупности изменчивость атмосферного давления и скорости ветра. Особенно это влияние важно для начала периода вегетации. Критическим для комфортного прорастания и укрепления корневой системы растения является период времени, за который засуха или заморозки могут повлиять на восстановление или уничтожение культуры на уровне одного растения. Развитие систем ДЗЗ на базе БПЛА существенно продвинуло технологии применения дистанционного зондирования для целей контроля термодинамических параметров поверхности почвы. Использование БПЛА для наблюдения за посевами дает большие возможности для сбора полевых данных простым, быстрым и экономичным способом, по сравнению с другими методами измерений.

Однако изменчивость режима влажности и температуры воздуха и почвы на микромасштабном уровне (размеров отдельного растения) в природных условиях на открытом грунте можно рассматривать как микроклиматические (или микропогодные) масштабы влияния на ростовые характеристики растений, а для термодинамического режима взаимодействия приземного слоя с подстилающей поверхностью – как «параметр шероховатости».

Такое взаимодействие порождает мелкомасштабные погодно-климатические флуктуации, имеющие прямое воздействие на состояние растительности, в частности на сельскохозяйственные посевы. Оценка частоты повторяемости климатических и погодных экстремумов, их характера и соответствующей им продуктивности растительности по измерениям хлорофильного потенциала, с использованием современных средств и методов измерения параметров *in situ*, позволит:

– выявлять хлорофилльный потенциал листа растения на микромасштабах и изменчивость влагообеспечения и температуры, которые оптимальны для выращивания определенных сельскохозяйственных культур;

– оценивать изменения продуктивности сельхозпосевов, обусловленные ситуациями, вызванными аномальными погодными условиями.

Таким образом, основной целью работы является анализ агроклиматических флуктуаций урожайности под действием погодных режимов на тестовом участке опытно полевого хозяйства Минино (ОПХ) на территории Красноярского края, связанных с нормальными и аномальными метеорологических условиями на пространственных масштабах метрового диапазона. Изучение действия мелкомасштабных погодных на произрастание

сельхозкультур основано на данных БПЛА и высокочастотных контактных данных.

Материалы и методы. На примере площади сельскохозяйственных посевов (Минино) 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.

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 используют три датчика, разнесенные на расстояние 3 м, соединенные проводами в гирлянду с микроконтроллером на плате прототипирования. Таким образом, проводятся измерения в горизонтальной плоскости, учитывая высоту шероховатости поверхности и, следовательно, высоту растения. 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. Осуществляется расчет кросс-корреляции между данными датчиков контактных и дистанционных измерений с БПЛА.

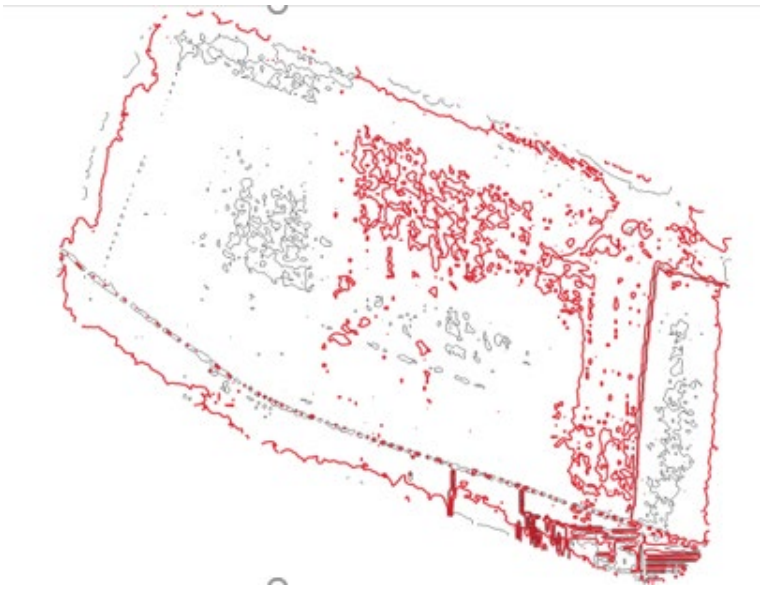


Рис. 1. Пример построения изолиний по измерениям температуры поверхности с БПЛА

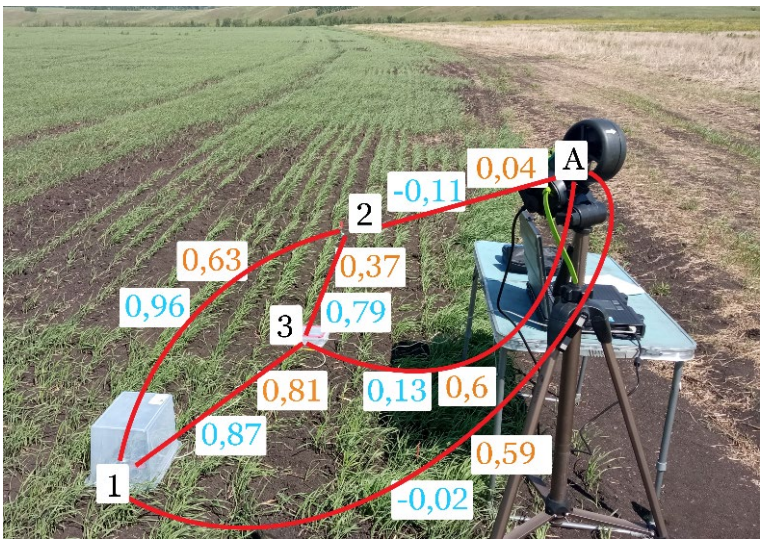


Рис. 2. Коэффициенты кросс-корреляции между датчиками на поверхности почвы. Красный цвет – по температуре воздуха; синий цвет – по влажности воздуха

Также в измерительном эксперименте применяется электронный анемометр на разноуровневом штативе, от 50 см до 2 м от поверхности (А), что соответствует стандартной высоте метеонаблюдений. Контроль содержания хлорофилла в листьях растений осуществляется с применением *N*-тестера (CCM-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*, *ClGreen*, *NDRE*) посевов с помощью *DJI Matrice* 210 (*Zenmuse XT*2) и Геоскан-201 (мультиспектральной камерой *MicaSense RedEdge-MX*) на различных интервалах вегетационного периода в 2023 г.

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 [1; 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. 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.

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 [2, 3, 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.

Методические основы изучения закономерностей регионального проявления взаимодействия между климатическими и биологическими условиями основаны на данных ДЗЗ по основным сельхозкультурам, выращиваемым на тестовых участках территории Красноярского края, гидрометеорологических данных и данных измерений термодинамических параметров *in situ*.

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. Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q., Mao, Q. A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. Agriculture 2025, 15(9), 903

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. 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.

4. Pereira, J., Gomes, M. G. Lighting strategies in vertical urban farming for enhancement of plant productivity and energy consumption. Applied Energy 2025, 377, 124669.

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

6. 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 6.

7. Rahman, H.; Shah, U. M.; Riaz, S. M.; Kifayat, K.; Moqurrab, S. A.; Yoo, J. Digital twin framework for smart greenhouse management using next-gen mobile networks and machine learning. Future Generation Computer Systems 2024, 156, 285–300.

8. Chaux, J. D., Sanchez-Londono, D., Barbieri, G. A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. Applied Sciences 2021, 11(19), 8875.

9. Картушинский А. В., Картушинский С. А., Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В. Экспериментальное изучение влияния мелкомасштабных агроклиматических флуктуаций на ростовые характеристики посевов и сравнение с данными беспилотных измерений // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023).

A. V. Kartushinsky[1], S. A. Kartushinsky[2], I. Yu. Botvich[3]
[1, 2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1, 3]Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[1]kartalvas@rambler.ru, [2]kartushka@mail.ru

ON THE ASSESSMENT OF SPATIAL-TEMPORAL SCALES OF VARIABILITY OF THERMODYNAMIC PARAMETERS IN THE THIN GROUND LAYER BASED ON REMOTE SENSING AND CONTACT DATA

Abstract. The paper discusses the problem of assessing the influence of the thermodynamic state of the air on plant productivity in the ground layer at the level of agricultural crop growth using the Minino experimental field (Krasnoyarsk Krai) as an example. The possibility of assessment based on meteorological parameters measured by the contact method and on remote measurement data using unmanned aerial vehicles of the aircraft type (UAVs) and drones (quadcopters) with the ability to hover over the study area is considered. The main focus of the work is on the possibility of assessing statistically substantiated relationships between meteorological parameters such as air temperature and humidity, atmospheric pressure and wind speed measured by the contact method in microclimatic conditions and data on the earth's surface

temperature, as well as vegetation indicators based on remote sensing data. To improve mathematical models for modeling the influence of environmental factors at a small-scale level, the influence of physical factors is assessed based on the spatio-temporal scales of variability of thermodynamic conditions on the growth of agricultural crops during the growing season using wheat crops as an example.

Keywords: microclimate, weather, vegetation index, crop yield, thermodynamic parameters, UAVs, drones, spectral measurements

УДК 528.88

Д. А. Кобец[1], И. А. Сайгин[2], И. А. Уваров[3]
[1, 2, 3]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]kobets@d902.iki.rssi.ru, [2]saigin@d902.iki.rssi.ru, [3]uvarov@d902.iki.rssi.ru

СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ *BI*-ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Описываются интерактивные отчетные формы, созданные для анализа временных рядов карт растительного покрова и метеорологических данных в рамках гидрологических границ глобальных водосборов (*Hydro BASIC*) на территории РФ. Формы позволяют пользователю прямо из веб-интерфейса проводить работу с данными, организованными в виде многомерного *OLAP*-куба. Измерения *OLAP*-куба могут быть отображены в виде строк и столбцов таблиц, осей графиков, легенды карт, а также отдельно в виде набора фильтров. Пользователь может извлекать из куба некоторые сечения и анализировать данные, содержащиеся в них. Полученные агрегированные данные могут быть сохранены, после чего пользователь может продолжить работу с ними на локальном компьютере.

Ключевые слова: *Hydro BASIC*, *BI*, *OLAP*, растительный покров, метеорологические данные

При решении различных задач с применением данных дистанционного зондирования Земли зачастую возникает необходимость получения каких-либо агрегированных характеристик исследуемых объектов. Это могут быть как площадные характеристики различных классов поверхности, находящихся в заданных границах, в роли которых могут выступать административные границы, границы бассейнов, водосборов и т. п., так и агрегированные значения параметров какого-либо процесса. Для получения таких агрегированных характеристик часто используются *OLAP*-кубы и основанные на них механизмы *BI*-аналитики (*business intelligence*).

Настоящая работа посвящена созданию *BI*-инструментов для анализа временных рядов типов растительного покрова, интегрированных в информационные системы дистанционного мониторинга.

Описываемые в работе *BI*-инструменты были реализованы на базе программно-аналитического комплекса *Contour BI* версии 6.2. Комплекс включает в себя следующие части:

– *Portal* – в соответствии с правами конкретного пользователя предоставляет доступ к предварительно настроенным интерактивным отчетам через веб-интерфейс;

– *Reporter* – предоставляет инструменты для разработки интерактивных отчетов: подключение различных источников данных, выборка данных

© Кобец Д. А., Сайгин И. А., Уваров И. А., 2025

для анализа, трансформация выбранных данных (например замена идентификаторов объектов их названиями, сортировка по названиям, привязка цвета и т. п.), построение на основе выбранных данных *OLAP*-куба, привязка к *OLAP*-кубу различных интерактивных отчетов (таблицы, карты, графики), группировка форм в дашборды; а также интерфейс менеджмента прав доступа к созданным отчетным формам;

– *Publisher* – утилита, периодически по расписанию либо в привязке к внешним событиям осуществляющая обновление *OLAP*-кубов, служащих источниками данных для интерактивных отчетов.

Одной из основных особенностей систем *BI*-аналитики является то, что они предоставляют в распоряжение пользователя обширный инструментарий, позволяющий ему прямо из веб-интерфейса запросить необходимые для анализа данные и просматривать полученные результаты через динамически формируемые интерактивные отчеты. Интерактивные отчеты предоставляют пользователю возможность самому решать, какие именно данные требуется использовать для решения стоящих перед ним задач анализа, и как эти данные необходимо организовать. Таким образом, имея в своем распоряжении сравнительно небольшое количество интерактивных отчетов, пользователь способен решать с их помощью широкий спектр аналитических задач, перестраивая их под свои нужды.

В информационной системе «Вега-Гидро» (*http://hydro.geosmis.ru/*) на основе временных рядов карт растительного покрова [1], а также данных реанализа модели *Climate Forecast System Version* 2 (*CFSv*2) *NCEP* [2] в рамках границ глобальных водосборов (*Hydro BASIC*) [3], для каждого водосбора были рассчитаны соответственно ежегодные площади классов растительного покрова (с 2001 по 2024 г.), а также ежесуточные данные о средней температуре и количестве осадков (с 1 января 2001 г. по настоящее время). На основе полученной информации был сформирован набор данных, доступ к которому был организован посредством интерфейсов *BI*-аналитики.

В качестве примера на рис. 1 приведена табличная аналитическая форма с ежегодными характеристиками водосборов, в частности метеопараметры приведены как накопленные характеристики (при подсчете накопленных температур учитывались только положительные значения выше 0 °C). Названия бассейнов и идентификаторы групп бассейнов составляют измерения строк первого и второго уровня вложенности, соответственно годы, группы и классы характеристик – измерение столбцов первого, второго и третьего уровня. Пользователь прямо в веб-интерфейсе может менять местами уровня вложенности измерений, а также переносить их из строк в столбцы и обратно. Каждое измерение может быть отфильтровано по интересующим пользователя значениям.

На рис. 2 приведен пример картографической формы, где к описанным выше измерениям также добавлены производные характеристики от идентификатора границы водосбора (*Hybas_id*): регионы (первая цифра идентификатора), уровень Пфафштеттера (вторая и третья цифра) и *hybas_shed* (с четвертой по девятую цифру). На карте включен слой,

наглядно показывающий преобладающие типы растительного покрова для каждого водосбора.

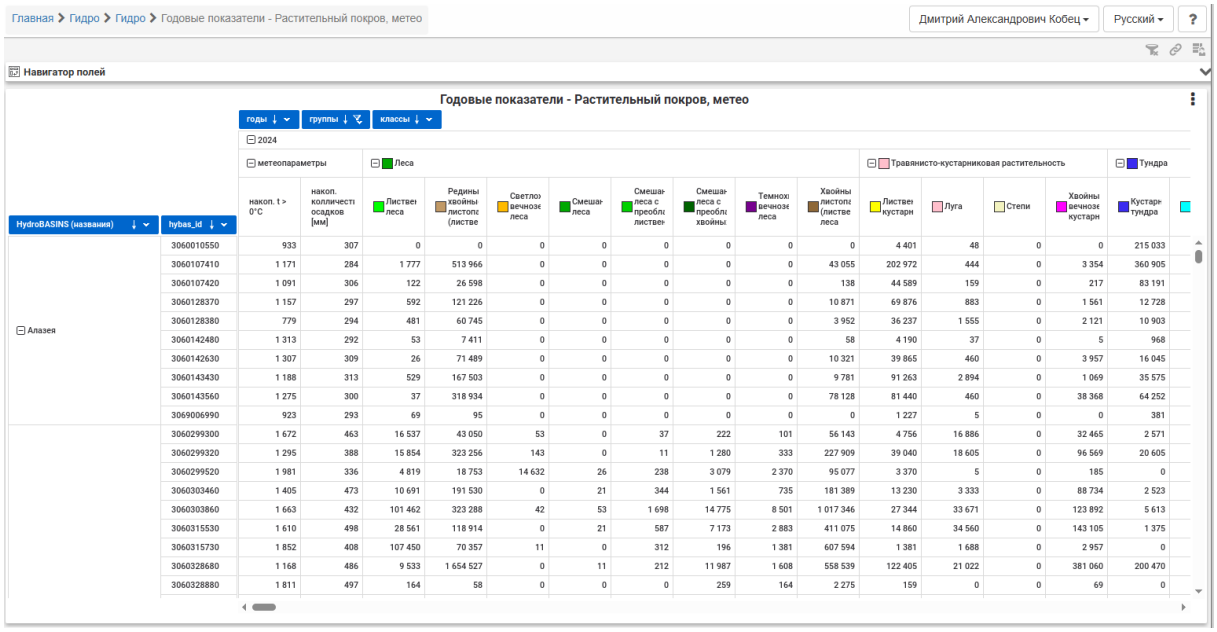


Рис. 1. Табличная интерактивная аналитическая форма с ежегодными характеристиками водосборов

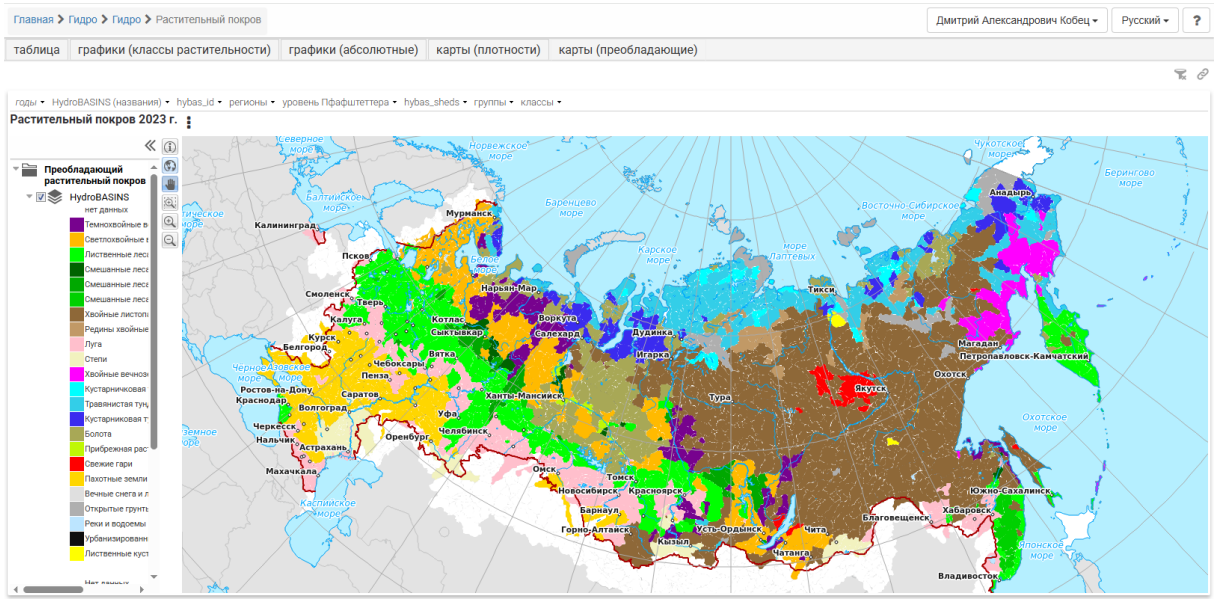


Рис. 2. Картографическая интерактивная аналитическая форма, показывающая преобладающие классы растительного покрова в границах водосборов

Все данные, используемые в формах, могут быть выгружены пользователем для дальнейшего анализа на локальный компьютер.

Список источников

1. Барталев С. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.

2. Saha, S. The NCEP climate forecast system version 2 // Journal of climate. 2014. Т. 27. № 6. С. 2185–2208.

3. Linke S. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // Scientific data. 2019. Т. 6. № 1. С. 283.

D. A. Kobets[1], I. A. Saygin[2], I. A. Uvarov[3]
[1, 2, 3]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]kobets@d902.iki.rssi.ru, [2]saigin@d902.iki.rssi.ru, [3]uvarov@d902.iki.rssi.ru

CREATION OF TOOLS FOR ANALYZING THE RESULTS OF MAPPING TIME SERIES OF VEGETATION COVER AND METEOROLOGICAL DATA BASED ON BI-TECHNOLOGIES

Abstract. The paper describes interactive reporting forms created to analyze time series of vegetation maps and meteorological data within the hydrological boundaries of global watersheds (Hydro BASIC) in the territory of the Russian Federation. Forms allow the user to work directly from the web interface with data organized in the form of a multidimensional OLAP cube. The dimensions of an OLAP cube can be displayed as rows and columns of tables, graph axes, map legends, and separately as a set of filters. The user can extract some sections from the cube and analyze the data contained in them. The aggregated data received can be saved, after which the user can continue working with them on the local computer.

Keywords: Hydro BASIC, BI, OLAP, vegetation cover, meteorological data

УДК 528.852

П. А. Колбудаев[1], Д. Е. Плотников[2]
[1, 2]Институт космических исследований, Москва, Россия
[1]kolbudaev@d902.iki.rssi.ru

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ И УЛУЧШЕНИЯ ПРОДУКТА *SCL SENTINEL-2* НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Автоматическая независимая оценка тематической точности сопровождающих данные ДЗЗ стандартных продуктов на уровне сцен важна при создании продуктов высокого уровня и решении тематических задач, связанных с распознаванием мешающих факторов. В настоящей работе представлен автоматический метод объективной оценки тематической точности стандартного продукта *SCL* (*Scene Classification Land*), распространяемого на уровне сцен *Sentinel-2* (*MSI*) уровня *L2A*. Ключевым преимуществом созданного метода является минималистичность и простота переноса ввиду опоры на данные двух спектральных каналов (зеленого и ИК). В основе метода лежит использование модели *Random Forest*, построенной с помощью параметризованных текстурных признаков *GLCM*. Было показано, что значение метрики *F1-score* для классов разметки *SCL* модели *Random Forest* является информативным индикатором тематической точности разметки и позволяет в автоматическом режиме идентифицировать участки, пригодные для дальнейшей работы. Разработанный подход дает возможность автоматически создать разметку высокого качества для обучения нейросетевой модели *Attention-Unet* для территории России и повысить точность выявления облачности и теней по сравнению со стандартным продуктом *SCL*.

Ключевые слова: *Sentinel-2*, *SCL*, *GLCM*, текстурные признаки, машинное обучение, свёрточные нейронные сети

Предварительная обработка спутниковых данных является ключевым этапом при создании продуктов высокого уровня, обеспечивая корректное восстановление безоблачных временных рядов спутниковых измерений [1], а также необходимые условия для картографирования растительного покрова [2–6], оценки его состояния [7–11] и биофизических характеристик [12; 13]. При работе с масками облачности, теней и других мешающих факторов, распространяемых в качестве стандартного продукта для спутниковых систем, таких как *Sentinel-2A/B/C*, может возникнуть вопрос достоверности продукта и необходимость независимой оценки его тематической точности. Особый интерес могут представлять методы и подходы, не требующие экспертного участия для применения в автоматическом режиме и опирающиеся на минимальный набор спектральных каналов, которые могут быть во всех системах ДЗЗ.

В настоящей работе описывается разработка такого метода на примере спутниковой системы *Sentinel-2* (*MSI*), для которой распространяется

© Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., 2025

продукт *SCL* (*Scene Classification Land*) [14]. Прибор *MSI* работает в 13 спектральных каналах, охватывающих широкий диапазон длин волн с пространственным разрешением от 10 до 60 м в зависимости от длины волны, и спутниковая система имеет период повторения наблюдений около 5 дней.

Продукт *SCL* в легенде содержит следующие классы: чистая поверхность, как связанная с вегетацией, так и безрастительная, тени от облачности и топографические тени, вода, облачность различного типа и вероятности облачности, а также снег. Одной из особенностей продукта является значительное количество пикселей с кодом *unclassified* (неклассифицированные) которые могут соответствовать как чистой поверхности, так и различным мешающим факторам. Визуальный анализ в ряде случаев указывает на изменение тематического качества *SCL* даже вдоль одного пролета спутника, при этом проблемы нередко сопровождают класс теней от облачности (рис. 1).

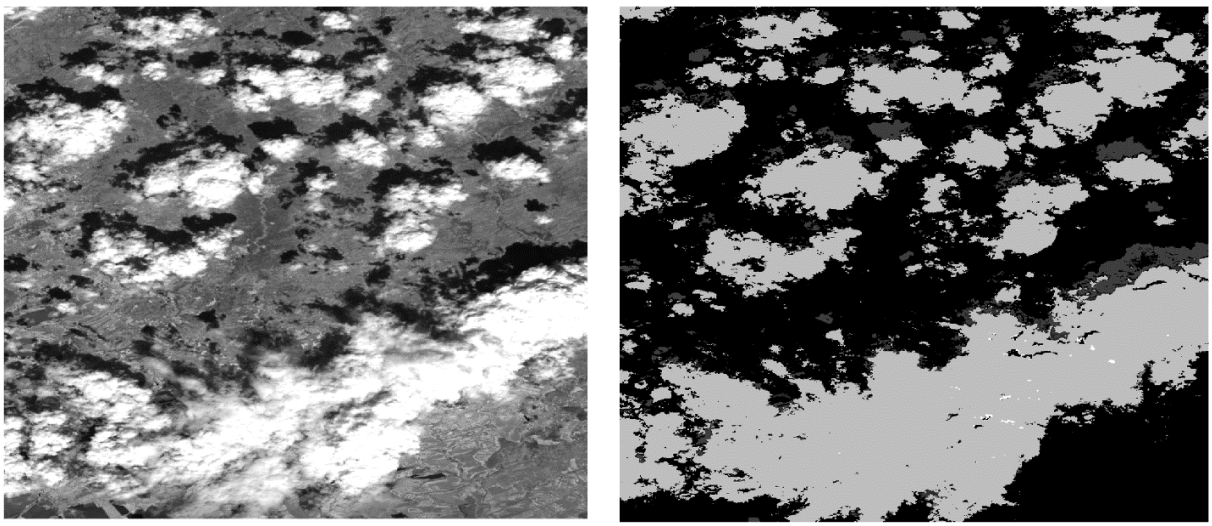


Рис. 1. Пример части сцены *MSI* в канале *NIR* (слева) и соответствующего покрытия *SCL* (справа), где наблюдаются очевидные пропуски при детектировании теней (темно-серый цвет)

В настоящей работе использовалась тематически загрубленная маска, полученная путем объединения всех типов облачности в единый класс облачности, аналогично – для класса теней и чистой поверхности, в то время как классы воды и снега оставлены без изменений. Все пиксели с кодом *unclassified* были объединены с участками снимка (с кодом «нет данных»).

С целью независимой оценки точности тематически загрубленного продукта *SCL* в работе использовались текстурные признаки типа *GLCM* (*Grey Level Co-Occurrence Matrix*) [15] *Contrast*, *Dissimilarity*, *Homogenity*, *Energy*, *Correlation* и *Entropy*, вычисляемые на основе измерений в зеленом, красном и ИК спектральных каналах и использующие контекстную информацию об окружении пикселя. Для расчета *GLCM*-метрик необходимо задать параметры *Patch_Size* и *Distance*, которые характеризуют размер контекстного окна и его сдвиг относительно исходного положения и определя-

ются тематической задачей. Одной из целей исследования являлось объективное определение оптимального сочетания этих параметров, при котором становится возможным дифференцировать участки покрытия *SCL* различного тематического качества. С этой целью экспертным путем были отобраны 10 пар сцен *Sentinel-2* периода наблюдения территории России в 2021 г. с наиболее и наименее точной разметкой *SCL*, таким образом, чтобы снимки каждой пары соответствовали примерно одной и той же территории, снятой примерно в один период времени с целью минимизации изменений условий наблюдения, освещения и возможной динамики растительного покрова (рис. 2).

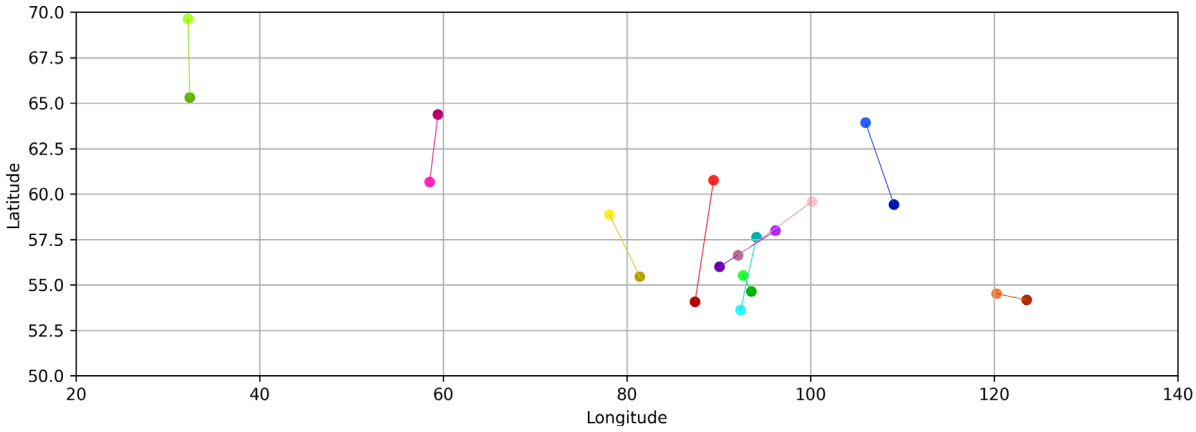


Рис. 2. Схема взаимного положения пар сцен *Sentinel-2*, используемых для оценки параметров *GLCM*-метрик

Индикатором информативности *GLCM*-метрики являлась величина изменения значения *F1-score* на тестовой подвыборке разметки *SCL* с использованием классификатора *Random Forest* при сравнении внутри пар с последующим осреднением между парами при различных сочетаниях *Patch_Size* и *Distance*. Сочетание параметров, максимизирующее различие *F1-score* между «хорошими» и «плохими» примерами разметки *SCL* выбиралось в качестве оптимального. В табл. 1 представлено среднее значение разности *F*1-*score* по классу *SCL* «тени», указывая на оптимальное сочетание *Patch_Size*=10, *Distance*=1. Такое же сочетание параметров оказалось оптимальным для классов «все классы» и «все, кроме снега». Найденное сочетание далее использовалось при формировании *GLCM*-метрик и дальнейшей автоматической обработке сцен *Sentinel-2*.

С целью оптимизации была оценена информативность спектральных каналов, на основе которых были построены *GLCM*-метрики и были отобраны шесть наиболее важных текстурных признаков, причем для их вычисления необходимо использование только двух спектральных каналов, зеленого и ИК, что делает разработанный подход легковесным, минималистичным и простопереносимым, поскольку указанные каналы имеются практически во всех приборах дистанционного зондирования Земли.

Таблица 1

Средняя разница двух классов масок *SCL* по теням (сверху слева), всем классам за исключением снега (сверху справа) и по всем класса (снизу)

	***Distance* = 1**	***Distance* = 3**	***Distance* = 5**	***Distance* = 7**	***Distance* = 10**
Patch=5	0,281	0,212	0	0	0
Patch=10	0,334	0,321	0,317	0,282	0
Patch=15	0,326	0,331	0,331	0,325	0,288
Patch=20	0,326	0,331	0,331	0,328	0,317
Patch=25	0,32	0,326	0,324	0,316	0,313
Patch=30	0,321	0,328	0,319	0,321	0,311
Patch=35	0,308	0,315	0,317	0,313	0,309
Patch=40	0,286	0,293	0,292	0,292	0,292

На основе описанного подхода были автоматически обработаны сцены *Sentinel-2*, разбитые на участки размером 512 × 512 пикселей, соответствующие различным регионам России за разные месяцы и сезоны 2021 г. Для каждого участка были рассчитаны на тестовой подвыборке разметки *SCL* значения метрик *F1-score* в модели с *GLCM*-метрикам по классам «чистая поверхность», «тени», «вода и облачность» на основе обученного локально для каждой области классификатора *Random Forest*.

На рис. 3 представлен пример сцены и «плохой» разметки по классу «тени», что подтверждается низким значением *F1* модели *GLCM* на классе «тени» (18 %), а на рис. 4 представлен пример сцены и «хорошей» разметки по классу «тени» (*F1* = 76 %).

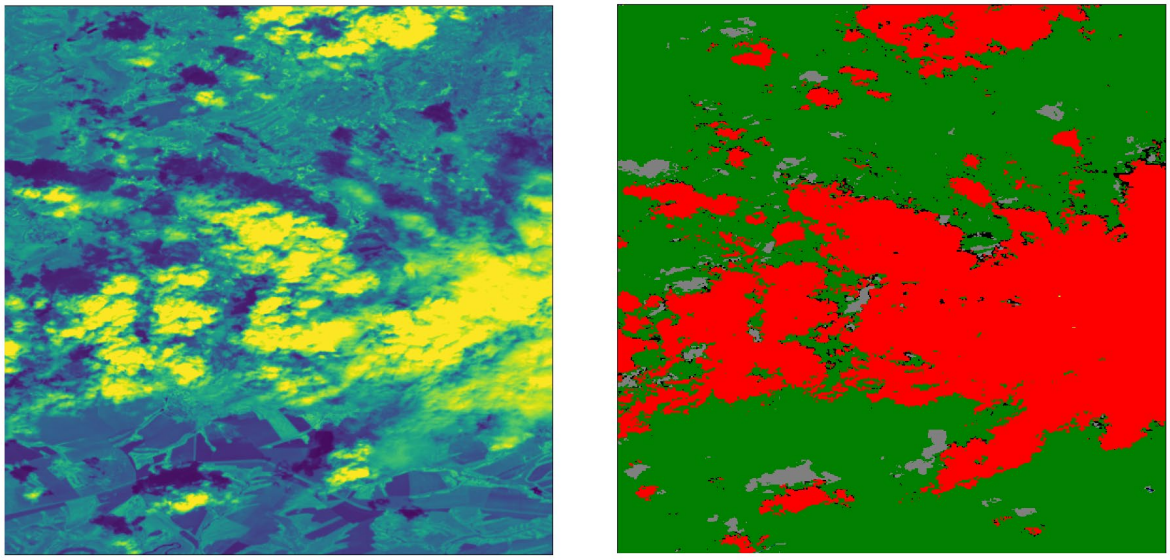


Рис. 3. «Плохая разметка»: часть сцены *MSI* в ИК-канале (слева) и соответствующее покрытие *SCL*: зеленый цвет – чистая поверхность (*F*1 = 92 %); серый цвет – тени (*F*1 = 18 %); красный цвет – облачность (*F*1 = 90 %); черный цвет – *unclassified*

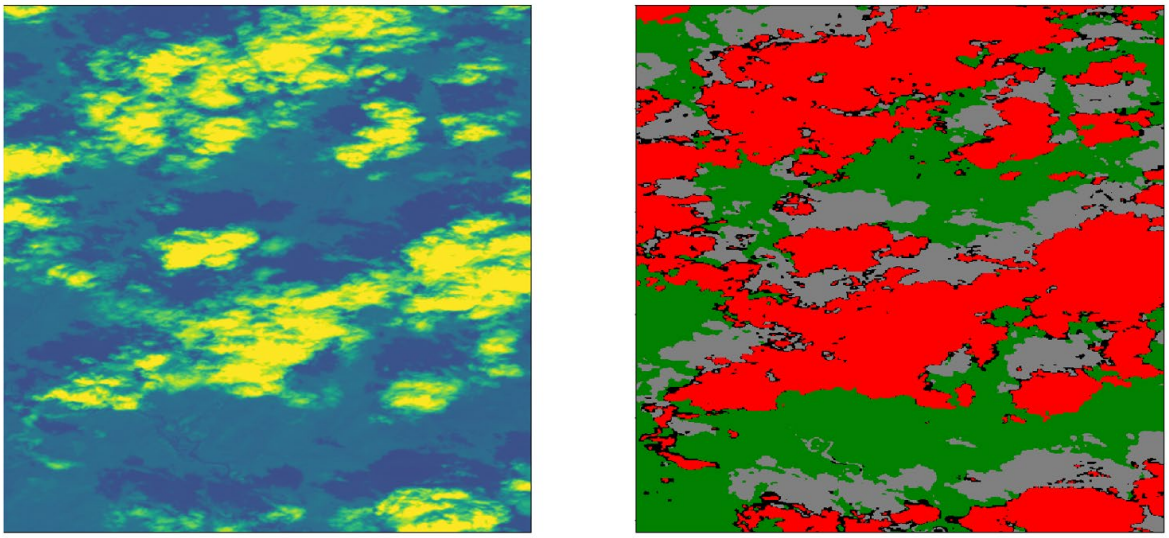


Рис. 4. «Хорошая разметка»: часть сцены *MSI* в ИК канале (слева) и соответствующее покрытие *SCL*, палитра идентична рис. 2, для чистой поверхности *F*1=85 %, для теней *F*1=76 %, для облачности *F*1=92 %

В результате работы описанного метода на всей территории России были автоматически идентифицированы участки с наиболее высоким тематическом качеством *SCL* и собран набор данных для обучения сверточной нейронной сети *Attention Unet*.

После обучения нейросети стало возможным улучшить качество стандартных продуктов *SCL*. На рис. 5 представлен пример исходной сцены *Sentinel-2*, исходной разметки *SCL* и результат работы нейросети: внутри прямоугольника наблюдается корректное детектирование теней от облачности, в отличие от исходной разметки *SCL*.

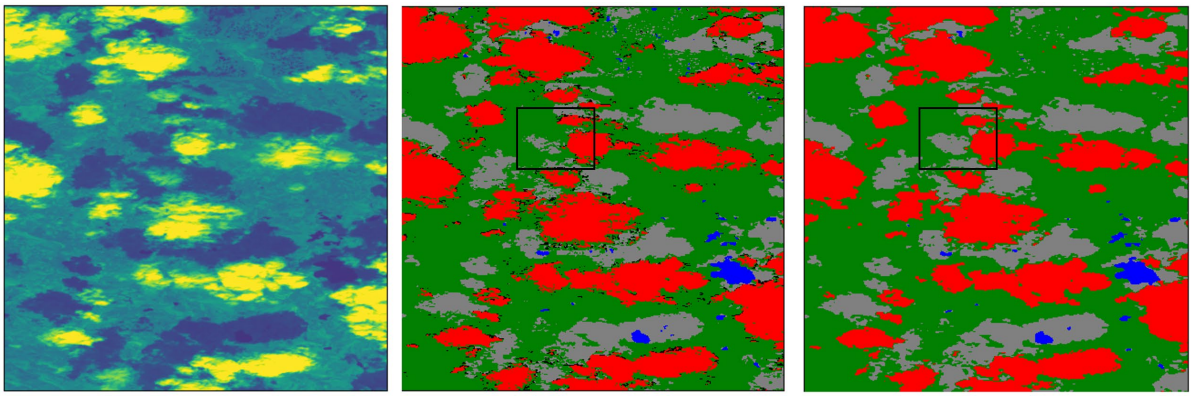


Рис. 5. Часть сцены *Sentinel-2* (слева), соответствующее ей покрытие *SCL* (центр) и результаты работы нейросети *Attention-Unet*

Таким образом, в рамках исследования разработан метод независимой автоматической оценки качества тематического продукта *SCL* на основе текстурных признаков *GLCM*. Показано, что информативные метрики могут быть построены на основе шести наиболее важных текстурных признаков, которые вычисляются на основе только двух спектральных каналов, что означает простую переносимость разработанного метода и его техническую

применимость к любым системам ДЗЗ. Автоматическим образом была создана обучающая разметка высокого тематического качества по классам: «чистая поверхность», «облачность», «тень», «вода». Обучена нейросетевая модель архитектуры *Attention-Unet*, обеспечившая уточнение стандартного продукта *SCL*.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Список источников

1. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A., Loupian E., Proshin A. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE proceedings of ITNT 2022. VIIIth International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IEEE, 2022. P. 9848630. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

2. Sabaghy S., Abuzar M., Crawford D., McAllister A., Sheffield K. Remote sensing for land cover mapping across Victoria, Australia – a machine learning application // Sci Data 12, 566 (2025). https://doi.org/10.1038/s41597-025-04900-5.

3. Hermosilla T., Wulder M. A., White J. C., Coops N. C. Land cover classification in an era of big and open data: Optimizing localized implementation and training data selection to improve mapping outcomes // Remote Sensing of Environment, Volume 268,2022, 112780,ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112780.

4. Matyukira C., Mhangara P. Advances in vegetation mapping through remote sensing and machine learning techniques: a scientometric review. European Journal of Remote Sensing, 2024, 57(1). https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2422330.

5. Плотников Д. Е., Бойматов Ю. Ш., Елкина Е. С., Щербенко Е. В., Плотникова А. С. Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.

6. Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.

7. Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Медведева М. А., Плотников Д. Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 1. С. 150–162.

8. Середа И. И., Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.

9. Лупян Е. А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю. С., Плотников Д. Е., Толпин В. А., Уваров И. А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

10. Дунаева Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Ёлкина Е. С., Барботкина Е. С., Вечерков В. В., Барталев С. А. Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 4 (20). С. 28–45. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.

11. Страшная А. И., Барталев С. А., Максименкова Т. А., Чуб О. В., Толпин В. А., Плотников Д. Е., Богомолова Н. А. Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014. № 351. С. 85–107.

12. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.

13. Плотников Д. Е., Чжоу Ц., Колбудаев П. А., Лупян Е. А., Матвеев А. М., Зимин М. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Лебедев С. В. Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49. № 3. С. 504–516. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.

14. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/scene-classification/.

15. Iqbal N, Mumtaz R, Shafi U, Zaidi SMH. Gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture based crop classification using low altitude remote sensing platforms // PeerJ Comput Sci. 2021 May 19;7:e536. doi: 10.7717/peerj-cs.536. PMID: 34141878; PMCID: PMC8176538.

P. A. Kolbudaev[1], D. E. Plotnikov[2]
[1,2] Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]kolbudaev@d902.iki.rssi.ru

THE METHOD FOR AUTOMATIC EVALUATION AND IMPROVEMENT OF THE SCL SENTINEL-2 PRODUCT BASED ON TEXTURE FEATURES AND MACHINE LEARNING

Abstract. The development of an automatic method for assessing thematic products distributed with remote sensing data is great importance for further image processing and the creation of various products based on them. This paper describes a method for automatically assessing for local and global quality of the SCL product distributed with data from MSI instruments onboard satellites the Sentinel-2. The key advantage of the developed method is the use of data in only two spectral channels - green and NIR. The method is based on the calculation of GLCM texture features and their use in training and testing of the Random Forest classifier on test data. The f-score metrics calculated by the classifier on test data for individual classes and in aggregate enable to detect high-quality SCL masks.

Keywords: Sentinel-2, SCL, GLCM, Texture Features, Machine Learning, Convolutional Neural Networks

УДК 621.369.969

Л. М. Коренюгина
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
lkorenyugina@sfu-kras.ru

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Аннотация. В статье производится обзор современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), применяемые для поисково-спасательных операций в лесных экосистемах. В связи с ростом числа потерявшихся в лесах и увеличением частоты природных катастроф традиционные методы поиска становятся менее эффективными. Показано, что технологии ДЗЗ в сочетании с методами искусственного интеллекта позволяют значительно ускорить обнаружение пропавших, оптимизировать зоны поиска и повысить безопасность спасателей за счет дистанционного мониторинга. Оценивается эффетивность применения нейросетевых алгоритмов компьютерного зрения (*YOLO, Faster R-CNN*), мультиспектрального и теплового анализа, а также интеграции спутниковых данных, аэрофотосъемки и геоинформационных систем. Рассмотрены перспективные направления применения в поисково-спасательных операциях методов обработки данных в реальном времени и применение *IoT*-устройств. Дальнейшее развитие технологий требует решения таких задач, как обработка данных в условиях плохой видимости и создание полностью автономных систем поиска. Применение современных алгоритмов ДЗЗ открывает новые возможности для повышения эффективности и скорости поисково-спасательных операций в сложных природных условиях.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, поисково-спасательные операции, машинное обучение, нейронные сети, обработка изображений, лесные экосистемы

Введение. Рост числа потерявшихся в лесах (туристы, грибники, местные жители) и увеличение частоты природных катастроф (лесные пожары, наводнения) требуют совершенствования методов поиска [1]. Традиционные методы, такие как наземные поисковые группы и авиаразведка, обладают рядом ограничений: высокая трудоемкость, зависимость от погодных условий и значительные временные затраты. В этой связи дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) становится ключевым инструментом для оптимизации поисково-спасательных операций [2]. Развитие алгоритмов машинного обучения, компьютерного зрения и геоинформационных систем (ГИС) открывает новые перспективы для автоматизации поиска людей, техники и других объектов в условиях густой растительности, сложного рельефа и изменяющихся погодных условий [3].

Целью работы являлся обзор современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для повышения эффективности поисково-спасательных операций в лесных экосистемах. Для этого:

© Коренюгина Л. М., 2025

1) ***проведен анализ технологий ДЗЗ*** при мониторинге лесных территорий;

2) ***проведен обзор методов обработки данных*** для обнаружения людей, техники или следов их присутствия;

3) предложены пути внедрения ДЗЗ-технологий в оперативные работы (например, совместное использование с *GPS* и ГИС);

4) обозначены перспективные направления (например, использование *SAR*-радаров, мультиспектральной съемки или нейросетей реального времени).

Методы обработки. В последние годы активно разрабатываются методы обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радиолокационных данных, позволяющие выделять целевые объекты на фоне природного ландшафта [4]. Но обработка данных ДЗЗ в лесных массивах сопряжена с рядом вызовов: затрудненная детекция из-за плотного растительного покрова, теней и изменяющегося освещения; ложные срабатывания, вызванные природными объектами (камни, поваленные деревья, рельеф); влияние погоды (облачность, осадки, сезонные изменения); необходимость оперативной обработки больших объемов данных в режиме, близком к реальному времени [5]. На фоне увеличения количества пропавших в лесах людей и роста числа природных катаклизмов традиционные поисковые технологии демонстрируют снижение эффективности [6]. Современные алгоритмы ДЗЗ позволяют: сократить время обнаружения пропавших, минимизировать зоны ручного поиска и повысить безопасность спасателей за счет дистанционного мониторинга [7]. Комплексное использование ДЗЗ и искусственного интеллекта позволяет: сократить время обнаружения пострадавших в 2–3 раза, уменьшить площадь ручного обследования на 40–60 % и существенно повысить безопасность спасательных команд [9].

Результаты. Для автоматической детекции объектов возможно использование алгоритмов компьютерного зрения (*YOLO*, *Faster R-CNN*). Для решения задачи обнаружения людей, техники или временных укрытий производится анализ мультиспектральных данных для выявления аномалий (например, тепловые сигнатуры или повреждения растительности). Для обнаружения людей и следов их пребывания применяются нейросетевые модели: *YOLO (You Only Look Once)* – быстрая идентификация объектов в реальном времени; *Faster R-CNN* – высокая точность при анализе спутниковых и аэрофотоснимков; сегментация изображений *(U-Net)* – выделение областей, где возможны следы человека (тропы, повреждения растительности). Мультиспектральный и тепловой анализ производится с использованием тепловизоров (инфракрасные снимки), которые помогают находить людей ночью или в густых лесах. Анализ *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* выявляет нарушения в растительном покрове, указывающие на перемещение людей. Совместная обработка разнородных данных спутниковых снимков и данных с мобильных датчиков и применение *GIS*-технологий для построения карт вероятного местонахождения пропавших. Интеграция данных и геоаналитика производится с помощью ГИС-

технологий *(ArcGIS, QGIS), которые* позволяют совмещать данные ДЗЗ с картографической информацией. Обработка данных в реальном времени включает в себя применение потоковой аналитики (*Apache Kafka, NVIDIA Metropolis*), которая ускоряет обработку изображений с БПЛА и спутников, и использования облачных платформ, которые обеспечивают масштабируемость вычислений.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ методов детекции и обработки данных.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов детекции и обработки данных

Метод	**Точность (*F1-score*)**	**Время обработки**	**Устойчивость к Canopy**	**Работа ночью / в облаках**
Оптический (RGB) метод	0,6–0,8	Минуты	Низкая	Нет
Мультиспектральный метод	0,7–0,85	Десятки минут	Средняя	Частично
SAR (*Synthetic Aperture Radar* – радиолокатор с синтезированной апертурой)	0,5–0,7	Часы	Высокая	Да
LiDAR (*Light Detection and Ranging* – лазерное сканирование)	0,4–0,6	Часы	Высокая	Да
Тепловой метод	0,4–0,6	Минуты	Средняя	Да
ИИ (*U-Net* – свёрточная нейронная сеть, CNN)	0,8–0,9	Минуты–часы	Высокая	Да

Выводы: для эффективной обработки данных нужно комбинировать методы при различных условиях: в условиях дневного освещения использовать мультиспектральные анализ и технологии искусственного интеллекта, в сложных погодных условиях и в темное время съемки использовать радиолокатор с синтезированной апертурой (*SAR – Synthetic Aperture Radar*) и лазерное сканирование (*LiDAR – Light Detection and Ranging*).

Предсказание перемещения потерявшихся с учетом рельефа, погоды и поведения человека (на основе машинного обучения) и выделение зон повышенного риска (например, районы с высокой пожароопасностью) являются основой построения моделей поведения пострадавших и прогнозирования их действий [7]. Прогнозные модели на основе машинного обучения оценивают вероятные маршруты потерявшихся с учетом рельефа и погоды. Современные алгоритмы ДЗЗ значительно повышают эффективность поисково-спасательных операций в лесных экосистемах [8]. Их широкое внедрение требует решения таких задач, как обработка данных в условиях плохой видимости (дым, облачность) и обеспечение работы в условиях ограниченной связи [9]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание адаптивных систем, способных функционировать в сложных природных условиях.

В табл. 2 представлен анализ параметров работы методов и алгоритмов обработки данных, собранных в условиях плохой погоды.

Таблица 2

Анализ параметров работы методов и алгоритмов обработки данных, собранных в условиях плохой погоды

Метод / алгоритм	**Тип данных**	**Устойчивость к плохой погоде**	**Точность (*F1-score*)**	**Скорость обработки**
SAR (*Sentinel-1*, *TerraSAR-X*)	Радар (*C*/*L*-диапазон)	Высокая (облака, дождь, ночь)	0,65–0,80 (крупные объекты)	Часы (орбитальные циклы)
Оптика (*WorldView-3*, *Sentinel-2*)	Мультиспектральные (*RGB*+*NIR*)	Низкая (облака, дым)	0,70–0,85 (днем, ясно)	Минуты–часы
Тепловизоры (*FLIR*, *Landsat TIRS*)	Термальные (*LWIR*)	Средняя (дождь/туман снижают точность)	0,50–0,70 (живые цели)	Минуты
LiDAR (воздушное сканирование)	Лазерные точки (3*D*)	Средняя (дождь/снег мешают)	0,75–0,90 (под пологом леса)	Часы (зависит от площади)
Гибридные методы (*SAR* + оптическая обработка)	*Fusion* (радар + *RGB*)	Средняя (*SAR* компенсирует облака)	0,80–0,88	Часы
ИИ (*U-Net* – свёрточная нейронная сеть, *CNN*)	0,8–0,9	Минуты – часы	Высокая	Да

Заключение. Современные алгоритмы обработки данных ДЗЗ существенно повышают эффективность поисково-спасательных операций в лесах. Однако остаются вызовы, такие как обработка данных в сложных погодных условиях и необходимость дальнейшей автоматизации. Дальнейшее развитие технологий связано с внедрением нейросетевых моделей реального времени, способных обрабатывать потоковые данные с минимальной задержкой, интеграцией разнородных данных, включая социальные сети (анализ последних локаций по геотегам) и *IoT*-устройства (сигналы смартфонов, носимых датчиков), автоматизацией принятия решений на основе ИИ, что позволит сократить время реагирования и повысить точность поиска. Перспективы разработки специализированных алгоритмов, устойчивых к условиям ограниченной видимости (дым, облачность, ночное время) и способных работать в режиме реального времени на мобильных устройствах, развитие технологий ИИ и *IoT* открывает новые возможности для спасения людей в критических ситуациях.

Список источников

1. Князева С. В., Никитина А. Д., Белова Е. И., Плотникова А. С., Подольская Е. С., Ковганко К. А. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне // Журнал «Лесоведение». 2021. № 6.

2. Дмитриев Е. В., Кондранин Т. В., Мельник П. Г., Донской С. А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 31–50.

3. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Кашницкий А. В., Бурцев М. А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.

4. Mark Everingham, S. M. Ali Eslami, Luc Van Gool, Christopher K. I. Williams, John Winn, Andrew Zisserman. The Pascal Visual Object Classes Challenge – a Retrospec- tive. International Journal of Computer Vision manuscript No. 111, 98-136 (2015). doi:10.1007/s11263-014-07335.

5. Маглинец Ю. А., Цибульский Г. М., Носков М. В. Современные тенденции в построении региональных систем ДЗЗ. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016 9 (7). Красноярск, СФУ, 2016.

6. Кузнецова А. С., Краснощеков К. В., Дергунов А. В. и др. Моделирование водной эрозии с использованием уравнения RUSLE в масштабе землепользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 3. С. 145–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-145-154.

7. Черемисин М. В., Бурков В. Д. Метод комплексного мониторинга лесов на основе оптических и радиолокационных данных ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10 № 4. С. 262–273.

8. Топольский Н. Г., Береснев Д. С., Рыженко А. А. Концепция информационно-аналитического обеспечения управления поисково-спасательными работами // Технологии техносферной безопасности. 2015. Вып. 4 (62). 8 с. URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-4/40-04-15.ttb.pdf.

9. Береснев Д. С. Планирование при проведении поисково-спасательных работ в природной среде // Материалы 4-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2015». М., 2015. С. 488–493.

L. M. Korenyugina
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
lkorenyugina@sfu-kras.ru

REVIEW OF MODERN METHODS OF PROCESSING REMOTE SENSING DATA FOR SEARCH AND RESCUE OPERATIONS IN FOREST ECOSYSTEMS

Abstract. The article provides an overview of modern methods of processing Earth remote sensing (ERS) data used for search and rescue operations in forest ecosystems. Due to the growing number of people lost in forests and the increasing frequency of natural disasters, traditional search methods are becoming less effective. It is shown that ERS technologies in combination with artificial intelligence methods can significantly speed up the detection of missing persons, optimize search areas and increase the safety of rescuers through remote monitoring. The effectiveness of using neural network algorithms of computer vision (YOLO, Faster R-CNN), multispectral and thermal analysis, as well as the integration of satellite data, aerial photography and geographic information systems is assessed. Promising areas of application of real-time data processing methods and the use of IoT devices in search and rescue operations

are considered. Further development of technologies requires solving such problems as data processing in poor visibility conditions and the creation of fully autonomous search systems. The use of modern ERS algorithms opens up new opportunities for increasing the efficiency and speed of search and rescue operations in difficult natural conditions.

Keywords: Earth remote sensing, search and rescue operations, machine learning, neural networks, image processing, forest ecosystems

УДК 004.93:528.854

И. М. Лазарева[1], О. И. Ляш[2], Е. В. Скалабан[3], Ю. А. Логинова[4], Н. В. Ткачев[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия
[1]lazareva.im@mauniver.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В данной работе представляется программная реализация количественной оценки здоровья и плотности растительности на территории Мурманской области на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса. В анализе используются данные мультиспектральных снимков *Landsat-8.* Программная реализация представленного решения выполнена на языке *Python* с использованием библиотек работы с пространственными данными и их визуализации, и автоматизирует процесс определения спектрального индекса *NDVI*, начиная с загрузки спутникового снимка до отображения растительных зон на карте Мурманской области. Созданное решение позволяет эффективно отслеживать изменения в растительных сообществах Мурманской области и может быть использовано для научных исследований и практического применения.

Ключевые слова: спутниковые данные, *Landsat-8*, разработка программного обеспечения, индекс растительности *NDVI*, Арктический регион

Введение. Мониторинг растительного покрова с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – значимое направление в экологии, климатологии и управлении природными ресурсами. Для Мурманской области, где преобладают уязвимые арктические и субарктические экосистемы, подобные исследования особенно актуальны. Они позволяют отслеживать динамику изменения типа растительности, оценивать антропогенное воздействие и последствия климатических изменений.

Мурманская область, расположенная в северо-западной части России, характеризуется разнообразными типами растительности: от северной тайги до тундровых сообществ. Изучение динамики растительного покрова в этом регионе имеет особое значение для понимания процессов климатических изменений и их последствий для арктических экосистем.

Современные методы анализа спутниковых данных обеспечивают высокую точность оценки растительного покрова и возможность автоматизации процесса анализа, что делает их незаменимыми инструментами для решения задач мониторинга состояния арктических экосистем [1; 2].

В настоящем исследовании определение типа растительности осуществлялось на основе анализа данных мультиспектральных снимков спутника *Landsat-8*. Использование алгоритмов расчета спектральных индексов

© Лазарева И. М., Ляш О. И., Скалабан Е. В., Логинова Ю. А., Ткачев Н. В., 2025

позволило автоматизировать процесс оценки качества растительного покрова и оценить динамику изменения растительных зон. Описанный подход был реализован на языке *Python* с использованием библиотек работы с пространственными данными и их визуализации. Полученный результат отображается средствами георесурса *NextGIS*.

Данные и инструменты. В качестве источника данных были выбраны данные спутника *Landsat-8*, который обеспечивает регулярное покрытие территории Мурманской области (период повторной съемки – 16 дней), формирует данные в 11 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 100 метров [3].

Для получения снимков со спутника *Landsat-8* использовался открытый сервис *Earth Explorer* (*https://earthexplorer.usgs.gov/*), который предоставляет *API* для автоматизированной загрузки данных в формате *GeoTIFF*. Формируется запрос, включающий следующие параметры: координаты территории, дату съемки и уровень облачности. При получении спутниковых снимков выбираются данные, содержащие значения красного и ближнего инфракрасного каналов, которые необходимы для расчета нормализованного относительного индекса растительности (*NDVI*).

В данной работе для программной реализации мониторинга растительного покрова по спутниковым данным был выбран язык программирования *Python*. Для работы с растровыми данными использовались библиотеки *Rasterio* и *GDAL*, для математических вычислений – библиотеки *NumPy* и *SciPy*, для визуализации результатов – библиотеки *Matplotlib* и *Seaborn*, для составления *HTTP*-запросов – библиотека *Requests*, и библиотека *Geopandas* – для работы с геопространственными данными.

Визуализация полученных в результате анализа данных осуществляется посредством интерфейса университетского геоинформационного сервиса, реализованного на базе платформы *NextGIS*. *NextGIS* поддерживает *API* для интеграции обработанных данных и отображения их на веб-картах.

Результаты. В рамках проведенного исследования было создано программное решение для анализа спутниковых снимков территории Мурманской области, состоящее из трех логических модулей, взаимодействующих через обмен данными.

Модуль скачивания снимков взаимодействует с платформой *Earth Explorer* для получения спутниковых снимков на основе разработанного автоматического запроса. В результате модуль выдает скачанные снимки в формате *GeoTiff*, пригодном для дальнейшей обработки.

В модуле расчета и отображения *NDVI* происходит обработка полученных снимков. Модуль вычисляет вегетационный индекс *NDVI* на основе значений спектральных каналов. В результате модуль выдает растровые изображения с рассчитанным *NDVI* в каждом пикселе. Цвет пикселя соответствует выбранным порогам значения индекса.

Модуль загрузки изображений отвечает за публикацию обработанных данных на университетском геосервисе. Он преобразует результаты в формат, совместимый с геосервисом, и визуализирует их, обеспечивая доступность для пользователей.

Модули работают последовательно: скачивание → обработка → публикация. Каждый модуль передает выходные данные следующему, образуя автономный процесс.

Веб-интерфейс системы реализован как единая страница с формой ввода параметров, обеспечивающая простое взаимодействие пользователя с модулем обработки спутниковых данных. Основными элементами управления являются: кнопка автоматического заполнения координат для Мурманской области, кнопка отображения цветовой шкалы *NDVI* и информационное поле для вывода сообщений системы.

Пользователь получает доступ к визуализированным данным, пример которых представлен на рис. 1, через предоставленную ссылку на веб-карту, на которой имеется возможность ознакомиться с распределением растительного индекса в выбранном регионе за указанный период.

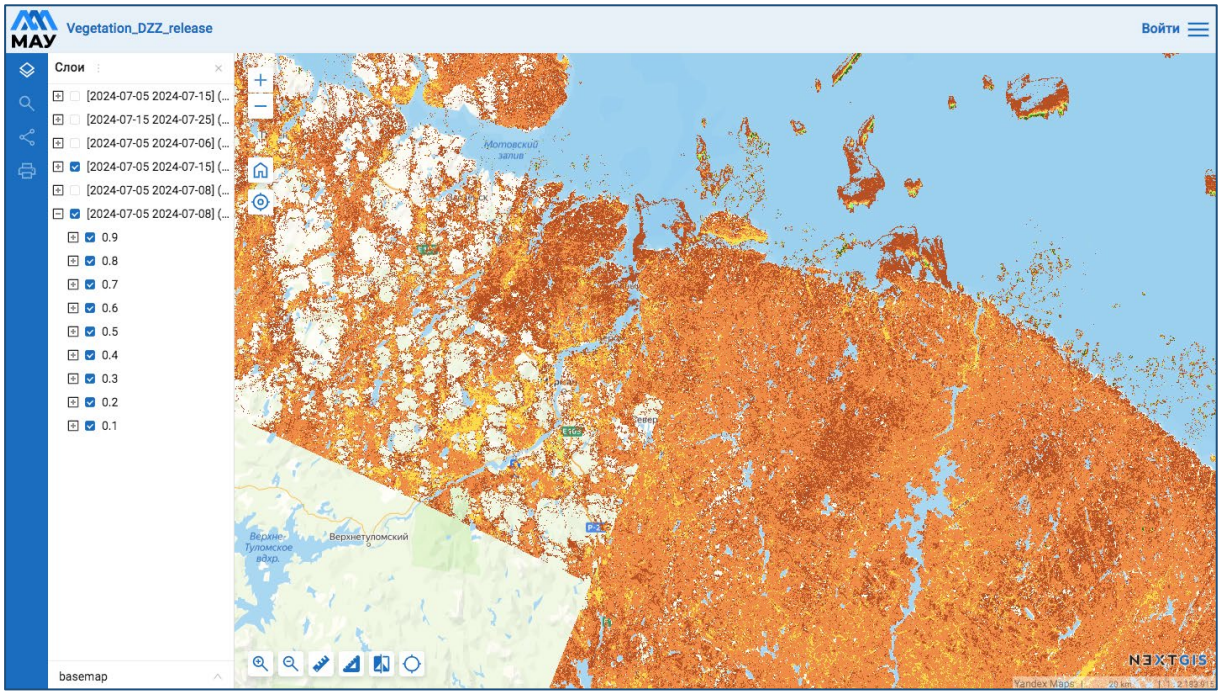


Рис. 1. Отображение на геоинформационном ресурсе результата анализа спутниковых данных

Тестирование системы проводилось на входных данных, которые содержали различные некорректные ситуации. Поскольку работа с данными дистанционного зондирования Земли требует обращения к внешним *API* и сервисам, важно обрабатывать недопустимые параметры до выполнения каких-либо запросов. Это позволяет избежать лишних обращений к сторонним сервисам, сократить время ожидания пользователя, минимизировать нагрузку на систему.

Выводы. Полученные результаты позволяют построить инструмент для регулярной оценки качества растительности на основе данных спутника *Landsat-8* на территории Мурманской области. Особенностями программного продукта являются: обеспечение полной автоматизации процесса от загрузки исходных данных до визуализации результатов; реализация механизма обработки ошибок и восстановления при сбоях; оптимизация алгоритмов расчета для работы с большими объемами данных; создание эффективного интерфейса для взаимодействия между модулями. Развитие исследования предполагает адаптацию предлагаемого решения для использования данных отечественных спутников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 24-17-20021 и министерства образования и науки Мурманской области (соглашение от 03.05.2024 № 199).

Список источников

1. Землякова Е. В. Методы дистанционного зондирования в экологических исследованиях. М.: Наука, 2018. 256 с.

2. Zhang X. et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 84. P. 471–475.

3. Landsat 8 Data Users Handbook. USGS, 2020. URL: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook.

I. M. Lazareva[1], O. I. Lyash[2], E. V. Skalaban[3],
YU. A. Loginova[4], N. V. Tkachev[5]
[1, 2, 3, 4, 5]Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia
[1]lazareva.im@mauniver.ru

USING SATELLITE IMAGES TO AUTOMATICALLY DETERMINE THE QUALITY OF VEGETATION COVER IN THE MURMANSK REGION

Abstract. This paper presents a software implementation of a quantitative assessment of the health and density of vegetation in the Murmansk region based on data from remote sensing of the Earth from space (remote sensing). The analysis uses data from multispectral Landsat 8 images. The software implementation of the presented solution is made in Python using libraries for working with spatial data and visualizing them, and automates the process of determining the NDVI spectral index, starting from uploading a satellite image to displaying vegetation zones on a map of the Murmansk region. The created solution makes it possible to effectively monitor changes in the plant communities of the Murmansk region and can be used for scientific research and practical application.

Keywords: satellite data, Landsat 8, software development, NDVI vegetation index, Arctic region

УДК 528.88:630*43

Д. В. Лозин[1], Е. А. Лупян[2]
[1, 2]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]lozin@d902.iki.rssi.ru

МЕТОД АДАПТАЦИИ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ MOD14 ДЛЯ РАБОТЫ С ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Аннотация. В работе представлен универсальный метод адаптации алгоритма *MOD*14 для использования данных с различных спутниковых систем, обладающих схожими с *MODIS* спектральными характеристиками каналов. Предложена схема оценки качества глобальных пожарных продуктов. Приведены результаты применения метода для данных отечественного прибора МСУ-МР, установленного на спутниках серии «Метеор-М» № 2, а также для прибора *MERSI*, установленного на китайском спутнике *Fengyun-3D*, и *SLSTR,* установленного на спутниках *Sentinel-3A*/*B*. Для каждого прибора процесс адаптации потребовал решения специфических проблем, связанных с особенностью работы. В конце представлено сопоставление существующих глобальных пожарных продуктов с продуктами, полученными с помощью разработанного метода адаптации.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, дистанционный мониторинг пожаров, алгоритмы детектирования пожаров, прибор МСУ-МР, алгоритм *MOD*14

Введение. Одной из актуальных задач глобального спутникового мониторинга лесных пожаров является использование новых источников данных. Одним из таких источников является отечественный прибор МСУ-МР, по своим характеристикам сопоставимый с *MODIS* [1], для которого существует устойчивый и надежный автоматический алгоритм детектирования пожаров по спутниковым данным *MOD14* [2–4].

В настоящей работе представлен метод адаптации алгоритма *MOD14* для работы с данными различных спутниковых систем. Приведены последние результаты по формированию глобальных информационных продуктов пожаров, получаемых по данным с различных приборов (МСУ-МР, *SLSTR*, *MERSI*) с использованием разработанного метода.

Метод адаптации алгоритма MOD14. В основе метода лежит разработанная схема оценки качества глобальных пожарных продуктов (рис. 1). В ней осуществляется сопоставление проверяемого глобального пожарного продукта (Продукт 1) с проверочным глобальным пожарным продуктом (Продукт 2). Горячие точки (ГТ) Продукта 1 принимаются за ожидаемый результат детектирования Продукта 2, в процентах оценивается ошибка ложных детектирований и ошибка пропусков алгоритма.

© Лозин Д. В., Лупян Е. А., 2025

Рис. 1. Схема оценки качества глобальных пожарных продуктов
**группы ГТ, объединенных по пространству и времени*

Общий принцип метода адаптации (рис. 2) заключается в итерационном подходе – каждый шаг внешнего цикла соответствует увеличению объема данных, на котором проводится калибровка алгоритма (пожарный месяц, год или потоковая обработка). Каждый такой шаг состоит из непосредственной обработки соответствующих данных алгоритмом *MOD14* с актуальной версией порогов и проверки получаемых результатов детектирования ГТ. В случае несоответствия результата поставленным критериям выявляются ошибочные случаи, по которым определяется, являются ли они следствием ошибок в самих данных (помехи, ошибочные значения, ошибка привязки данных) или следствием неправильно подобранных порогов. Далее происходит уточнение данных (фильтрация помех, синтез каналов изображения, допривязка изображения) либо модифицируются пороги (параметры алгоритма *MOD14*). В случае модификации порогов происходит повторная обработка данных. При этом в целях экономии времени далее обрабатываются не сами исходные данные (набор каналов сцен вместе с матрицами широт и долгот), а прошлый результат детектирования. При успешном прохождении новым результатом проверки качества текущая версия порогов становится актуальной, происходит повторная обработка исходных данных. Важной особенностью метода является разбиение задачи минимиз-

зации ошибок на каждом шаге на две последовательные подзадачи – минимизация ЛД (Сопоставление 1) и минимизация пропусков (Сопоставление 2). Оба сопоставления происходят с использованием метода оценки качества.

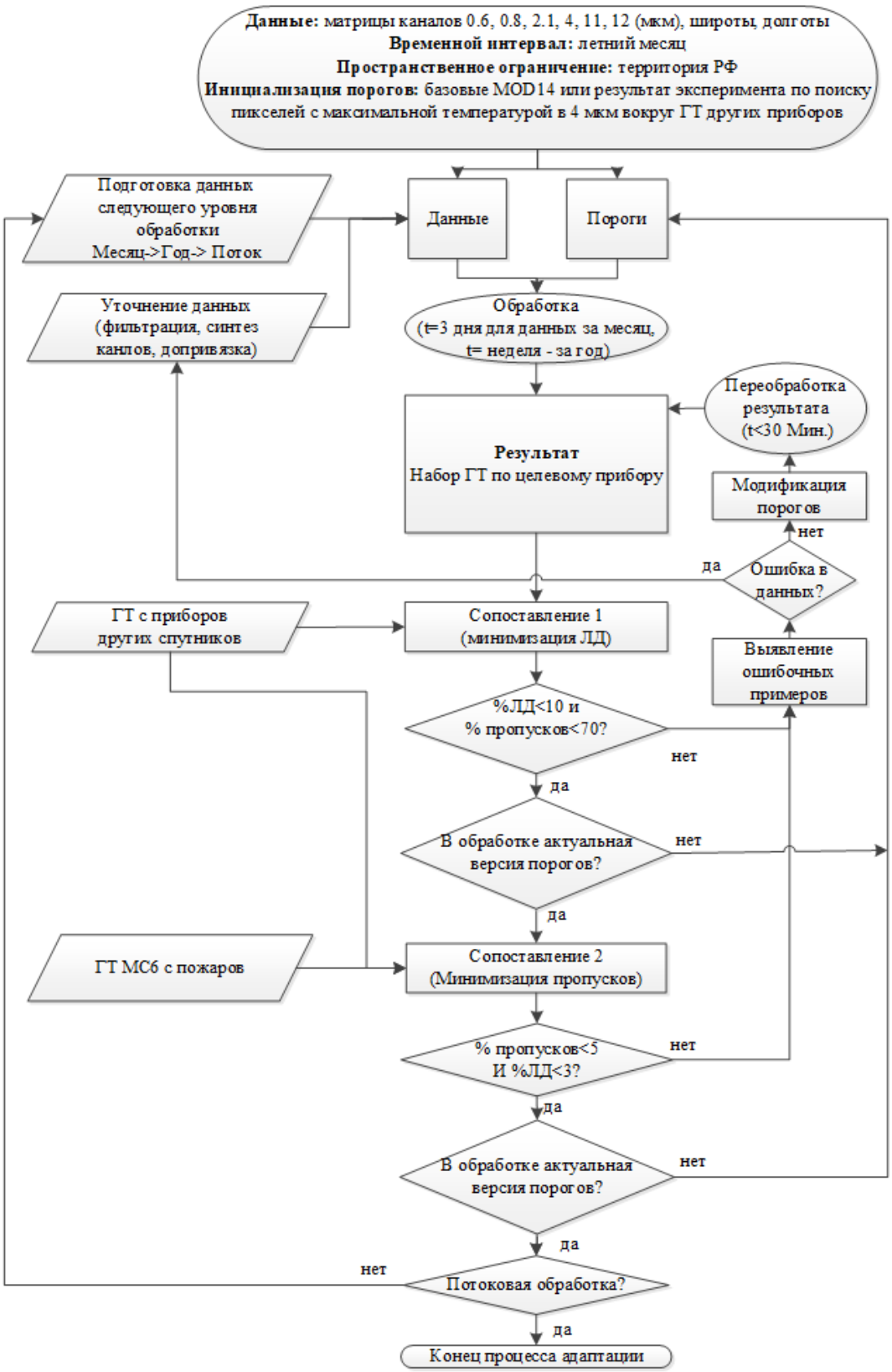


Рис. 2. Схема метода адаптации алгоритма детектирования пожаров *MOD14* для работы с данными различных спутниковых систем

Результаты применения метода. Применение метода к данным прибора МСУ-МР со спутников «Метеор-М» 2-2/3/4 позволило сформировать глобальный пожарный продукт с ошибкой ложных детектирований 2 % и ошибкой пропусков 0,5 %, что свидетельствует об устойчивости получаемого при обработке большого объема данных результата. Метод адаптации был применен для данных с приборов *MERSI-II* и *SLSTR*. Полученный результат прошел проверку качества по разработанному методу, которая показала повышение уровня достоверности в сравнении с текущими аналогичными глобальными пожарными продуктами.

Благодаря разработанной схеме оценки качества удалось сравнить достоверность глобальных пожарных продуктов, имеющихся в открытом доступе с продуктами, полученными в результате данной работы (табл. 1). Для них используются следующие параметры сопоставления: R = 0,01 градуса, T = 1 сутки, T_long = 7 суток, Продукт 2 – *MODIS Collection 6*.

Таблица 1

Оценки ошибок для данных детектирования лесных пожаров за 2024 г. на территории РФ (относительно *MODIS Collection 6*)

Глобальные пожарные продукты в открытом доступе				**Продукты, полученные с использованием метода адаптации**		
Название продукта	**Прибор**	**Ошибка ЛД**	**Ошибка пропусков**	**Прибор**	**Ошибка ЛД**	**Ошибка пропусков**
MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily)	*MERSI-II*	7,8 %	4,8 %	*MERSI-II*	4,69 %	9,93 %
SL_2_FRP	*SLSTR*	3,53 %	5,77 %	*SLSTR*	0,59 %	4,93 %
VNP14IMG	*VIIRS*	1,8 %	2,68 %	**МСУ-МР**	**2,0 %**	**0,5 %**

Для сформированного по данным МСУ-МР пожарного продукта было проведено сопоставимое значений интегральных величин площадей, пройденных огнем на территории РФ за 2024 г., рассчитанных на основе данных МСУ-МР и данных *MODIS* (табл. 2). Близкие интегральные значения позволяют сделать вывод о достоверности результата и эффективной работе модифицированного алгоритма.

Таблица 2

Сопоставление интегральных площадей пожаров (га) на территории РФ за 2024 г., сформированных на основе ГТ МСУ-МР и *MODIS*

Прибор	**Число лесных пожаров**	**Лесная площадь пожаров**
МСУ-МР	14 175	10 743 591
MODIS	15 469	10 849 754

Выводы. Разработанный метод адаптации алгоритма *MOD14* для работы с данными различных спутниковых систем позволил впервые сформировать глобальный информационный пожарный продукт по данным с отечественного прибора МСУ-МР. Продукт содержит информацию о пожарах, действующих на территории РФ с 2022 г. и имеет уровень достоверности, сопоставимый с продуктами, полученными по данных других спутниковых систем. Таким образом, обеспечена возможность осуществления спутникового мониторинга лесных пожаров средствами отечественной спутниковой системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ([5], http://ckp.geosmis.ru).

Список источников

1. Bobbe T., Descloitres J., Finco M., Giglio L., Justice C., Sohlberg R., and Townshend J. MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection and land cover change products from future moderate resolution sensors // NPOESS MAXI Review 2002, Silver Spring, MD.

2. Justice C. O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J. T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F. and Kaufman Y.J. The MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. Issues 1-2. P. 244–262.

3. Kaufman Y. J., Justice C.O. MODIS ATBD: Fire Products (Version 2.2, Nov.10, 1998), EOSID#2741, 1998, 77 p.

4. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C // University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2020. P. 1–63.

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 спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

D. Lozin[1], E. Loupian[2]
[1, 2]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]lozin@d902.iki.rssi.ru

METHOD OF ADAPTATION OF THE MOD14 FIRE DETECTION ALGORITHM TO WORK WITH DATA FROM VARIOUS SATELLITE SYSTEMS

Abstract. The paper presents a universal method for adapting the MOD14 algorithm to use data from various satellite systems with spectral channel characteristics similar to MODIS. A scheme for assessing the quality of global fire products is also proposed. The results of applying the method to data from the domestic MSU-MR device installed on the Meteor M No. 2 series satellites, as well as for the MERSI device installed on the Chinese Fengyun-3D satellite,

and SLSTR installed on the Sentinel-3A/B satellites are presented. For each device, the adaptation process required solving specific problems associated with the peculiarities of the device operation. At the end, a comparison of existing global fire products with the products obtained using the developed adaptation method is presented.

Keywords: satellite observations, remote fire monitoring, fire detection, algorithms, MSU-MR device, MOD14 algorithm

УДК 537.874.2

Д. С. Макаров[1], Д. В. Харламов[2], М. Ю. Реушев[3]
В. Г. Подопригора[4], К. В. Краснощеков[5]
[1, 2, 3, 5] ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[1] Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
[4] Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[4] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
ikivt@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕНОСТИ ЛЕДОВЫХ ПОКРОВОВ НА РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Аннотация. В работе представлены результаты рефлектометрических измерений поверхности льда соленого водоема, полученных с помощью сигналов навигационных спутников диапазона *L*1. Для оценки влияния температуры на рефлектометрические измерения использована диэлектрическая модель соленого льда. Выполнены расчеты, действительной и мнимой части для диэлектрической проницаемости при различных значениях температуры. Проведенные исследования будут использованы для совершенствования методов ГНСС рефлектометрии в целях мониторинга состояния ледовых поверхностей.

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

Введение. Метод многолучевой ГНСС рефлектометрии, суть которого заключается в одновременной регистрации прямого и отраженного от зондирующей поверхности сигналов навигационных спутников, представляет собой перспективный подход для мониторинга земных объектов [1]. Интерференционная картина, полученная в результате регистрации сигналов, содержит данные о параметрах исследуемого объекта. На характер интерференционной картины влияют следующие факторы: электрофизические параметры зондируемого объекта, угол места и высоты приемной антенны [1–3]. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости ледового покрова от температуры, влажности, солености и качества поверхности влияет на формирование интерференционного поля. Работа направлена на развитие методов ГНСС-рефлектометрии для определения макрофизических характеристик ледяного покрова (толщина льда, соленость, влажность, плотность и т. д.).

Экспериментальная часть. В период с января по март 2025 г. была проведена серия экспериментов по регистрации рефлектограмм от поверхности ледового покрова соленого водоема оз. Шира. Регистрация сигналов

© Макаров Д. С., Харламов Д. В., Реушев М. Ю., Подопригора В. Г., Краснощеков К. В., 2025

производилась приемником «НСРП-04» и антенной с правой круговой поляризацией, которая устанавливалась на высоте 2,4 м по классической схеме [1]. Каждый сеанс длился около 1,5 ч. Толщина льда варьировалась от 0,40 до 0,85 м, минерализация воды – 11 г/л. [4]. Наиболее информативные рефлектограммы представлены на рис. 1.

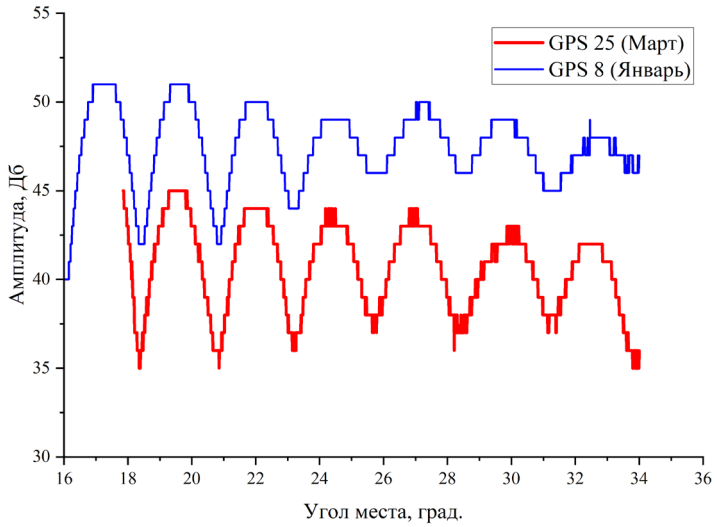


Рис. 1. Рефлектограммы спутников:
GPS 8 (сеанс от 10.01.2025) и *GPS 25* (сеанс от 20.03.2025)

В дополнение к рефлектометрическим измерениям в толщу льда была установлена температурная коса с регистраторами *TR-5L*. Датчики устанавливались с шагом 20 см, а регистрация значений температуры производилась раз в час. Среднее изменение температуры представлена на рис. 2.

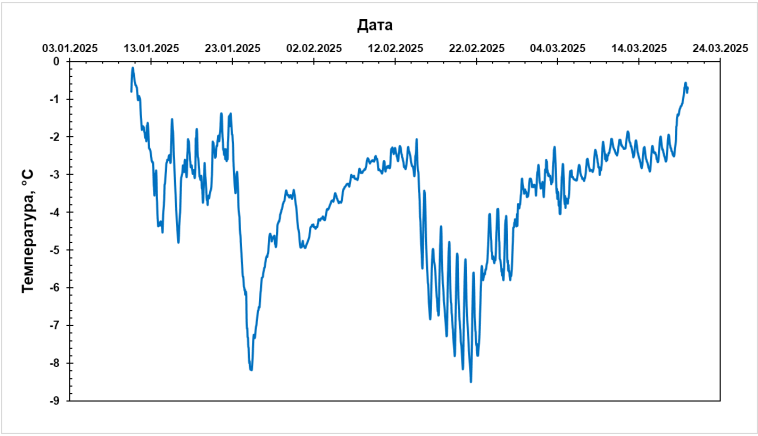


Рис. 2. Среднее изменение температуры в толще льда

Диэлектрическая модель соленого льда. При оценке влияния солености на отражательные свойства ледовых покрытий были использованы выражения для относительной диэлектрической проницаемости ε_i льда в виде эмпирических выражений [5]:

$$\varepsilon_i = 3{,}1 + 0{,}0084 \cdot V_в + j\left(a_1 + a_2 \cdot V_в\right), \qquad (1)$$

где j – мнимая единица, $a_1 = 0{,}037$, $a_2 = 0{,}00445$ для льда с идеальной поверхностью (отсутствие снега, шероховатостей); $V_в$ – относительный объем соляного раствора (в г/л).

Объем соленого раствора определялся с помощью эмпирической формулы, предложенной в [6]:

$$V_в = 10^{-3} \cdot S \cdot \left(-\frac{49{,}185}{T} + 0{,}532 \right), \qquad (2)$$

где T – температура льда в градусах Цельсия.

Используя выражения (1) и (2), значения средней температуры и солености S = 11 г/л [4], были рассчитаны значения диэлектрической проницаемости соленого льда. Расчеты расчетов представлены в табл. 1. График изменения мнимой части ε_i от температуры приведен на рис. 3.

Таблица 1

Расчеты диэлектрической проницаемости соленого льда

Температура, °С	$V_в$	ε_i
–1	0,546887	3,1045938508+0,03948833585j
–2	0,27637	3,1023215038+0,038257481225j
–3	0,186197	3,1015640548+0,03784719635j
–4	0,141111	3,1011853303+0,0376420539125j
–5	0,114059	3,1009580956+0,03751896845j
–6	0,096025	3,1008066058+0,037436911475j
–7	0,083143	3,1006983988+0,03737829935j
–8	0,073481	3,10061724355+0,03733434025625j
–9	0,065967	3,1005541228+0,03730014985j

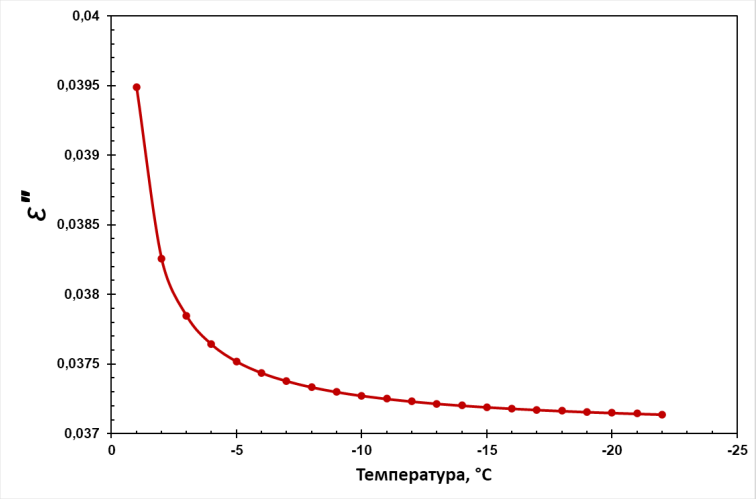


Рис. 3. Изменение мнимой части ε_i от температуры

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При уменьшении температуры льда мнимая часть ε_i уменьшается, что указывает на уменьшение сигнала в толщине льда и, следовательно, улучшение качества интерференционной картины при рефлектометрических измерениях.

2. Действительная часть ε_i изменяется слабо во всем промежутке измерений.

3. Резкое изменение мнимой части находится в промежутке от 0 до –5°С, что важно в мониторинге состояния ледового покрова и его прочностных характеристик. В этом случае ухудшение контраста интерференционной картины может указывать на уменьшение прочности льда.

Список источников

1. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В. и др. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий : монография. 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. Zadereev E. S. et al. The effect of salinity and nutrient load on the ecosystems of selected lakes in the south of Siberia // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2021. Т. 14. № 2. С. 133 53.

5. Vant M. R., Ramseier R. O. Makios V. J. // Appl. Phys. 1978. V. 49 No. 3, P. 1264.

6. Ulaby F. T., Moore R. K. Fung A. K. // Microwave Remote Sensing Active and Passive. V. 2. Artech House. 1986. 608 p.

D. S. Makarov[1,2], D. V. Kharlamov[1], M. Yu. Reushev[1,4],
V. G. Podoprigora[3,4], K. V. Krasnoshchekov[1]
[1,2,3,5] Federal Research Center KSC SB RAS
[1] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
[4] Institute of Physics named after L.V. Kirensky FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[3,4] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
ikivt@yandex.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF ICE COVER TEMPERATURE AND SALINITY ON REFLECTOMETRIC MEASUREMENTS BY NAVIGATION SATELLITE SIGNALS

Abstract. The paper presents the results of reflectometric measurements of the ice surface of a salt water body obtained using signals from L1 range navigation satellites. A dielectric model of salt ice was used to assess the effect of temperature on reflectometric measurements. Calculations were made of the real and imaginary parts for the permittivity at different temperature values. The conducted research will be used to improve GNSS reflectometry methods for monitoring the state of ice surfaces.

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

УДК 004.932

Д. А. Марданова[1], А. В. Мингалев[2]
[1, 2]АО «НПО ГИПО», Казань
gipo@shvabe.com

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОБРАТИМОГО ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Аннотация. Представлено описание аппаратного решения для предварительной обработки изображений в алгоритме сжатия без потерь на основе обратимого дискретного вейвлет-преобразования *CDF* 5/3, предназначенного для реализации в программируемой логической интегральной схеме с учетом ограничений однопортовой памяти и невозможности синтеза массивов в составе съемочной аппаратуры авиационных комплексов сканерных тепловизионных систем. Разработана архитектура, основанная на конечном автомате с последовательной обработкой данных и применением механизма двойной буферизации, обеспечивающая баланс между использованием аппаратных ресурсов и скоростью обработки.

Ключевые слова: дискретное вейвлет-преобразование, сжатие информации, двойная буферизация, ПЛИС

Введение. С совершенствованием регистрирующих устройств, применяемых в авиационных комплексах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для формирования тепловизионных изображений поверхности Земли, повышается качество получаемых снимков и, соответственно, увеличивается объем обрабатываемых данных. В условиях ограничений полосы пропускания и времени передачи информации возникает необходимость ускорения процесса передачи данных на наземные пункты управления в режиме реального времени либо хранения формируемых изображений на борту авиационного носителя. При этом ухудшение качества изображений в прикладных задачах зачастую недопустимо, что обуславливает необходимость применения эффективных методов сжатия регистрируемой информации.

Описание разрабатываемого решения. Современные алгоритмы сжатия изображений, такие как *JPEG 2000* [1] и *ICER* [2], для повышения степени сжатия используют предварительную обработку исходных данных, включающую центрирование и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). В настоящей работе представлен модуль аппаратного решения, реализованный на языке *Verilog HDL*, который выполняет указанные подготовительные этапы разрабатываемого алгоритма сжатия изображений. Для обеспечения сжатия без потерь применяется обратимое дискретное вейвлет-преобразование *CDF 5/3* [3].

Разрабатываемое решение предназначено для реализации в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) с учетом следующих

© Марданова Д. А., Мингалев А. В., 2025

ограничений, обусловленных архитектурными особенностями целевого устройства и средств синтеза:

– использование исключительно однопортовой памяти;

– невозможность синтеза массивов в исходном коде из-за неэффективной реализации таких конструкций на триггерах вместо блоков памяти.

В силу указанных ограничений параллельная архитектура обработки данных не представляется реализуемой, поскольку однопортовая память не позволяет осуществлять одновременный доступ к нескольким элементам данных, необходимым для параллельной обработки. В связи с этим исходная матрица в разработанном модуле обрабатывается последовательно: на каждой итерации сначала последовательно выполняется вертикальное преобразование по столбцам матрицы, а затем – горизонтальное преобразование по строкам.

Центрирование выполняется также в данном модуле: при первом считывании из исходной памяти из каждого значения вычитается заранее известное число (смещение), равное 2^{m-1}, где m – количество бит на пиксель в исходных данных. Такая операция позволяет сместить диапазон значений пикселей к центру числовой шкалы, что способствует снижению динамического диапазона входных данных. Данный подход ускоряет работу алгоритма за счет уменьшения количества операций записи и чтения из промежуточной памяти.

Схема лифтинга. Для вычислений частотных характеристик изображения в модуле применяется схема лифтинга [4], позволяющая разложить ДВП на последовательность простых шагов, таким образом снизив вычислительную сложность и объем используемой памяти.

Рассмотрим одномерный массив яркостей пикселей, элементы которого упорядочены в виде

$$a_0 b_0 a_1 b_1 \ldots a_{\left(N/2-1\right)} b_{\left(N/2-1\right)}, \tag{1}$$

где N – общее количество значений в массиве.

В классическом подходе на основе свёртки вычисление высокочастотных (деталей и шумов) и низкочастотных (аппроксимация изображения) коэффициентов ДВП задается формулами (2) и (3) соответственно:

$$d_i = -\frac{1}{2}a_i + b_i - \frac{1}{2}a_{i+1}, \tag{2}$$

$$s_i = -\frac{1}{8}a_{i-1} + \frac{2}{8}b_{i-1} + \frac{6}{8}a_i + \frac{2}{8}b_i - \frac{1}{8}a_{i+1} \tag{3}$$

где $i = 0,1,\ldots N/2\text{-}1$ – индексы элементов в массиве и соответствующих коэффициентов ДВП; d_i – значение очередного высокочастотного коэффициента ДВП; s_i – значение очередного низкочастотного коэффициента ДВП.

В случае выхода индекса элемента исходного массива за пределы допустимого диапазона для вычислений коэффициентов ДВП используется

крайний левый доступный элемент массива при индексе меньше нуля и крайний правый – при индексе элемента больше *N*/2-1.

Эквивалентное представление ДВП в рамках схемы лифтинга приведено в виде формул (4) и (5), соответствующих шагам предсказания и обновления в схеме лифтинга:

$$d_j = b_j - \frac{a_j + a_{j+1}}{2}, j = 0,1,\ldots\frac{N}{2} - 2, \quad (4)$$

$$s_k = a_k + \frac{d_{k-1} + d_k}{4}, k = 1,2,\ldots\frac{N}{2} - 1. \quad (5)$$

Обработка граничных случаев реализуется по формулам (6) и (7):

$$d_{\left(N/2-1\right)} = b_{\left(N/2-1\right)} - a_{\left(N/2-1\right)}, \quad (6)$$

$$s_0 = a_0 + \frac{d_0}{2}. \quad (7)$$

Первоначальная архитектура подмодулей. В подмодулях, реализующих вертикальное и горизонтальное одномерные ДВП 5/3, управление вычислениями осуществляется с помощью конечного автомата. В первоначальной версии подмодулей конечный автомат состоит из трёх основных последовательных состояний:

1. На этапе вычисления высокочастотных коэффициентов (деталей) значения исходного одномерного массива (строки или столбца) считываются из памяти. Для каждой пары элементов производится вычисление высокочастотных коэффициентов по формулам (4) и (6). При этом в первом проходе вертикального преобразования значения из исходной памяти предварительно центрируются. Полученные значения временно сохраняются во внутренней памяти.

2. На этапе вычисления низкочастотных коэффициентов (аппроксимации) значения исходного массива и временной памяти используются для вычисления коэффициентов по формулам (5) и (7). Результаты записываются в первую половину соответствующей строки или столбца исходной памяти.

3. На заключительном этапе записи высокочастотных коэффициентов преобразования строки или столбца значения высокочастотных коэффициентов копируются из внутренней памяти во вторую половину исходного массива.

Усовершенствованная архитектура подмодулей. В текущей версии архитектура подмодулей усовершенствована.

1. Добавлена вторая внутренняя память для временного хранения вычисленных значений высокочастотных коэффициентов, что позволяет ввести механизм двойной буферизации [5] промежуточных данных. Решение

заключается в том, что две внутренние памяти, называемые буферами, работают одновременно: пока один буфер используется для записи значений высокочастотных коэффициентов одной строки (или столбца), другой – для чтения коэффициентов предыдущей строки (или столбца). Таким образом, первое и третье состояния конечного автомата объединяются. Двойная буферизация позволяет перекрывать операции чтения и записи, снижая время простоя и увеличивая пропускную способность модуля.

2. При выполнении горизонтального ДВП результаты записываются в четыре отдельные выходные памяти меньшего размера, соответствующие квадрантам *LL*, *LH*, *HL*, *HH* дискретного вейвлет-преобразования. Это решение позволяет организовать параллельную обработку данных на последующих этапах алгоритма сжатия, несмотря на аппаратные ограничения.

Кроме основных, автомат содержит дополнительные состояния для обработки событий асинхронного сброса и завершения вычислений, что обеспечивает корректную инициализацию и завершение работы подмодулей.

Заключение. Таким образом, разработано решение в виде модуля предварительной обработки изображений в алгоритме сжатия без потерь на основе обратимого дискретного вейвлет-преобразования *CDF* 5/3, предназначенного для реализации в ПЛИС. Внедрение двойной буферизации, которая позволяет перекрывать операции чтения и записи, значительно повышает производительность модуля. Это нововведение способствует снижению задержек, связанных с ограничениями однопортовой памяти, и обеспечивает баланс между использованием аппаратных ресурсов и скоростью обработки данных.

Предложенная архитектура демонстрирует возможность реализации эффективного обратимого сжатия изображений в условиях ограниченных ресурсов ПЛИС, что открывает перспективы для интегрирования разработанного модуля в состав реальных авиационных систем ДЗЗ с высокими требованиями к пропускной способности и качеству данных.

Список источников

1. International Telecommunication Union, Recommendation ITU-T T.800 (V4): Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system. 2024.

2. Kiely A., Klimesh M. The ICER Progressive Wavelet Image Compressor // IPN Progress Report 42-155. 2003.

3. Cohen A., Daubechies I., Feauveau J.-C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1992. № 45 (5). P. 485–560.

4. Daubechies I., Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps // Journal of Fourier Analysis and Applications. 1998. № 4 (3). P. 247-269.

5. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. СПб. : Питер, 2018.

D. A. Mardanova, A. V. Mingalev
[1, 2]JSC "NPO GIPO", Kazan, Russia
gipo@shvabe.com

DEVELOPMENT OF A REVERSIBLE DISCRETE WAVELET TRANSFORM MODULE FOR HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE EARTH SURFACE IMAGE COMPRESSION ALGORITHM

Abstract. This paper describes a hardware solution for image preprocessing in a lossless compression algorithm based on the random inverse discrete transform CDF 5/3, intended for implementation in a programmable logic integrated circuit, taking into account the limitation of single-port memory and the impossibility of synthesizing arrays in the equipment of aircraft complexes of thermal imaging scanner systems. We developed an architecture based on traditional automaton with sequential data processing and the use of a double buffering mechanism, which provides a balance between the use of hardware resources and processing speed.

Keywords: discrete wavelet transform, data compression, double buffering, FPGA

УДК 519.6, 004.942

Е. И. Пармузин[1], В. И. Агошков[2], В. П. Шутяев[3], В. В. Фомин[4]
[1,2,3,4] Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия
[1,2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[4] Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия
[1]e.parmuzin@inm.ras.ru

ОДНОВРЕМЕННОЕ УСВОЕНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СО СПУТНИКОВ И ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Аннотация. Рассмотрен алгоритм одновременного усвоения данных наблюдений со спутника и профилей температуры для модели динамики моря, разработанной в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук. Алгоритм основан на методе вариационной ассимиляции с выбором функционала стоимости (включая данные наблюдений). Представлен итерационный алгоритм решения поставленной задачи, основанный на решении системы оптимальности, состоящей из прямого, сопряженных уравнений и уравнений для управлений. Приведены результаты численных экспериментов с усвоением данных наблюдений в модели динамики Черного моря.

Ключевые слова: вариационная ассимиляции, температура поверхности моря, данные наблюдений со спутника, данные профилей температуры

Введение. В связи с возросшими возможностями и средствами дистанционного зондирования Земли количество доступной информации для научных исследований многократно увеличивается. В связи с этим направление, связанное с усвоением данных наблюдений, продолжает бурно развиваться в различных областях. Оно особенно актуально в метеорологии и океанографии, где данные наблюдений усваиваются в моделях атмосферы и океана с целью получения наиболее точных данных начальных и граничных условий необходимых для последующего моделирования и прогноза гидрометеорологических характеристик.

В данной работе рассматривается задача вариационного усвоения данных наблюдений из различных источников при использовании модели динамики Черного моря, разработанной в ИВМ РАН, с интегрированными в нее блоками вариационного усвоения данных о температуре поверхности моря и профилей температуры [1]. Предложены алгоритмы решения обратных задач восстановления тепловых потоков на поверхности моря и дополнительной неизвестной в функции внешних источников. В качестве данных наблюдений используются данные по температуре поверхности моря (ТПМ), полученные со спутника *SNPP* со спектрометром *VIIRS* и профили

© Пармузин Е. И., Агошков В. И., Шутяев В. П., Фомин В. В., 2025

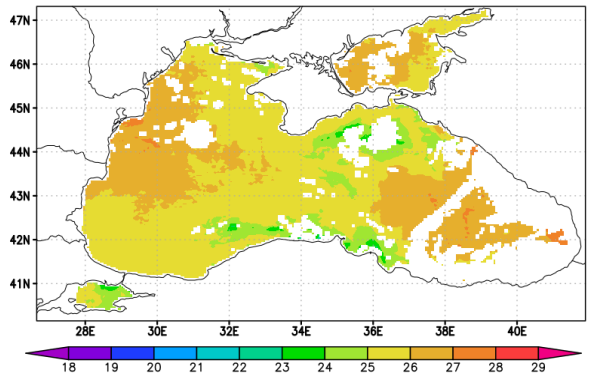
температуры, подготовленные специальным образом на основе комплексной обработки спутниковых и натурных данных. Данные измерений со спутников формате, пригодном для использования в численной модели, были предоставлены сервисом *See the Sea*, входящим в состав ЦКП «ИКИ Мониторинг» [2], а данные профилей получены из глобального проекта *ARMOR3D* [3]. Отметим, что данные ТПМ не покрывают всю исследуемую акваторию, поэтому в процедуре ассимиляции используется характеристическая функция, определяющая наличие данных на момент усвоения. Данные ТПМ представлены согласно пролету спутника над исследуемой акваторией, а данные по профилям температуры – с недельным осреднением и доступны для всей акватории.

Описание постановки задачи. В работе была использована трехмерная модель динамики моря, разработанная в ИВМ РАН [3] и основанная на системе уравнений, записанных в приближении Буссинеска и гидростатики. Отличительной особенностью данной модели является использование метода расщепления как по физическим процессам, так и по направлениям, а также запись уравнений в σ-системе координат по вертикали.

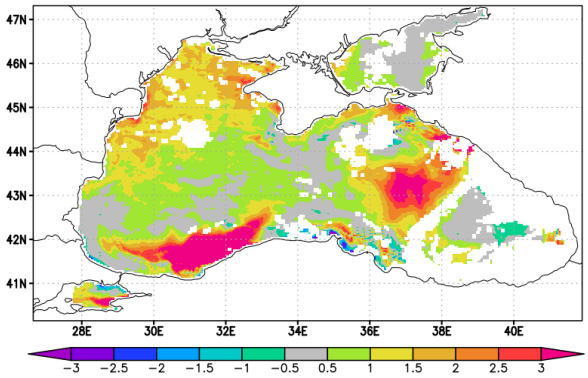
Алгоритм усвоения реализован в виде отдельных блоков с использованием вариационной ассимиляции данных наблюдений температуры поверхности моря со спутников и профилей температуры. В качестве критерия близости температуры, полученной при расчете по модели, и наблюдаемой температуры моря выбирается функционал стоимости, в который, наряду с данными наблюдений, входят неизвестные функции управления. Таким образом, формулируется обратная задача: найти решение уравнений модели и управления такие, что на них минимизируется функционал стоимости.

Численные эксперименты. В качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривалась акватория Черного и Азовского морей. По пространственным переменным шаг сетки был равен 0,05° по долготе и 0.036° по широте. Временной интервал – 150 с. Расчет производился на период равный одному году (2020) с начального состояния, за которое брались результаты расчета на 2019 г. с ассимиляцией всех данных наблюдений в конце этого года. Была проведена серия экспериментов, которая включала расчеты без ассимиляции данных, с ассимиляцией только данных ТПМ, а также с одновременной ассимиляцией данных ТПМ и профилей температуры. Некоторые из результатов расчетов представлены на рис. 1.

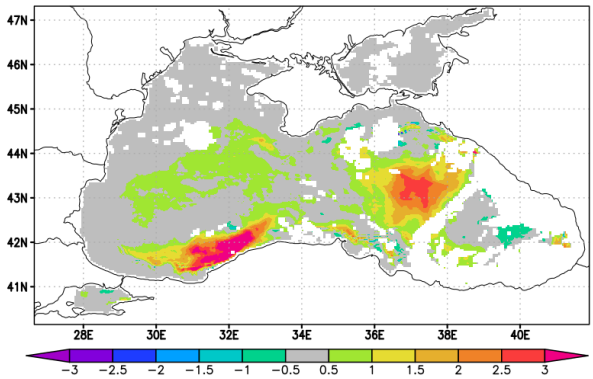
Так, на рис. 1, *а,* представлено поле температуры поверхности моря (ТМП) 11 августа 2020 г. в 23.00 UTC, полученное со спутника *SNPP* (данные наблюдений); на рис. 1, *б* – значения разности между данными наблюдений и полем, полученным при расчете без процедуры ассимиляции; на рис. 1, *в* – значения разности между данными наблюдений и полем ТПМ на 11 августа 2020 г., посчитанное с блоком ассимиляции данных со спутника; на рис. 1, *г* – значения разности разность между данными наблюдений и полем ТПМ при одновременной ассимиляции данных со спутника и профилей температуры.



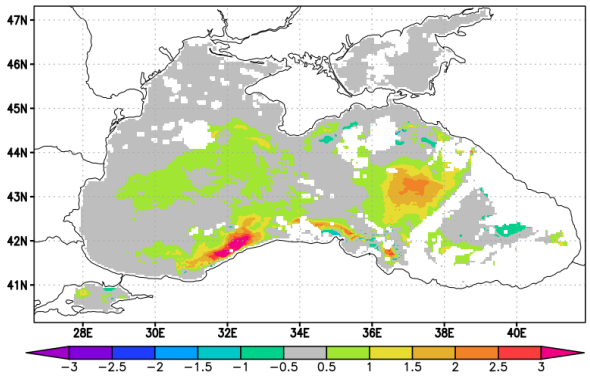
а – данные наблюдений ТПМ, спутник SNPP, 23:00 UTC



б – поле разности ТПМ при расчете по модели без усвоения и данными наблюдений



в – поле разности ТПМ при расчете с усвоением данных наблюдений со спутника и данными наблюдений



г – поле разности ТПМ при одновременном усвоении всех данных и данными наблюдений

Рис. 1. Значения полей ТПМ на 11 августа 2020 г., °С

Заметно, что в некоторых частях акватории моря модель несколько занижает ТПМ, и разность с наблюдаемым значением ТПМ может в некоторых местах достигать 4 °С. Применение процедуры ассимиляции данных со спутника позволяет уменьшить эту разницу до 2–3 °С, а добавление процедуры ассимиляции профилей позволяет еще более приблизить расчет к наблюдаемым данным.

Заключение. В работе рассмотрено применение алгоритма вариационной ассимиляции данных наблюдений в модели динамики Черного и Азовского морей, в том числе данные из различных источников. Показано, что введение процедуры ассимиляции данных профилей температуры в модель позволяет получать результаты расчета ТПМ, более близкие к наблюдаемым, что улучшает прогностические свойства численной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035).

Список источников

1. Agoshkov V. I., Parmuzin E. I., Zakharova N. B. The study and numerical solution of the inverse problem of heat flows in the ocean dynamics model based on ARGO buoys data. // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2011. V. 26, No. 3. Pp. 231–262.

2. 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. P. 51–55.

3. Guinehut S., Dhomps A.-L., Larnicol G. and Le Traon P.-Y., 2012: High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. Ocean Sci., 8, 845-857, doi:10.5194/os-8-845-2012.

4. 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.

E. I. Parmuzin[1], V. I. Agoshkov[2], V. P. Shutyaev[3], V. V. Fomin[4]

[1,2,3,4] Marchuk Institute of Numerical Mathematics, RAS, Moscow, Russia

[1,2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[4] Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

[1]parm@inm.ras.ru

SIMULTANEOUS ASSIMILATION OF SATELLITE OBSERVATIONS AND TEMPERATURE PROFILES FOR THE BLACK SEA DYNAMICS MODEL

Abstract. An algorithm for simultaneous assimilation of satellite data and temperature profiles for a sea dynamics model developed at the Marchuk Institute of Numerical Mathematics is considered. The algorithm is based on the method of variational data assimilation with a choice of cost functional, including observational data. An iterative algorithm for solving the problem, based on solving an optimality system that includes adjoint equations is presented. Numerical experiments with real observational data for the Black Sea dynamics model are presented.

Keywords: variational assimilation, sea surface temperature, satellite observation data, temperature profiles

УДК 528.852 + 504.064

Д. Е. Плотников[1], П. А. Колбудаев[2], Е. С. Ёлкина[3]
[1, 2, 3]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ РОССИИ

Аннотация. В настоящем исследовании представлены результаты анализа новых спектрально-временных признаков картографирования используемой пашни, построенных на основе рядов мультиспектральных спутниковых данных высокого временного разрешения, направленных на создание более точных карт пахотных земель России. Разработанные признаки оценивались с использованием пространственно-представленной выборки с помощью локальных и глобальных рейтингов классовых метрик *MDA*, глобальных диаграмм мультиколлинеарности, а также с помощью метрики *F*1-*score* для моделей *Random Forest*. Результаты подтвердили высокую информативность новых спектрально-временных признаков, позволяющих создавать модели картографирования пахотных земель России со значением *F*1-*score* 96 %. В результате работы была разработана новая карта используемой пашни России и прилегающих территорий, а лежащие в ее основе методы, в силу интерпретируемости признаков, характеризуются высокой переносимостью на другие эпохи и данные других спутниковых систем.

Ключевые слова: используемые пахотные земли, спектрально-временные признаки, *LOWESS*, *Random Forest*, *MDA*, *feature engineering*

Введение. Карты используемых пахотных земель России и прилегающих территорий на ежегодной основе формируются в ИКИ РАН на базе многолетних временных серий спутниковых данных *MODIS* (*Terra\Aqua*) [1, 2, 3]. Карты строятся с опорой на признаки распознавания, извлечённые из 6-летних временных серий 7-дневных композитных изображений перпендикулярного вегетационного индекса *PVI* [1]. Признаки были разработаны с целью максимизации различий между участками используемых пахотных земель и естественной растительности для того чтобы мог работать автоматический параметрический локально-адаптивный алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия в программном пакете *LAGMA* [3]. Соответствующая технология ежегодного обновления карт использует метод актуализации и переноса обучающей выборки между временными срезами, основанный на анализе временной серии карт, полученных за предыдущие периоды, пространственном анализе и вероятностном подходе [4]. К настоящему моменту получена временная серия карт используемых пахотных земель России, покрывающая более чем двадцатилетний интервал спутниковых наблюдений *MODIS*.

© Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Ёлкина Е. С., 2025

Вместе с тем в течение последнего времени разработано множество новых непараметрических методов машинного обучения, в том числе, алгоритмически обеспечивающие локальность распознавания классов с контролем основных характеристик точности и значимости на уровне отдельных признаков. Также в последние годы были разработаны технологии восстановления временных серий спутниковых данных на основе весовой реализации метода *LOWESS* [5], обеспечившие возможность оперативного построения новых продуктов *HiTSE* – ежедневных композитных безоблачных изображений по данным различных спутниковых систем, включая *Sentinel-2\MSI* [6], *Landsat\OLI* [7], *Terra&Aqua\MODIS*, *SNPP\VIIRS* и *Meteop-M\KMCC* [8], а также их комбинаций. Ежедневные восстановленные изображения характеризуются максимальной временной актуализацией и поэтому имеют более высокое дискриминантное качество, повышающее тематическую точность разделения высокодинамичных классов растительного покрова и типов землепользования, включая используемые пахотные земли.

В работе описывается разработка и приводится анализ новых спектрально-временных и мультиспектральных признаков распознавания, основанных на сериях высокого временного разрешения, а также описывается метод построения новых карт используемых пахотных земель России.

Данные и методы. В качестве опорной выборки для оценки точности распознавания моделей использовалось более чем 4 600 сэмплов, полученных в результате контролируемого краудсорсинга по данным высокого разрешения для классов пахотных земель и естественной растительности с общей точностью 86 %, которая охватывает всю европейскую часть России и соседних стран [9]. В качестве входных данных использовались многолетние временные серии ежедневных мультиспектральных композитных изображений *MODIS* (продукт *HiTSE* ЦКП «ИКИ-Мониторинг») [6, 7, 8, 10]. Оценка информативности признаков производилась с помощью локального и глобального классового рейтинга метрики *MDA*, включая разностный анализ рейтинга «лучший-худший», диаграмм мультиколлинеарности признаков, а также на основе метрики *F*1-*score* для моделей на основе *Random Forest*.

Результаты. В целях сравнительного анализа оставлена группа из трёх исходных признаков на базе *PVI* (*SGPI*, *AMMI*, *CEMMI* [3]), однако в настоящей работе они были рассчитаны на основе ежедневных восстановленных, а не недельных композитных изображений с пропусками. Разработаны новые спектрально-временные признаки группы *VPI* (*Vegetation Peakness Index*: *VPI*-40, *VPI*-50 и *VPI*-60), а также добавлены новые признаки, основанные на ключевых фенологических точках кривых развития в каналах *Red*, *NIR*, *SWIR*1 и *SWIR*2 прибора *MODIS*. Кроме этого, добавлены признаки, используемые для мониторинга почвы и состояния зелёной фитомассы. Всего в базовой модели был задействован 31 признак без учета признаков географических координат (рис. 1).

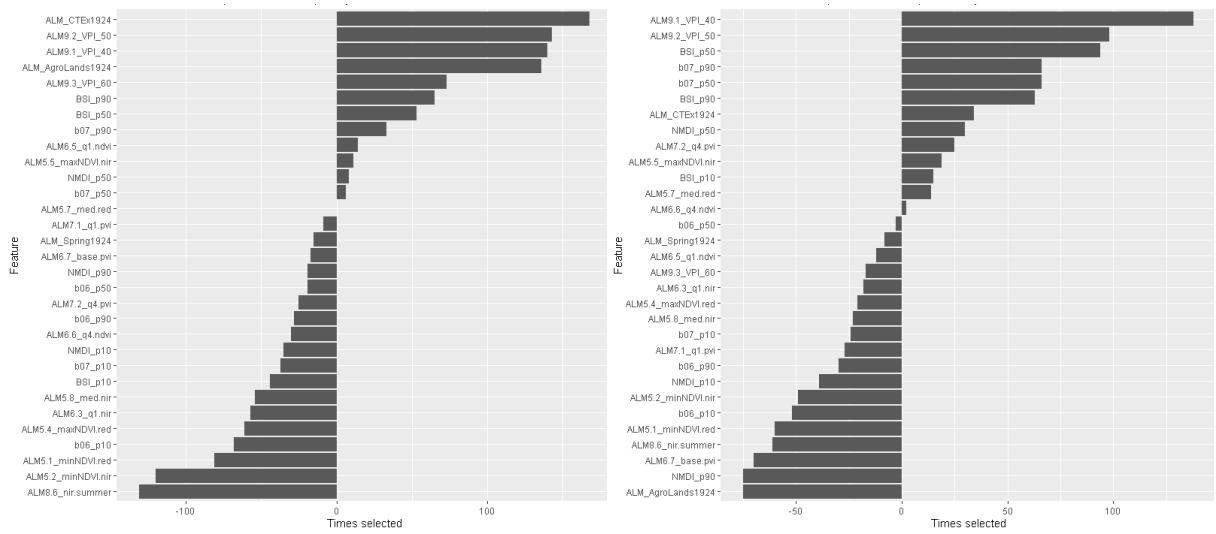


Рис. 1. Разностная диаграмма рейтинга MDA «лучший-худший» исследуемых признаков для класса «пашня» (слева) и «не пашня» (справа)

Анализ разностной диаграммы рейтинга MDA позволил установить список из 17 наиболее информативных признаков, которые далее были использованы при построении модели распознавания используемой пашни России и соседних стран. Значение метрики *F*1-*score* при оценке точности распознавания пахотных земель тестовой выборке (20 % от общего объема выборки) составил 96 %. Список из финальных признаков был проверен на мультиколлинеарность, а также на тестовой выборке была проведена оценка потери точности распознавания из-за сокращения числа признаков с 31 до 17 в терминах метрики *F*1-*score*, которая составила 1,5 % для класса «пашня» и 0,9 % для класса «не пашня». Полученные результаты позволили подтвердить высокую информативность новых спектрально-временных признаков и позволили построить модели для более точного картографирования используемых пахотных земель России (рис. 2). Использование новых карт пахотных земель позволит повысить объективность оценки состояния культурной растительности [11, 12, 13] и точность картографирования сельскохозяйственных культур [14].

Выводы. Разработаны новые спектрально-временные признаки, основанные на рядах данных *MODIS* ежедневного временного разрешения, обеспечившие картографирование используемых пахотных земель с точностью 96 %. Предложен подход поклассового разностного рейтинга *MDA* для локализованного анализа информативности признаков и снижения размерности большого набора без потери интерпретируемости, которая может возникать при использовании других методов, например, метода главных компонент. Также было отмечено, что новые признаки позволили повысить точность картографирования используемых пахотных земель России и снизили ошибку типа *False Negative* (пропуска цели).

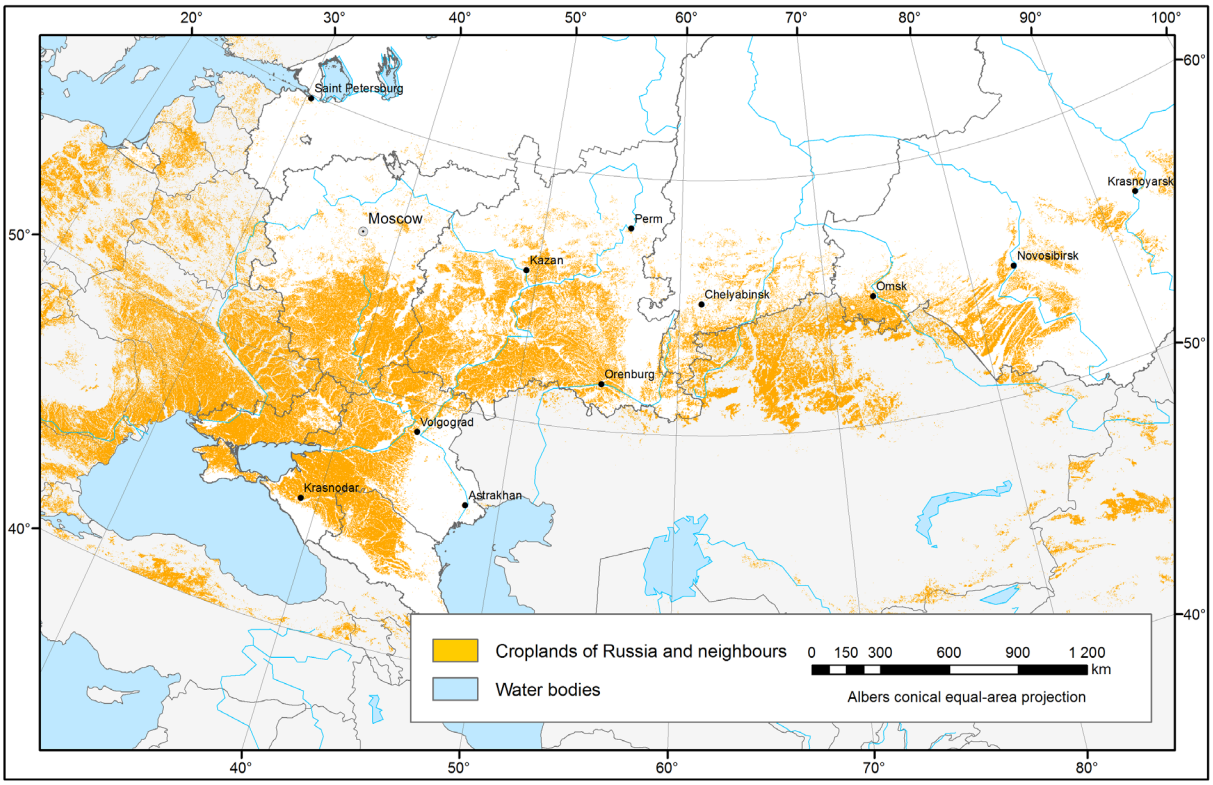


Рис. 2. Карта используемых пахотных земель России и соседних стран, полученная на основе новых спектрально-временных признаков распознавания

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Список источников

1. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А. Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 330–341.

2. Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации – Компьютерная оптика. Самара. ИСОИ РАН. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.

3. Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A. Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 269–278. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1130874.

4. Плотников Д. Е., Барталев С. А. Автоматическая технология создания и ежегодного обновления карт используемых пахотных земель на континентальном уровне // Девятая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М. : ИКИ РАН, 14–18 ноября 2011. Сборник тезисов конференции, 2011. С. 370.

5. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A., Loupian E., Proshin A. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE proceedings of ITNT 2022. VIIIth International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IEEE, 2022. P. 9848630. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

6. Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Барталев С. А. Спутниковый мониторинг сахарного тростника в Южной Индии с помощью Sentinel-2 для оценки водообеспечения

и азотного питания плантаций // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы Восемнадцатой Всероссийской открытой конференции. 16–20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 353. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

7. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Барталев С. А. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе временных серий синтезированных ежедневных изображений Landsat на территорию Приморского края // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» : тезисы докладов. 14–18 ноября 2016. М. : ИКИ РАН, 2016. С. 387.

8. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Жуков Б. С., Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А., Кашницкий А. В., Прошин А. А. Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА «Метеор-М» No 2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276–282.

9. Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е., Толпин В. А., Щербенко Е. В. Анализ результатов эксперимента по созданию опорных выборок на больших территориях с помощью краудсорсинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 20-й Международной конференции. М. : ИКИ РАН, 2022. С. 353. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.

10. Плотников Д. Е., Бойматов Ю. Ш., Елкина Е. С., Щербенко Е. В., Плотникова А. С. Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.

11. Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Медведева М. А., Плотников Д. Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 1. С. 150–162.

12. Лупян Е. А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю. С., Плотников Д. Е., Толпин В. А., Уваров И. А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

13. Середа И. И., Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304 310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.

14. Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.

D. E. Plotnikov[1], P. A. Kolbudaev[2], E. S. Elkina[3]
[1, 2, 3]Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE IMPORTANCE OF SPECTRAL-TEMPORAL FEATURES FOR CROPLAND MAPPING OVER RUSSIA

Abstract. The study provides an analysis of new spectral-temporal and multispectral mapping features based on time series of high temporal resolution aimed at development of cropland maps of Russia based on MODIS data. The new features were assessed through local and global ratings based on the class-relevant MDA metric, global correlograms, as well as F1-scoring for models based on Random Forest classifier. The results confirm the value of the new feature-engineered spectral-temporal mapping features allowing building new machine learning models to increase robustness of cropland mapping over Russia with F1-score of 96%. The new cropland map of Russia was developed based on new interpretable features with an interoperable approach allowing the transfer to other epochs and satellite sensors.

Keywords: croplands, spectral-temporal features, LOWESS, Random Forest, MDA, feature engineering

УДК 528.852 + 504.064

Д. Е. Плотников[1], П. А. Колбудаев[2], Е. С. Ёлкина[3], Е. А. Дунаева[4]
[1, 2, 3] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[4] ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», Симферополь, Россия
[1]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАТЫ СЕВА ЯРОВЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ РАЗНОСЕЗОННОЙ МОДЕЛИ *LSTM* И РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Аннотация. В работе исследуется возможность дистанционной оценки фактической даты сева яровых культур на основе рядов восстановленных ежедневных спутниковых данных КМСС и методов машинного обучения. Изучаются мультисезонные модели архитектуры *Bi-directional LSTM*, использующие спутниковые данные нескольких сезонов вегетации с дополнительным включением метеорологических индикаторов, обученные по наземным данным о фенологии различных яровых культур Курской области и Республики Крым. Проведён сравнительный анализ характеристик точности *MAE* параметризованных моделей с разделением обучающих данных на подвыборки на уровне объектов. Лучшая мультисезонная мультимодальная модель, построенная по данным пяти сезонов вегетации, имеет ошибку *MAE* оценки 4,2 дня, указывая на перспективность временных серий КМСС для решения этой задачи с приемлемой точностью для использования в моделях развития культур.

Ключевые слова: дата сева, КМСС, *LSTM*, *LOWESS*, мультисезонная модель, мультимодальная модель

Введение. Спутниковые данные позволяют получать актуальную и детальную информацию о расположении, состоянии и фенологии посевов, что дает возможность использовать дистанционное зондирование для параметризации имитационных моделей, традиционно ограниченных качеством и разрешением почвенных и погодных данных. Ассимиляция спутниковых наблюдений в модели развития культур способствует более точной оценке их состояния и улучшает прогнозирование урожайности, оптимизируя управление сельскохозяйственными рисками.

Для параметризации и дальнейшей работы имитационных моделей требуется точная информация о дате сева сельскохозяйственных культур за различные сезоны вегетации, которая в общем случае недоступна на больших неоднородных территориях. Как правило, разработанные подходы нацелены на определение фенологических характеристик на основе алгоритмов постобработки временных рядов. Одним из наиболее популярных алгоритмов такого рода является *TIMESAT* [1], который использует ряд фильтров, включая Голая – Савицкого, ассиметричный гауссов фильтр, двойные логистические функции и других, определяя даты начала (всходов)

© Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А., 2025

и окончания «вегетационного периода». В последнее время получили распространение методы глубокого обучения для анализа временных рядов в целях решения задач сельскохозяйственного мониторинга, однако многие работы в этой области делают акцент на определении оптимальных сроков сева [2; 3], а не определении фактической даты сева.

В ИКИ РАН разработаны технологии для формирования рядов спутниковых индикаторов ежедневного временного разрешения по данным множества различных спутниковых систем, включая российские и зарубежные, в оперативном режиме [4–6] в целях оперативного картографирования и оценки состояния сельскохозяйственных культур и пахотных земель [7; 13]. Продолжают развиваться методы обработки спутниковых данных приборов серии КМСС («Метеор-М»), упрощая использование продуктов в методах и системах оперативного и высокодетального мониторинга растительного покрова на территориях континентального охвата [5–7; 11; 12; 14–17]. Целью настоящей работы является разработка метода дистанционной оценки фактической даты сева яровых сельскохозяйственных культур на основе нейросетевой модели LSTM, а также описывающих разнородные территории наземных данных, разносезонных временных серий спутниковых данных КМСС и метеорологических индикаторов.

Данные и методы. В работе использовались наземные данные о фенологии более 1 600 полей, занятых различными сельскохозяйственными культурами на территории Курской области и Республики Крым за сезоны вегетации 2018–2022 гг. (рис. 1), а также восстановленные безоблачные ряды спутниковых данных КМСС с ежедневным временным разрешением и с пространственным разрешением 60 м (метрики *Red*, *Nir*, *NDVI*), сформированные в ИКИ РАН на основе ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Кроме того, в работе были использованы временные ряды скользящих среднепятидневных значений измерений влажности и температуры верхнего слоя почвы по данным *NCEP\NCAR* (*https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html*) с разрешением 0,5°(исходно 6-часовые).

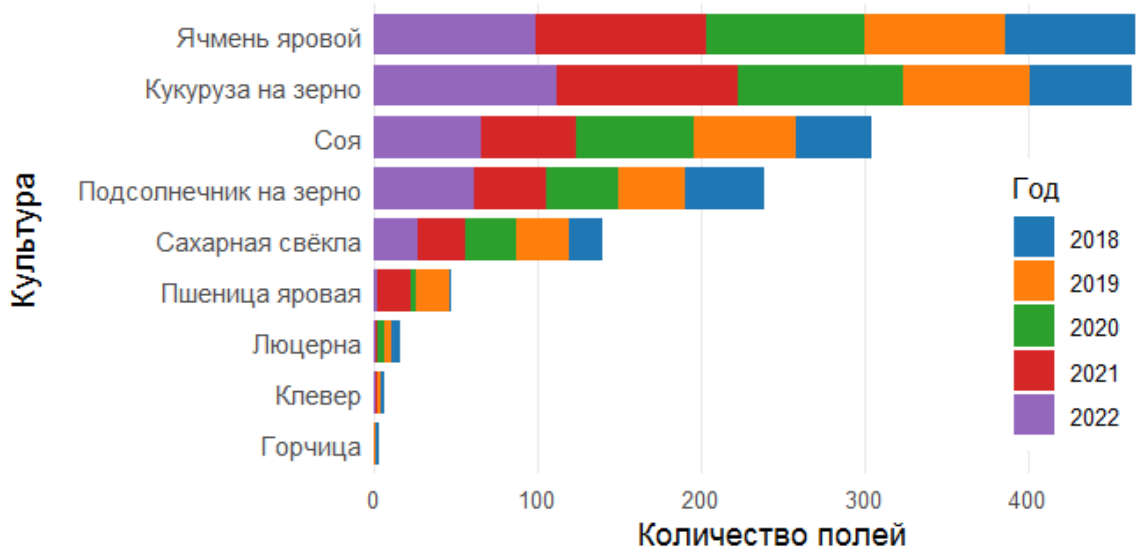


Рис. 1. Статистика обучающей выборки, агрегированная по культурам и годам

В качестве исследуемой модели в работе использовалась нейросетевая архитектура *Bi-directional LSTM*, которая принимала на вход временные ряды спутниковых и метеорологических индикаторов и была оптимизирована с использованием библиотеки *Keras Tuner*.

Эксперименты были нацелены: 1) на исследование устойчивости мультисезонной модели при работе на незнакомом ей сезоне; 2) изучение дополнительной информативности метеорологических индикаторов в мультимодальных моделях. В процессе исследования устойчивости мультисезонной модели производилось обучение на четырёх сезонах из пяти, а на пятом производилось тестирование на всех полях с формированием метрики средней абсолютной ошибки *MAE* (схема «4 + 1» в табл. 1). Кроме этого, для каждого из двух указанных выше видов экспериментов была обучена и исследована полная мультисезонная модель, которая использовала полный набор из пяти сезонов данных (табл. 1). При обучении по схеме «4+1» вся выборка из 4 сезонов была поделена на обучающий и валидационный поднаборы, а тестовым поднабором являлся оставшийся пятый сезон; этот эксперимент повторялся пять раз – для каждого из сезонов. При обучении по схеме «полного набора» вся многолетняя выборка была поделена на обучающий, валидационный и тестовый поднаборы.

Необходимо отметить, что разделение на поднаборы происходило на уровне объектов (целых полей) в целях предотвращения искусственного завышения точности получаемых результатов из-за скоррелированности поднаборов выборки, которое произошло бы при разделении поднаборов на уровне пикселей, в процессе чего один тот же объект (поле) фактически мог попасть в разделяемые поднаборы. Единицей выборки являлся пиксель КМСС с разрешением 60 метров.

Результаты и обсуждение. Оптимизированная модель *LSTM* была обучена независимо для каждого эксперимента согласно описанию в разделе выше. Как было отмечено, параллельный блок экспериментов касался мультимодальных моделей, которые дополнительно использовали метрики, полученные на основе временных рядов метеорологических данных. Таким образом, были получены оценки суммарно 12 моделей, пять из которых являлись мультисезонными и использовали только спутниковые данные (второй столбец табл. 1), ещё пять – мультисезонными и дополнительно использовали метеоинформацию (третий столбец табл. 1), а также для каждой модели «полного набора» (нижняя строка табл. 1).

Таблица 1

Характеристики моделей для оценки даты сева в разрезе изучаемых схем

Схема	**MAE только по ДЗЗ, дни**	**MAE по ДЗЗ и Метео, дни**
«4 + 1», 2018 г.	6,4	7,1
«4 + 1», 2019 г.	9,4	13,3
«4 + 1», 2020 г.	14,4	13,7
«4 + 1», 2021 г.	6,9	7,4
«4 + 1», 2022 г.	10,8	26,7
Полный набор	6,1	4,2

Можно заметить, что лучшими моделями оказались модели «полного набора». Кроме того, отмечается тенденция практически систематического отставания в точности оценки даты сева для мультимодальных моделей схемы «4 + 1», однако лучшей из двух моделей «полного набора» оказалась, наоборот, мультимодальная модель. Тепловая диаграмма рассеяния оценки даты сева для лучшей модели с ошибкой *MAE* 4,2 дня представлена на рис. 2.

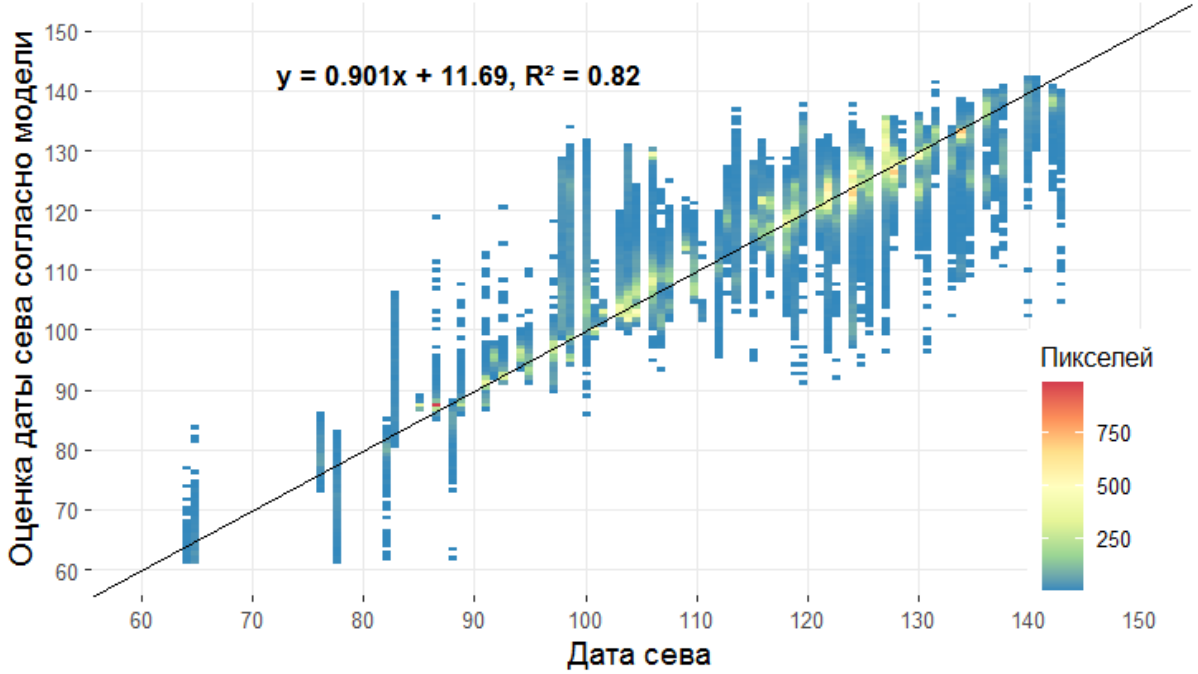


Рис. 2. Тепловая диаграмма рассеяния при сравнении наземной и модельной даты сева по тестовому набору для лучшей модели из табл. 1

Схемы «4 + 1» и схема «полного набора» принципиально различаются по условиям: в первом случае модель «не видит» тестируемый сезон с точки зрения климатических особенностей, а во втором – «видит», хотя и для других объектов. Учитывая размах ошибок в схемах «4 + 1», можно сделать вывод, что в задаче точного определения даты сева критически важным является доступ к максимально возможной вариабельности сезонных агроклиматических условий произрастания культур. При этом генерализующей способности *Bi-directional LSTM* недостаточно для того, чтобы корректно учесть метеоинформацию четырех различных сезонов для точной оценки даты сева тестового сезона вегетации. Максимальная точность достигается для полной мультимодальной модели по причине увеличения числа предикторов и сезонов. В заключение можно сделать вывод, что восстановленные серии ежедневных безоблачных изображений КМСС позволяют выполнять оценку даты сева яровых культур со средней абсолютной ошибкой 4,2 дня с пространственным разрешением 60 м.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Список источников

1. Eklundh L., Jönsson P. TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics // Remote Sensing Time Series. 2015. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 22. DOI: 10.1007/978-3-319-15967-6_7.

2. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Управление сроками сева по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 149–160, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160.

3. Радченко Л. А., Ганоцкая Т. Л., Радченко А. Ф., Бабанина С. С. Сроки сева и их влияние на урожайность и качество зерна сортов озимой пшеницы. Зерновое хозяйство России. 2021;(6):95–103. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-78-6-95-103.

4. Плотников Д. Е, Колбудаев П. А., Жуков Б. С., Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А., Кашницкий А. В., Прошин А. А. Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА «Метеор-М» No 2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276–282.

5. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Polyanskiy I. V. Accuracy Assessment of Atmospheric Correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 Data over Northern Eurasia // Remote sensing. 2023. Vol. 15. Issue 18. P. 4395. DOI: doi.org/10.3390/rs15184395.

6. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A., Loupian E., Proshin A. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE proceedings of ITNT 2022. VIIIth International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IEEE, 2022. P. 9848630. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

7. Kolbudaev P., Plotnikov D., Loupian E., Proshin A., Matveev A. The methods and automatic technology aimed at imagery georeferencing, cloud screening, atmospheric and radiometric correction of KMSS-M satellite data // E3S Web of Conferences. 2021. Т. 333. С. 01006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133301006.

8. Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131-141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.

9. Плотников Д. Е., Бойматов Ю. Ш., Елкина Е. С., Щербенко Е. В., Плотникова А. С. Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.

10. Середа И. И., Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.

11. Лупян Е. А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю. С., Плотников Д. Е., Толпин В. А., Уваров И. А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

12. Плотников Д. Е., Чжоу Ц., Колбудаев П. А., Лупян Е. А., Матвеев А. М., Зимин М. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Лебедев С. В. Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49. № 3. С. 504–516. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.

13. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Барталев С. А., Лупян Е. А. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений *Landsat* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 112–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127.

14. Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Медведева М. А., Плотников Д. Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 150–162.

15. Плотникова А. С., Хамедов В. А., Архипцева Е. А., Подольская Е. С., Нарыкова А. Н., Алексеев А. Б. Обзор российских геоинформационных сервисов природоохранной тематики на основе открытого программного обеспечения // Геоинформатика. 2024. № 4. С. 4–20. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-4-20.

16. Подольская Е. С. Геоинформационные технологии в интеллектуальных системах как дисциплина в программе подготовки студентов по специальности «Картография и геоинформатика» // Геодезия и картография. 2024. № 8. С. 51–60. https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1010-8-51-60.

17. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.

D. E. Plotnikov[1], P. A. Kolbudaev[2], E. S. Elkina[3], Ie. A. Dunaeva[4],
[1, 2, 3] Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
[4] Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia
[1]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

IDENTIFICATION OF SPRING CROPS SOWING DATE USING LSTM MULTI-SEASON MODEL AND SATELLITE TIME SERIES OF HIGH TEMPORAL RESOLUTION

Abstract. The study uses seasonal time series of daily cloud-free multispectral composite images of KMSS (Meteor-M) device with a spatial resolution of 60 meters, and verified ground truth data on the actual sowing date for various spring crops in Kursk region and in the Republic of Crimea for seasons of 2018-2023. Bi-directional LSTM models of various architectures and training scheme were studied and evaluated, with best multi-season model reaching mean absolute error (MAE) of 4.2 days on the test set with no reference to the crop type.

Keywords: sowing date, KMSS, LSTM, LOWESS, multi-season model, multimodal model

УДК 528.8:629.78, 535.361

М. В. Тарасенков[1], М. В. Энгель[2], В. В. Белов[3], А. С. Богданова[4]
[1, 2, 3, 4]Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
[1]TMV@iao.ru, [2]Angel@iao.ru, [3]Belov@iao.ru, [4]ALS@iao.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕПАДА ВЫСОТ

Аннотация. Рассматривается проблема восстановления коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым данным. Предложен алгоритм атмосферной коррекции спутниковых изображений, который учитывает влияние неоднородности отражения земной поверхности и перепада высот на результат восстановления коэффициентов отражения земной поверхности. На примере участка с координатами 50.1–50.4º с. ш., 90.1–90.4º в. д. результаты работы предложенного алгоритма сравниваются с результатами алгоритма *MOD09 NASA*. Сравнение показывает, что среднее отличие для снимков за период времени с 01.05.2022 по 31.05.2022 равно: 0,022 для канала № 1 *MODIS*; 0,02 – для канала № 2; 0,041 – для канала № 3 и 0,02 – для канала № 4.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, данные *MODIS*, коэффициент отражения земной поверхности, рельеф, неоднородная земная поверхность

Введение. Коэффициенты отражения земной поверхности имеют важное значение при решении широкого круга задач спутникового мониторинга. К ним относятся такие задачи, как мониторинг состояния лесных территорий, сельскохозяйственных культур, водных территорий и др. Для получения этих данных существует достаточно много *RTM*-алгоритмов восстановления, в которых в качестве исходных данных используются спутниковые измерения яркости принимаемого спутником излучения в канале прибора и модели атмосферы. Алгоритм восстановления при этом строится на моделировании переноса излучения и выполнении атмосферной коррекции. Одним из наиболее известных алгоритмов является *MOD09* [1], который используется для получения данных из спутниковых измерений *MODIS*. Можно также упомянуть алгоритм *Sen2cor* для данных *Sentinel-2*, *LaSRC* для данных *Landsat* и *VNP09* для данных спутника *SUOMI NPP*. В работах [2; 3] нами предложен алгоритм, в котором, в отличие от альтернативных алгоритмов, учитывается влияние неоднородности отражения земной поверхности по коэффициенту отражения и по перепаду высот. В данной статье рассмотрен предложенный алгоритм, а также результат сравнения его работы с алгоритмом *MOD09* для тестового участка земной поверхности.

Предлагаемый алгоритм. Основу алгоритма составляют две системы уравнений:

© Тарасенко М. В., Энгель М. В., Белов В. В., Богданова А. С., 2025

$$I_{sum,ij} = I_{atm,ij} + Q_{ij}\left(\delta_{sat,ij}\frac{1}{\pi}\exp\left(-\tau_{ij}\right) + A_{ijij}\frac{\Omega_{ij}}{2\pi}\right) + \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{M_{1,ij}}\sum_{\substack{l=1\\l\neq j}}^{M_{2,ij}} A_{ijkl}\frac{\Omega_{kl}}{2\pi}Q_{kl} + A_{out,ij}\overline{Q}_{ij}, \quad (1)$$

$$Q_{ij} = r_{surf,ij}\left(\delta_{sun,ij}E_{0,nsc} + \frac{\Omega_{ij}}{2\pi}E_{0,sc}\right)\left(1 + \sum_{k=1}^{M_{3,ij}}\sum_{l=1}^{M_{4,ij}} C_{ijkl}\frac{\Omega_{kl}}{2\pi}r_{surf,kl} + C_{out,ij}\overline{r}_{surf,ij} + \frac{\left(\overline{r}_{surf,ij}\gamma_1\right)^2}{1-\overline{r}_{surf,ij}\gamma_1}\right), \quad (2)$$

где

$$A_{ijkl} = h\left(\rho_{w,ijkl}, \alpha_{w,ijkl}, \mu_{d,ij}\right)S_{kl}, \quad (3)$$

$$A_{out,ij} = \iint_S h\left(\rho_w, \alpha_w, \mu_{d,ij}\right)dS - \sum_{k=1}^{M_{1,ij}}\sum_{l=1}^{M_{2,ij}} A_{ijkl} \quad (4)$$

$$\overline{Q}_{ij} = \frac{I_{sum,ij} - I_{atm,ij}}{\frac{1}{\pi}\exp\left(-\tau_{ij}\right) + \iint_S h\left(\rho_w, \alpha_w, \mu_{d,ij}\right)dS} \quad (5)$$

$$C_{ijkl} = h_1\left(\rho_{w,ijkl}\right)S_{kl} \quad (6)$$

$$\gamma_1 = 2\pi\int_0^{\pi R_e} h_1\left(\rho_w\right)d\rho_w \quad (7)$$

$$C_{out,ij} = \gamma_1 - \sum_{k=1}^{M_{3,ij}}\sum_{l=1}^{M_{4,ij}} C_{ijkl} \quad (8)$$

$$\overline{r}_{surf,ij} = \frac{Q_{ij}}{E_{0,nsc} + E_{0,sc} + \gamma_1 Q_{ij}} \quad (9)$$

где $I_{sum,ij}$ – суммарная интенсивность, принимаемая спутником для пикселя i-й строки и j-го столбца снимка, Вт/(м^{2}мкм·ср); $I_{atm,ij}$ – интенсивность излучения, не взаимодействовавшего с земной поверхностью, Вт/(м^{2}мкм·ср); Q_{ij} – светимость поверхности пикселя с номером (i,j), Вт/(м^{2}мкм); $\delta_{sat,ij}$ – индикатор экранирования рельефом нерассеянного отраженного поверхностью излучения в направлении спутника (0 – излучение полностью экранировано рельефом, 1 – экранирования нет); τ_{ij} – оптическая толщина трассы от наблюдаемого пикселя (i,j) до спутника в момент его съемки; A_{ijkl} – интенсивность бокового подсвета пикселя (i,j) пикселем (k,l) на единицу светимости поверхности, 1/ср; Ω_{ij} – телесный угол направлений в атмосфере, которые не экранируются рельефом (лежит в диапазоне от 0 до 2π ср); $A_{out,ij}$ – интенсивность бокового подсвета от участков вне области восстановления, 1/ср; $\overline{Q}_{ij}$ – светимость поверхности в предположении об ее однородности, Вт/(м^{2}мкм); $r_{surf,ij}$ – коэффициент отражения земной поверхности; $E_{0,nsc}$, $E_{0,sc}$ – освещенность земли нерассеянным и рассеянным излучением Солнца без учета рельефа и многократного отражения, Вт/(м^{2}мкм); $\delta_{sun,ij}$ – индикатор экранирования рельефом прямого солнечного излучения, попадающего в пиксель; C_{ijkl} – освещенность пикселя (i,j) однократно отраженным излучением пикселя (k,l) при единичной светимости поверхности; $C_{out,ij}$ – освещенность однократно отраженным излучением от областей вне

области восстановления; $\overline{r}_{surf,ij}$ – коэффициент отражения земной поверхности в предположении об однородности земной поверхности; γ_1 – вклад однократно отраженного излучения от всей поверхности земли при r_{surf}=1; $M_{1,ij}$, $M_{2,ij}$ – количество строк и столбцов от наблюдаемого пикселя в пределах радиуса формирования бокового подсвета [2]; $M_{3,ij}$,$M_{4,ij}$ – количество строк и столбцов от наблюдаемого пикселя в пределах радиуса формирования дополнительной освещенности земной поверхности [2].

Величины $I_{atm,ij}$, h, h_1, $E_{0,sc}$, γ_1 в системах уравнений (1)–(2) рассчитываются разработанными ранее программами алгоритма Монте-Карло. Величины $\Omega_{i,j}$, $\delta_{sat,ij}$, $\delta_{sun,ij}$ рассчитывались с использованием ЦМР [4] для рассматриваемого участка по алгоритму, приведенному в [3].

Сравнение результатов алгоритма с данными MOD09. Разработанный алгоритм использовался для восстановления коэффициентов отражения земной поверхности для участка с координатами 50.1–50.4º с. ш., 90.1–90.4º в. д. за период времени с 01.05.2022 по 31.05.2022 для каналов *MODIS* № 1–4. Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными алгоритмом *MOD09*. Результаты сравнения средних значений коэффициентов отражения приведены на рис. 1, а на рис. 2 – точечные диаграммы сравнения результатов предлагаемого алгоритма и *MOD09*. Анализ результатов показывает, что среднее отличие результатов предложенного алгоритма от алгоритма *MOD09* составляет 0,022 для канала № 1 *MODIS*; 0,02 – для канала № 2; 0,041 – для канала № 3 и 0,02 – для канала № 4. При этом коэффициент корреляции равен 0,992; 0,984; 0,990 и 0,993 соответственно. Анализ влияния перепада высот показывает, что его влияние незначительно.

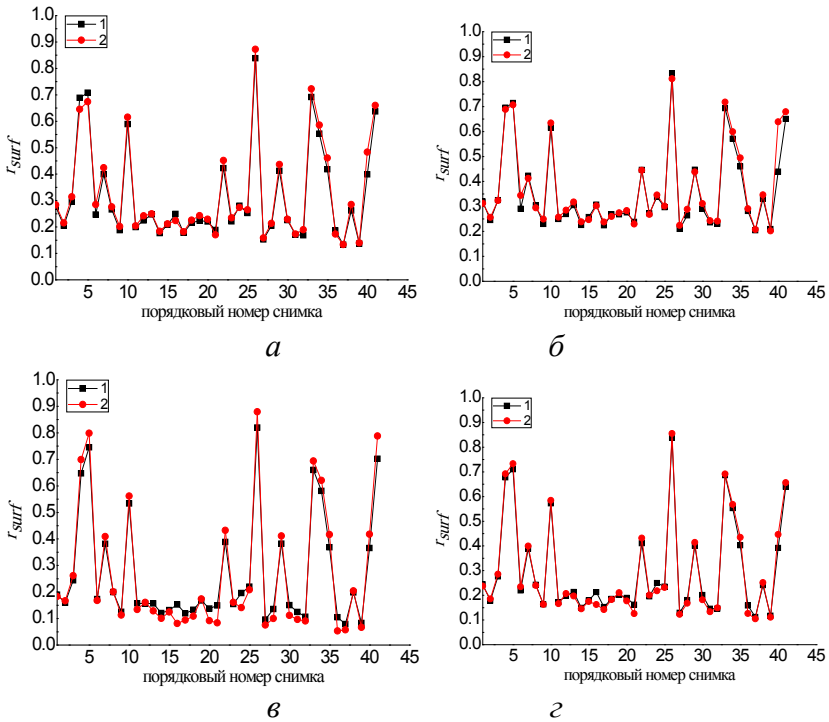


Рис. 1. Средние значения коэффициентов отражения, полученных предложенным алгоритмом и алгоритмом *MOD09* для рассматриваемого участка:
1 – алгоритм *MOD09*; *2* – предлагаемый алгоритм

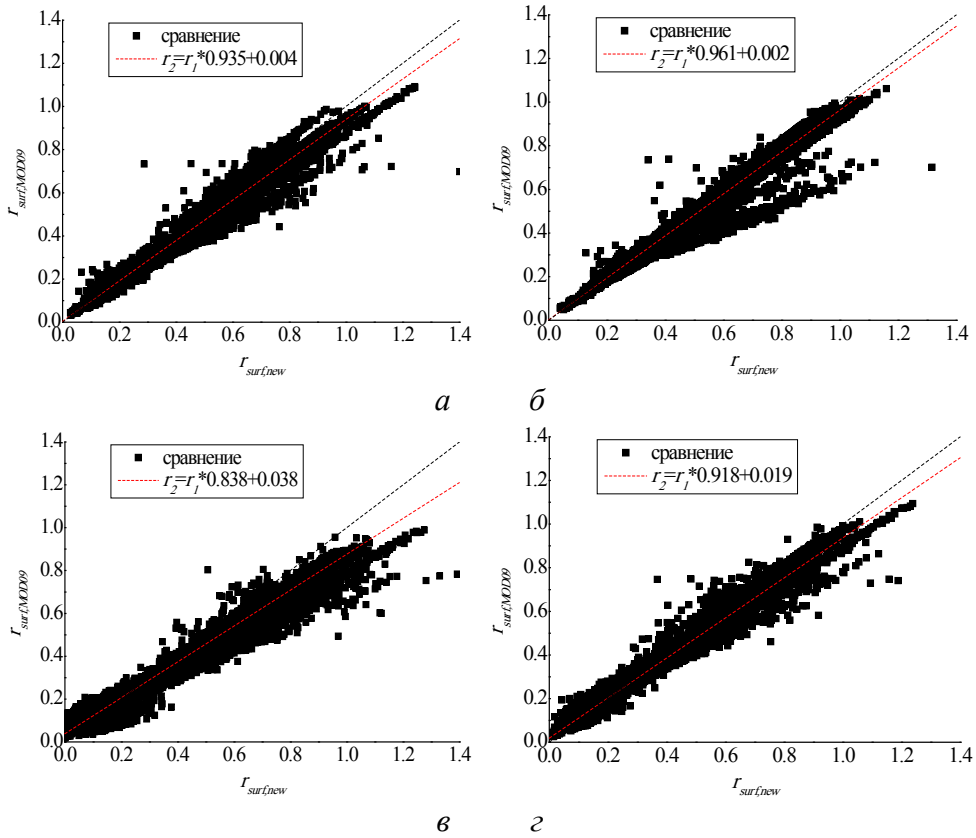


Рис. 2. Диаграмма рассеяния восстановленных коэффициентов отражения для каналов *MODIS* № 1–4

Заключение. Разработан алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности, в котором учитывается влияние неоднородности коэффициента отражения земной поверхности и перепада высот при формировании принимаемого сигнала. Сравнение для тестового участка показывает, что влияние перепада высот мало. Сопоставление с данными *MOD09* показывает хорошее согласие результатов алгоритмов.

Список источников

1. Breon F. M., Vermote E. Correction of MODIS surface reflectance time series for BRDF effects // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 125. P. 1–9.

2. Tarasenkov M. V., Belov V. V., Engel M. V., Zimovaya A. V., Zonov M. N., Bogdanova A. S. Algorithm for the Reconstruction of the Ground Surface Reflectance in the Visible and Near IR Ranges from MODIS Satellite Data with Allowance for the Influence of Ground Surface Inhomogeneity on the Adjacency Effect and of Multiple Radiation Reflection // Remote Sens. 2023. V. 15. P. 2655.

3. Tarasenkov M. V., Belov V. V., Engel M. V. Retrieval of Ground Surface Reflectance from MODIS Satellite Data with Allowance for Reflectance Heterogeneity and Rugged Topography // Atmos Ocean Opt. 2024. V. 37. P. S48–S58.

4. Digital Landscape Model. URL: https://www.ngdc.noaa.gov.

M. V. Tarasenkov[1], M. V. Engel[2], V. V. Belov[3], A. S. Bogdanova[4]
[1, 2, 3, 4]V. E. Zuev Institute of atmospheric optics SB RAS, Tomsk, Russia
[1]TMV@iao.ru, [2]Angel@iao.ru, [3]Belov@iao.ru, [4]ALS@iao.ru

GROUND SURFACE REFLECTANCE RECOVERY FROM SATELLITE DATA TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF NON UNIFORM REFLECTANCE AND ALTITUDE DIFFERENCES

Abstract. The problem of ground surface reflectance recovery using satellite data is considered. An algorithm for atmospheric correction of satellite images is proposed, which takes into account the influence of the inhomogeneity of the ground surface reflectance and the difference in altitude on the result of ground surface reflectance recovery. Using the example of a site with coordinates 50.1–50.4º N, 90.1–90.4º E, the results of the proposed algorithm are compared with the results of the NASA MOD09 algorithm. The comparison shows that the average difference for images for the time period from 01.05.2022 to 31.05.2022 is 0.022 for MODIS band No. 1, 0.02 for band No. 2, 0.041 for band No. 3, and 0.02 for band No. 4.

Keywords: atmospheric correction, MODIS data, ground surface reflectance, relief, non uniform ground surface

УДК 004.932.1

Р. К. Федоров[1], Ю. В. Авраменко[2]
[1, 2]Институт динамики систем и теории управления
им. В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
[1]fedorov@icc.ru, [2]avramenko@icc.ru

ИНСТРУМЕНТ РАЗМЕТКИ РАСТРОВЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье представлен специализированный инструмент для полуавтоматической разметки данных дистанционного зондирования Земли, интегрированный в Геопортал ИДСТУ СО РАН. Инструмент позволяет эффективно создавать полигональные объекты на снимках *Sentinel*-2 с использованием комбинации сегментационной модели *Segment Anything Model* (*SAM*) и алгоритма *Suzuki-Abe* для выделения контуров. Инструмент поддерживает работу в браузере без необходимости установки дополнительного ПО, обеспечивает подключение картографических подложек и навигацию по координатам. Применение инструмента продемонстрировано на примере классификации сельскохозяйственных земель Иркутской области, где была сформирована обучающая выборка по 10 видам культур. Основные преимущества – баланс между точностью и скоростью разметки, однако для простых объектов ручной метод может быть более эффективным.

Ключевые слова: машинное обучение, сегментация изображений, геопортал, Sentinel-2, полуавтоматическая разметка, веб-инструмент

Одной из важных задач при классификации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является подготовка обучающей выборки. Для применения методов машинного обучения, в том числе нейронных сетей, требуется выборка большого объема. При ее создании важно сделать акцент на качество, так как такие ошибки, как неточные границы, смешивание разных классов и т. д., значительно влияют на качество классификации. Процесс подготовки обучающей выборки занимает значительное время. В текущей работе будет представлен инструмент, автоматизирующий подготовку данных для методов машинного обучения.

Обучающая выборка в контексте обработки данных ДЗЗ представляется в виде набора полигональных объектов, задающих на снимках положение классов. Полигональное представление обучающей выборки является достаточно удобным и позволяет автоматически преобразовать в набор векторов или тензоров разных размеров и каналов. В семантике полигональных объектов кроме имени класса, часто сохраняют путь к данным ДЗЗ, время съемки и т. д.

Для создания обучающей выборки, как правило, пользуются специализированными инструментами разметки, наиболее распространенными среди которых являются инструменты ручного ввода – пользователь при по-

© Федоров Р. К., Авраменко Ю. В., 2025

мощи компьютерной мышки в графическом редакторе указывает положение прецедента и задает его описание. Недостатком таких инструментов является необходимость в установке дополнительного программного обеспечения, отсутствие многопользовательского режима. Существуют веб-версии подобных инструментов, однако они не приспособлены для разметки данных ДЗЗ. В них снимки требуется заранее скачивать, отсутствует возможность навигации по координатам и подключения дополнительных картографических слоев, помогающих в определении класса и т. д. Прецеденты часто имеют сложные формы, для которых процесс задания границ достаточно трудоемкий. Поэтому актуальным является создание собственного инструмента, автоматизирующего подготовку обучающей выборки в контексте обработки данных ДЗЗ.

В нашей работе представляем инструмент разметки, встроенный в Геопортал ИДСТУ СО РАН. В Геопортале хранится и постоянно обновляется весь массив снимков *Sentinel-2* на Иркутскую область, Республику Бурятия, Забайкальский край и Монголию с 2017 г. Разработан каталог снимков, включающий поисковую систему и функции отображения снимков на карте с возможностью подключения в качестве подложки слоев, предоставленных компаниями *Google, Microsoft, Open street map*, а также векторные и растровые данные пользователя.

Разработана система поиска изображений, которая автоматически формирует упорядоченную по времени последовательность изображений на просматриваемую территорию (рис. 1). В зависимости от масштаба производится выбор файлов, содержащих снимки соответствующего разрешения, что позволяет практически мгновенно отображать данные на карте. Далее продемонстрирован пример работы инструмента разметки (рис. 2).

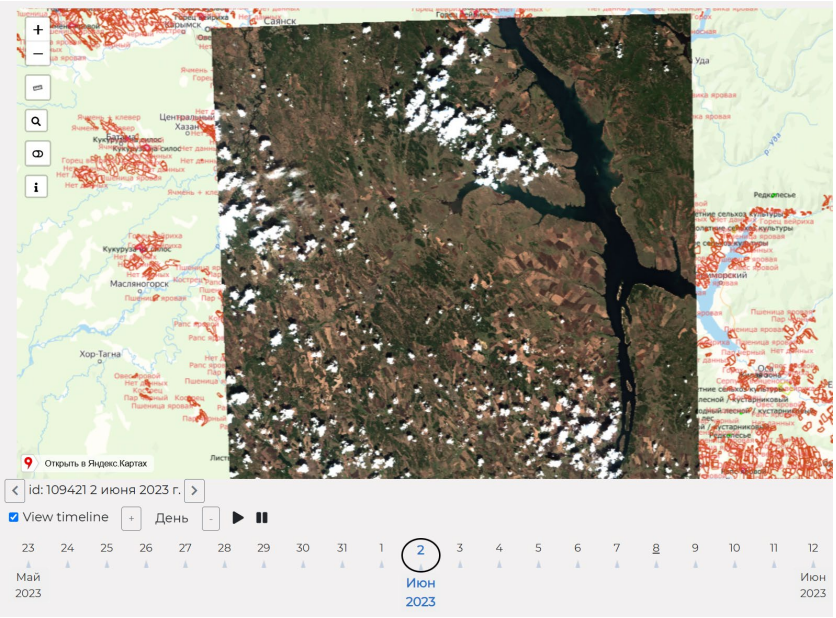


Рис. 1. Просмотр снимков на определенную территорию

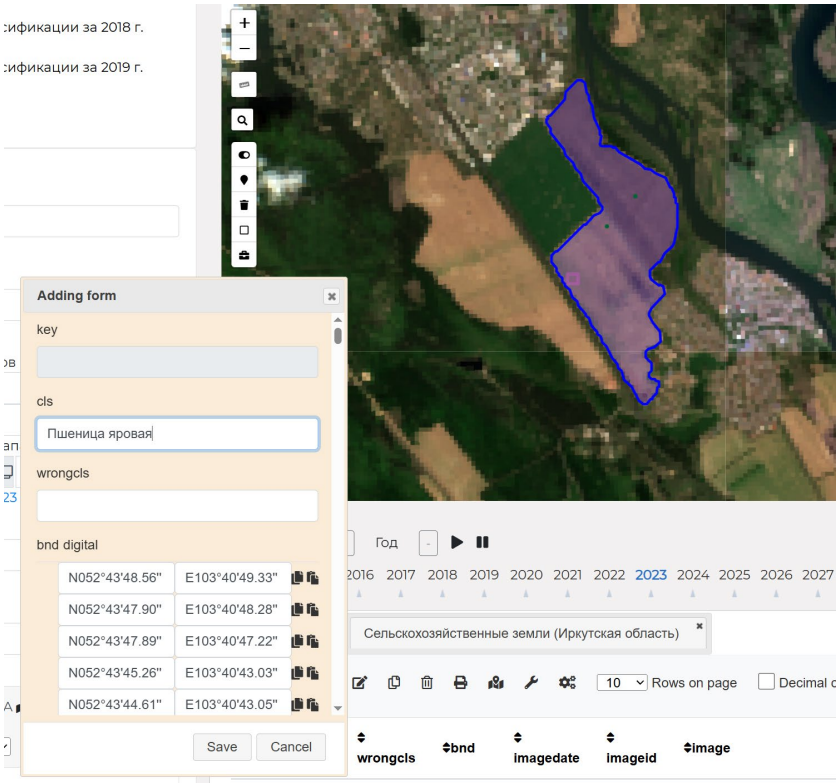


Рис. 2. Пример работы инструмента разметки

Пользователь может указать точки интереса (отображаются на карте зеленым цветом), для которых нужно выделить однородную область. А также исключающие точки (фиолетовый цвет), которые определяют, что не должно попасть в выделяемую область. На основе заданных точек инструмент формирует контур однородной области. Полученный контур можно сохранить в таблице с привязкой к исходному изображению и указанием класса поверхности как показано слева-снизу в дополнительном окне.

Используемый алгоритм построения контура основан на комбинации двух методов: сегментация однородной области изображения, поиск граничных пикселей на бинарном изображении. За сегментацию отвечает полуавтоматическое выделение объекта при помощи *SAM* (*Segment Anything Model*) – это сегментационная модель, вышедшая в 2023 г. [1]. *SAM* сегментирует объекты на растровых изображениях в соответствии с запросом, в качестве которого может выступать приблизительное местоположение объекта в виде набора точек или прямоугольной области. Преимуществом данной сети является способность оперативно обрабатывать запросы в браузере, используя *CPU*. Далее при помощи алгоритма, предложенного *Suzuki-Abe* [2], выполняется выделение контура, который сохраняется в формат *WKT* и добавляется в базу данных.

Разработанный инструмент был апробирован при составлении обучающей выборки для классификации земель Иркутской области. В качестве вспомогательного векторного слоя использовались данные министерства сельского хозяйства за 2023 г. Сразу использовать данные в качестве обучающей выборки было невозможно из-за множества ошибок. Сформирована обучающая выборка по 10 видам культур, возделываемых в Иркутской области.

В результате применения реализованного инструмента разметки пространственных данных была составлена обучающая выборка для методов машинного обучения. Особенностью данного инструмента является соотношение точности с приемлемой скоростью. Однако существуют и ограничения по применению веб-версии инструмента. Данное ограничение связано со временем, затрачиваемым на подготовку векторного представления изображения в браузере. Поэтому, исходя из практических наблюдений, можно рекомендовать использовать ручной способ разметки, если на всем изображении необходимо выделить один или три объекта с простым контуром (4–5 точек), полуавтоматический, если объектов больше 5 и их контур задан более чем 5–7 координатами.

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

Список источников

1. Kirillov A., Mintun E., Ravi N., Mao H., Rolland C., Gustafson L., Xiao T., Whitehead S., Berg A. C., Lo W.-Y., Dollar P., Girshick R. Segment Anything // Meta AI Research, FAIR. 2023. arXiv:2304.02643v1 [cs.CV]. URL: https://arxiv.org/abs/2304.02643 (дата обращения: DD.MM.YYYY).

2. Suzuki S., Abe K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // Computer Vision, Graphics, and Image Processing (CVGIP). 1985. Vol. 30, № 1. P. 32–46.

R. K. Fedorov[1], Yu. V. Avramenko[2]

[1, 2]Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

[1]fedorov@icc.ru, [2]avramenko@icc.ru

GEOSPATIAL RASTER DATA ANNOTATION TOOL

Abstract. The article presents a specialized tool for semi-automatic labeling of training datasets in Earth remote sensing (ERS), integrated into the Geoportal of IDSTU SB RAS. The tool enables efficient creation of polygon annotations on Sentinel-2 imagery using a combination of the Segment Anything Model (SAM) for segmentation and the Suzuki-Abe algorithm for contour extraction. The solution operates in a web-browser interface without requiring additional software installation and supports the integration of map layers and coordinate-based navigation. The tool was tested in the classification of agricultural lands in the Irkutsk region, where a training dataset for 10 crop types was created. The key advantages include a balance between labeling accuracy and speed, though manual labeling may be more efficient for simple objects with fewer vertices.

Keywords: machine learning, image segmentation, geoportal, Sentinel-2, semi-automatic labeling, web-based tool

УДК 537.874.2

Д. В. Харламов[1], Д. С. Макаров[1,2], М. Ю. Реушев[1], В. Г. Подопригора[3,4]
[1,2,3] ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[2] Сибирский государственный университет наки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
[4] Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН Красноярск, Россия
[4] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
ikivt@yandex.ru

БАЗА КАЛИБРОВОЧНЫХ ДАННЫХ ПРЯМЫХ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА *L1* ДЛЯ РАСЧЕТОВ КОЭФФЦИЕНТОВ ПОГОННОГО ОСЛАБЛЕНИЯ

Аннотация. В работе представлены результаты регистрации прямых сигналов навигационных спутников диапазона *L1* (ГЛОНАСС, *GPS*, *GALILEO*, *QZSS*). Представлена структура базы калибровочных данных. Приведены примеры траекторий движения интересующих спутников, пригодных для расчетов. Произведен расчет коэффициентов погонного ослабления лесопосадок кедра с различным уровнем влагосодержания. Проведен анализ полученных результатов. Полученные данные могут быть использованы для разработки новых методов исследований лесных массивов.

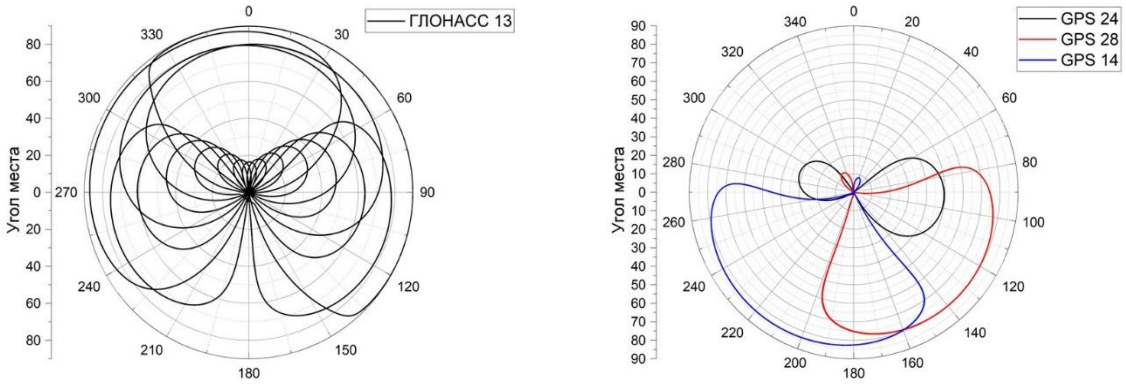
Ключевые слова: сигналы навигационных спутников, радиопросвечивание, слоистые среды, лес, база калибровочных данных, влажность

В процессе распространения, сигналы навигационных спутников взаимодействуют с различными средами земной поверхности, тем самым претерпевают трансформацию, что позволяет восстанавливать диэлектрические параметры этих сред по изменениям характеристик отраженного или рассеянного сигналов [2]. База калибровочных данных (БКД) прямых сигналов навигационных спутников диапазона *L*1 позволяет более точно проанализировать характер изменений регистрируемых данных и провести расчеты коэффициентов погонного ослабления сигналов, прошедших через лесной массив. Пространственно-временные координаты положения навигационных спутников в сочетании с координатами расположения антенны и границы лесного массива позволяют однозначно определить траекторию трассы прохождения сигнала сквозь лесной полог и движения рассеивающего объема на элементах древостоя [1–3]. Данные БКД с некоторой периодичностью должны обновляться в силу изменения траекторий движения спутниковых аппаратов, либо выхода из строя некоторых из них.

Формирование БКД. Регистрация сигналов осуществлялась четырехканальным приемником-регистратором «НСРП-04» с частотой дискретизации 1 Гц, в двухка-нальном режиме, с использованием антенн АМ7 (1 канал)

© Харламов Д. В., Макаров Д. С., Реушев М. Ю., Подопригора В. Г., 2025

и АМ475 (2 канал) с право-круговой поляризацией, ориентированных в зенит. Экспериментальная установка располагалась на высоте ≈ 310 м над уровнем моря в открытом пространстве, что позволило минимизировать эффекты многолучевости, которые вызваны суперпозицией задержанных и ослабленных копий радиосигналов, вследствие сторонних отражений от атмосферы, зданий и т. д Период обращения аппаратов ГЛОНАСС составляет 11 часов 15 минут, повторяемость трасс 7 суток 23 часа 27 минут. Для регистрации прямых сигналов одного полного прохождения спутников, приемник работал 8 суток. Траектория движения ГЛОНАСС 13 представлена на рис. 1, *а*. Период обращения аппаратов *GPS* составляет 11 часов 58 минут, повторяемость трасс раз в сутки, траектории движения *GPS* представлены на рис. 1, *б*, для каждого спутника – своя.



а) *б)*

Рис. 1. *а)* Траектория движения спутника ГЛОНАСС 13 за 8 суток;
б) Траектории движения спутников *GPS* 24, 28, 14 за 8 суток

База данных разделена на 4 каталога с 87 файлами (спутниками) в формате **.CSV*. Все файлы сгруппированы по спутниковым группировкам. Общий объем БКД составляет – 8,11 Гб, количество строк более 22,6 млн. Структура БКД представлена на рис. 2.

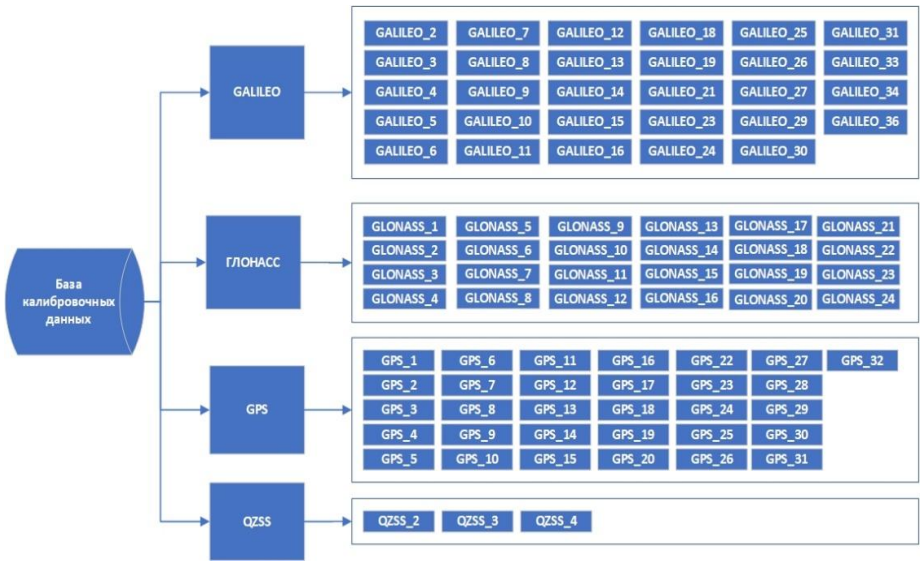
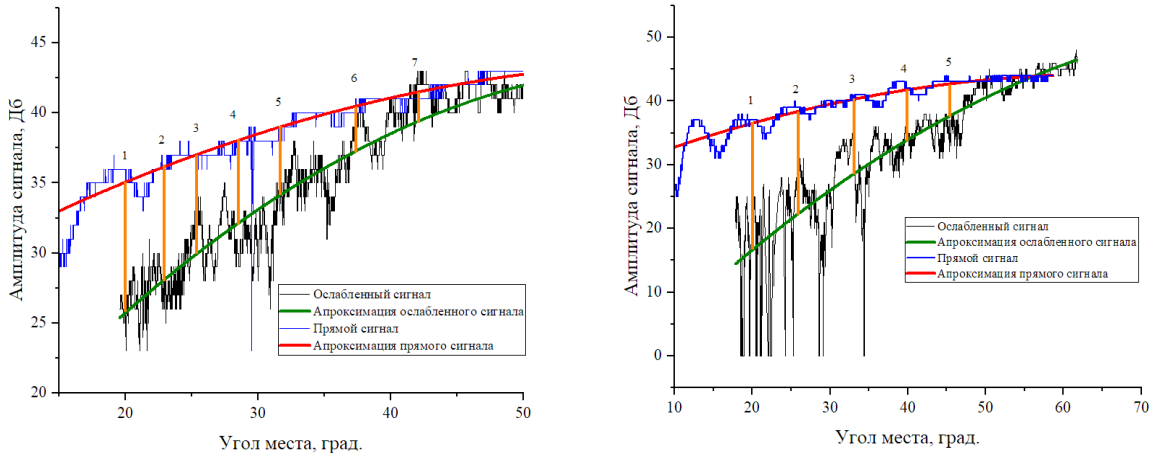


Рис. 2. Структура базы калибровочных данных прямых сигналов навигационных спутников диапазона *L*1

Каждый файл состоит из 13 полей, которые содержат информацию об амплитуде сигнала, местоположении спутника, угле места и азимуте прямого сигнала. В дальнейшем БКД будет интегрирована в облачный сервис первичной обработки, хранения и анализа данных [4].

Обработка и анализ данных. Обработка осуществлялась в программной среде *OriginPro*. Для расчетов были использованы данные за 2024 г., регистрация сигналов проводилась в разные вегетационные периоды. В качестве примера взяты два периода (май и июль), когда влажность древостоя имеет видимые различия. Влажность измерялась комбинированным влагомером МС-7825*PS*, по показаниям 40 деревьев и вычислением среднего значения. На рис. 3, *а* и 3, *б* представлены зависимости амплитуды сигнала от угла места для прямого и ослабленного сигналов НС спутников *GPS* 20 в мае и *GPS* 29 в июле соответственно. Для каждой зависимости выполнена аппроксимация полиномом второго порядка ($R^2 \approx 0{,}9$) и выбраны точки для расчетов коэффициентов погонного ослабления.



а *б*

Рис. 3. Зависимости амплитуды от угла места:
а – майские съемки *GPS* 20; *б* – июльские съемки *GPS* 29

Средние значения влажности древостоя в мае 40,63 %, в июле 51,08 %. Для расчетов амплитуда сигнала переведена в относительные единицы [5]. В выбранных точках, указанных на рис. 3, рассчитаны коэффициенты погонного ослабления. Средние значения коэффициента равны: $\gamma_{май} = 0{,}25$ отн. ед.; $\gamma_{июль} = 0{,}59$ отн. ед.

Выводы. Из расчетов можно сделать следующие выводы: влажность оказывает непосредственное влияние на коэффициенты погонного ослабление. Наличие калибровочной базы данных прямых сигналов существенно облегчает процесс обработки и анализа данных. Наличие БКД упрощает процесс проведения эксперимента – нет необходимости проводить длительные исследования в поисках спутника, траектория которого будет проходить на границе разделов лес / открытый сигнал. Появляется возможность размещения приемного комплекса внутри лесных массивов для более точной оценки состояния полога.

Приняв во внимание все описанные факторы, планируется проведение работ в лесных массивах разных пород в целях выявления структурных особенностей в разные времена года и вегетационные периоды, а также в нарушенных лесах.

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. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.

4. 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.

5. Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой // Макаров Д. С., Савин И. В., Сорокин А. В., Фомин С. В., Харламов Д. В. // Патент № 219.016.EC97. Номер охранного документа: 0002682718. Дата охранного документа: 21.03.2019.

D. V. Kharlamov[1], D. S. Makarov[2], M. Yu. Reushev[3], V. G. Podoprigora[4]
[1, 2, 3] Federal Research Center KSC SB RAS
[2] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
[4] Institute of Physics named after L.V. Kirensky FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
[4] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
ikivt@yandex.ru

CALIBRATION DATABASE OF DIRECT SIGNALS FROM L1 RANGE NAVIGATION SATELLITES FOR CALCULATION OF ATTENUATION COEFFICIENTS GNSS

Abstract. The paper presents the results of recording direct signals from L1 range navigation satellites (GLONASS, GPS, GALILEO, QZSS). The structure of the calibration data base is presented. Examples of trajectories of the satellites for calculations are given. The coefficients of linear attenuation cedar forest plantations with different moisture content levels are calculated. The analysis of the obtained results is carried out. The obtained data can be used to develop new methods for studying forest areas.

Keywords: navigation satellite signals, radio occultation, layered media, forest, calibration database, humidity

МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ

УДК 574.1

Я. А. Богданова[1], Л. М. Кавеленова[2], Я. А. Рязанова[3]
[1, 2, 3]Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия
[1]bogdanova.ya@yandex.ru, [2]lkavelenova@mail.ru

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МОНИТОРИНГЕ ЦЕННЫХ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Предметом работы является формирование региональной геоинформационной базы растительных сообществ Самарской области на основе результатов полевых обследований опорных эталонных полигонов, выделяемых исследователями с учетом присутствия раритетных видов флоры и типов сообществ. Вторым этапом работы является целевое наполнение базы на основе Геопортала Самарской области РГИС (Региональная Геоинформационная Система). В базе создано более 400 информационных единиц объектов, отражающих растительные сообщества с границами, обозначенными по GPS-координатам, дополненных их характеристикой. Результаты используются для оптимизации машинного метода классификации растительных сообществ.

Ключевые слова: растительные сообщества, раритетные виды флоры, региональная геоинформационная база, опорные эталонные полигоны

Территория Самарской области представляет уникальное сочетание экосистем: различных типов лесов (сосняки, дубравы, кленовники, липняки, осинники, ольховники), травянистых сообществ (пойменные, разнотравные и суходольные луга, ковыльные, типчаково-ковыльные, каменистые и сухие степи, солонцы и др.) [1]. Специфика экотона определила наличие значительного количества видов высших растений, для которых территория области является «краеареальной». Раритетные виды флоры, включенные в Красную книгу Самарской области, в большинстве являются общими с одним либо несколькими сопредельными регионами, и сохранение в местных локалитетах увеличивает вероятность сохранения в природном ареале. Геоботаническая база данных «Растительность Среднего Поволжья», которая содержит описания более 1 900 видов растений Среднего Поволжья с указа-

© Богданова Я. А., Кавеленова Л. М., Рязанова Я. А., 2025

нием их мест произрастания [2], включает информацию, относящуюся к Самарской области, но инвентаризацию растительных сообществ Самарской области нельзя считать завершенной. Высокая степень антропогенной преобразованности территории Самарской области связана с долговременным сведением лесов, распашкой степей, развитием промышленно-транспортного комплекса, разрастанием урбоэкосистем и определяет высокую значимость сохранившихся фрагментов естественных природных сообществ, особенно включающих раритетные виды флоры. Именно поэтому мониторинг таких территорий, в частности, с использованием ДЗЗ, а также создание геоинформационной базы данных региональной растительности, представляется актуальной задачей [3]. В настоящее время в России активно создаются и развиваются уже существующие проекты баз данных растительности как на региональном, так и общероссийском уровне. Такие базы данных позволяют систематизировать данные о растительных сообществах, отслеживать динамику их развития, и эффективно используются для охраны природы, экологического мониторинга и управления природопользованием, что важно для решения проблем сохранения биоразнообразия [4].

В Самарской области в рамках проекта по развитию информационных технологий регионального мониторинга растительных сообществ, на основе интеллектуального анализа данных дистанционного зондирования была поставлена задача по созданию геоинформационной базы данных опорных полигонов растительных сообществ региона. Технологической основой ведения базы данных стал Геопортал Самарской области (https://geoportal.samregion.ru, далее – Геопортал), функционирующий в рамках региональной геоинформационной системы Самарской области (РГИС).

Создание базы данных происходило в два этапа. На первом этапе производили наземные обследования, в ходе которых исследователи составляли геоботанические описания растительных сообществ, выявляли редкие (а также инвазивные) виды растений и определяли GPS-координаты изученных сообществ с помощью GPS-устройств. Так как полученные данные далее использовались для разработки технологии интеллектуального анализа данных дистанционного зондирования, на начальном этапе предпочтение отдавалось степным растительным сообществам (в частности, участкам с относительно выровненным рельефом в пределах ОППТ Самарской области) [5].

Второй этап представлял собой перенесение полученной информации на Геопортал в слое, предназначенном для реализации проекта: по координатам объектов создавались полигоны, отмечалась их актуальность, для объектов слоя заполнялась семантическая информация. Для каждого объекта (растительного сообщества) указывались: ценность (ценное, инвазивное, прочее), тип (лесное, кустарниковое, травянистое), характеристика (например, типчаково-ковыльная степь, ковыльная степь, сосняк, ивняк и т. д.), в отдельные поля вносились более подробное описание сообщества, дата посещения, для лесных сообществ заполняли поля формулы таксации,

сомкнутости крон, высоты древостоя, при необходимости вносилась архивная информация (рис. 1).

При обследовании природных сообществ с раритетными компонентами флоры – предлагаемых эталонных участков для распознавания в материалах ДЗЗ – был выявлен ряд сообществ с участием от 4 до 12 видов (степных, лесных, галофитных) в Большечерниговском [6], 2 степных и 3 галофитных – в Приволжском, 1 луговой и 3 степных – в Хворостянском, 5 лесных, 2 степных и 1 луговой – в Камышлинском, 2 степных – в Елховском, 6 степных – в Сергиевском, по 1 степному объекту на территории Кинельского, Пестравского, Красноармейского районов Самарской области. При обследовании ряда природных сообществ с раритетными компонентами фауны был также выявлен ряд сообществ с гнездованиями видов ястребиных, соколообразных и шилоклювковых птиц, занесённых в Красную книгу РФ и Самарской области.

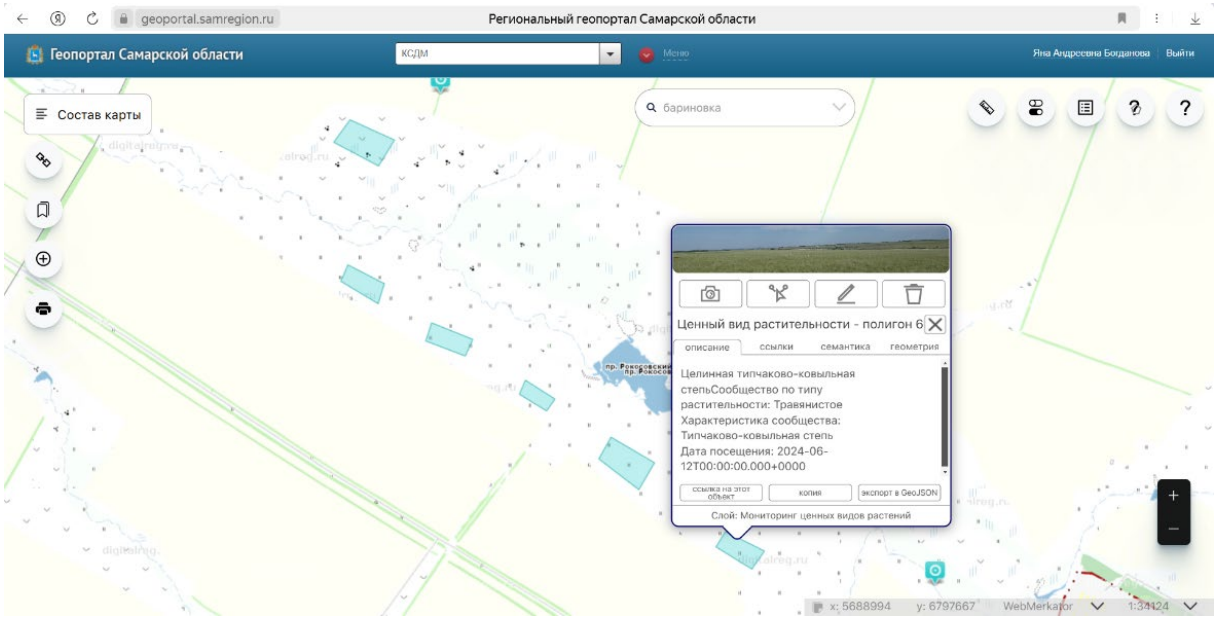


Рис. 1. Пример карточки ценного травянистого растительного сообщества

К настоящему моменту в рамках выполнения проекта осуществлен ввод на Геопортал данных о 418 объектах – растительных сообществах Самарской области. К результатам обследований полевого сезона 2024 г. относится 157 объектов, 261 – архивные сведения (с 2016 г.). К ценным растительным сообществам (в которых присутствуют редкие виды растений или птиц, занесённые в Красную книгу Самарской области или РФ) относится 319 объектов. Наполнение базы данных по типу растительности включает 128 лесных, 12 кустарниковых, 278 травянистых участков. Среди введённых объектов наиболее широко представлены природные степные растительные сообщества, имеются также лесные (как естественного, так и искусственного происхождения), кустарниковые, луговые участки.

Таким образом, в ходе работы выявлены новые местообитания редких видов растений и птиц, сделано описание более 150 растительных сообществ, в саму базу внесено более 400 объектов, на основании данных

из базы проводится оптимизация машинных методов классификации растительных сообществ, включая ценные степные растительные сообщества, которые подвержены риску от незаконной сельскохозяйственной деятельности.

Представленная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда № 23-11-20013, https://rscf.ru/project/23-11-20013.

Список источников

1. Постановление Правительства Самарской области от 20.08.2021 № 596 «Об утверждении Стратегии сохранения биоразнообразия Самарской области на период до 2030 года».

2. Бондарева В. В. База данных растительности Среднего Поволжья // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2022. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/baza-dannyh-rastitelnosti-srednego-povolzhya (дата обращения: 18.03.2025).

3. On the experience of field monitoring and remote sensing technologies integration in regional phytodiversity conservation / L. Kavelenova, N. Prokhorova, V. Fedoseyev // V International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES 2023). 2023. Vol. 419. P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202341902013.

4. Кавеленова Л. М., Прохорова Н. В., Розно С. А. Региональные проблемы сохранения биоразнообразия и некоторые направления их решения (на примере Самарской области) // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность : сб. ст. Севастополь : СевГУ, 2023. С. 167–171.

5. Кузовенко О. А., Рязанова Я. А., Прохорова Н. В. Особо охраняемая природная территория «Сестринские окаменелости» – перспективный эталонный полигон для дистанционного выявления ценных степных экосистем // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 1. С. 57–63. DOI: 10.55355/snv2023121109.

6. Рязанова Я. А., Кузовенко О. А. Материалы к флоре особо охраняемой природной территории «Участок типчаково-ковыльной целинной степи» (Большечерниговский район, Самарская область) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2024. Т. XVIII, № 3. С. 175–188. DOI: 10.24412/2072-8816-2024-18-3-175-189.

Ya. A. Bogdanova[1], L. M. Kavelenova[2], Ya. A. Ryazanova[3]

[1, 2, 3]Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, Samara, Russia

[1]bogdanova.ya@yandex.ru, [2]lkavelenova@mail.ru

STAGES OF REGIONAL GEOINFORMATION VEGETATION BASE FORMATION AND PROSPECTS OF ITS USE IN VALUABLE NATURAL OBJECTS MONITORING

Abstract. The subject of the work is the formation of a regional geoinformation plant communities base of the Samara region using the results of reference standard polygons field surveys identified by researchers according to the presence of rare flora species of flora and-communities types. The second stage of the work is the target filling of the base on the Geoportal of the Samara Region of the Russian Geographical Information System. Now the base contains more than 400 information object units reflecting plant communities designated by GPS coordinates, supplemented by their characteristics. The results are used to optimize the machine method for classifying plant communities.

Keywords: Plant communities, rare flora species, regional geoinformation base, reference polygons

УДК 551.465.7

В. И. Бышев[1], А. В. Гусев[2], А. Н. Сидорова[3]
[1, 2, 3] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[2] Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия
[1]byshev.v@mail.ru

О ВЗАИМОСВЯЗИ ФАЗОВОЙ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА ЗЕМЛИ С ДИНАМИКОЙ ПОТОКОВ ТЕПЛА ИЗ МИРОВОГО ОКЕАНА В АТМОСФЕРУ

Аннотация. Динамика современного климата Земли представляет собой сложную проблему, требующую изучения и глубокого понимания наблюдаемых изменений. На современном этапе изменчивость климата оказывает влияние на экономическую, социальную и политическую стороны жизни людей, что предопределяет необходимость климатических прогнозов. Одним из естественных факторов изменения климата является внутрисистемное перераспределение тепла между океаном и континентом при посредничестве общей циркуляции атмосферы. В исследовании показано, что динамика современного климата Земли имеет связь с фазовой структурой изменчивости потоков тепла из Мирового океана в атмосферу.

Ключевые слова: современный климат, потоки явного и скрытого тепла, изменчивость, мультидекадная фазовая структура

Введение. Одним из факторов, характеризующих естественную изменчивость современного климата и его особенности, является теплообмен Мирового океана с атмосферой [1–3]. Наблюдаемые потоки явного и скрытого тепла из океана характеризуются существенной пространственной неоднородностью (рис. 1) и широким частотным спектром временной изменчивости. Структура пространственно-временной изменчивости внутрисистемного перераспределения тепла отражает динамику климатической системы и ее компонентов. Потоки скрытого тепла, являясь источником глобальной облачности, которая экранирует приток коротковолновой солнечной радиации к поверхности Земли, оказывают тем самым влияние на тепловое состояние климатической системы и формируют определенную ритмику термодинамического режима современного климата. Средние многолетние (1940–2024 гг.) поля потоков явного и скрытого тепла, поступающего из океана в атмосферу, позволяют рассмотреть их главные особенности и климатическую значимость. Так, на фоне преобладающего потока явного тепла (–20, –10) Вт/м^2 в Северном полушарии наблюдаются области потоков (–40, –30) Вт/м^2 и выше на восточных границах азиатского и североамериканского континентов и в северо-европейских морях, а в Южном полушарии – очаги повышенных потоков явного тепла проявляются в Южном океане. Потоки скрытого тепла в Мировом океане существенно превышают потоки явного тепла, однако во многом повторяют особенности зональной

© Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н., 2025

пространственной структуры потоков явного тепла. Наиболее значительные величины потоков скрытого тепла (до 180–210 Вт/м^2) приурочены к тропической области Мирового океана. Сокращение величин потоков скрытого тепла (30–60 Вт/м^2) наблюдается в средних и высоких широтах.

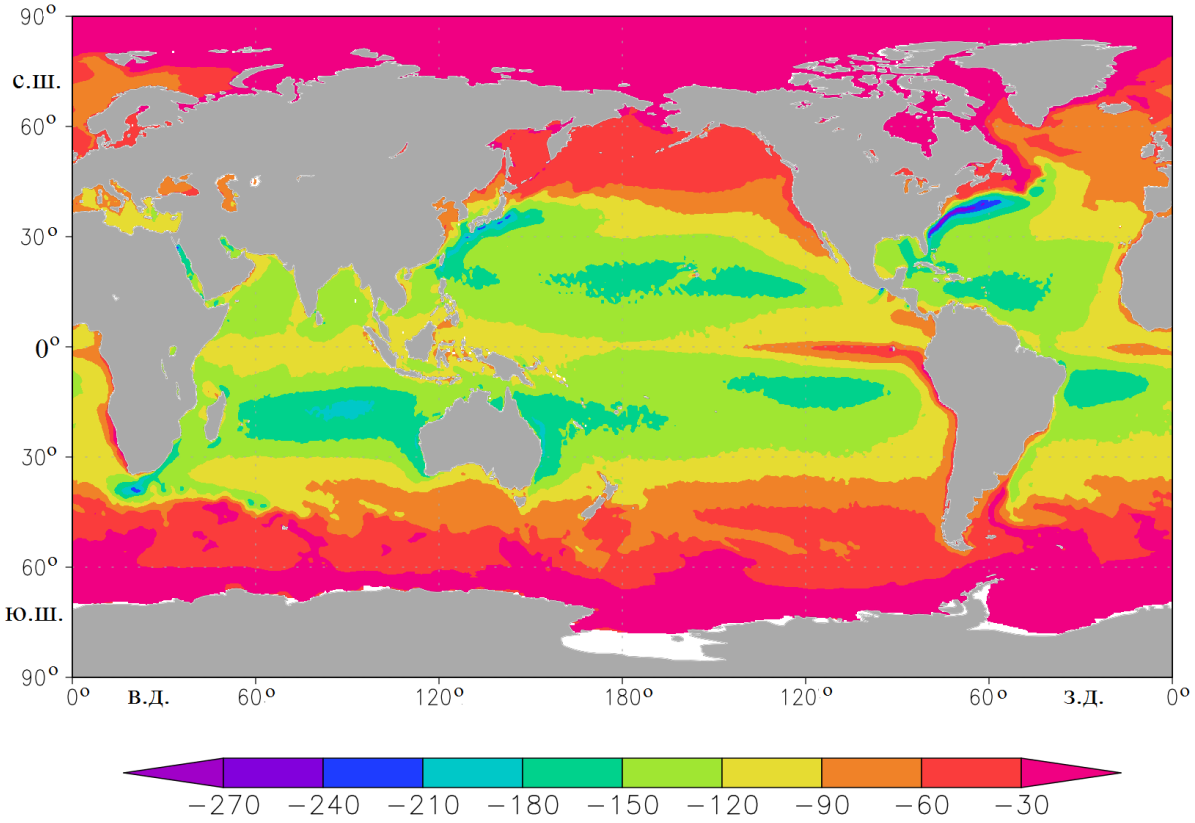


Рис. 1. Среднеклиматический (за период 1940–2024 гг.) поток срытого тепла, Вт/м^2

Материал и методика. Базой для оценок потоков тепла послужили данные [4]. Рассматривались как средние месячные и средние годовые величины потоков явного и скрытого тепла, так и их 5- и 11-летние средние значения. Основное внимание было обращено на последние.

Результаты и обсуждение. Изменчивость полных потоков тепла (явные + скрытые) из океана в атмосферу может служить признаком и мерой усиления или ослабления влияния Мирового океана при переходах современного климата из одного фазового состояния в другое [5–8]. Современный климат в период с 1940 по 2024 г. испытал два климатических сдвига: во второй половине 70-х гг. и на рубеже XX–XXI вв. Выявленные планетарные осцилляции в атмосфере – Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), и в океане – Мультидекадная осцилляция теплосодержания океана (МОСТОК), позволяют установить фазы аккумуляции и тепловой разгрузки верхнего деятельного слоя океана. Целью выполненного анализа потоков тепла ставилась задача рассмотреть связь их динамики с возмущениями текущего климата. Фазовая структура изменчивости потоков тепла в северных акваториях Атлантического и Тихого океанов (рис. 2) позволяет сопоставить особенности динамики современного климата с изменениями полных потоков тепла.

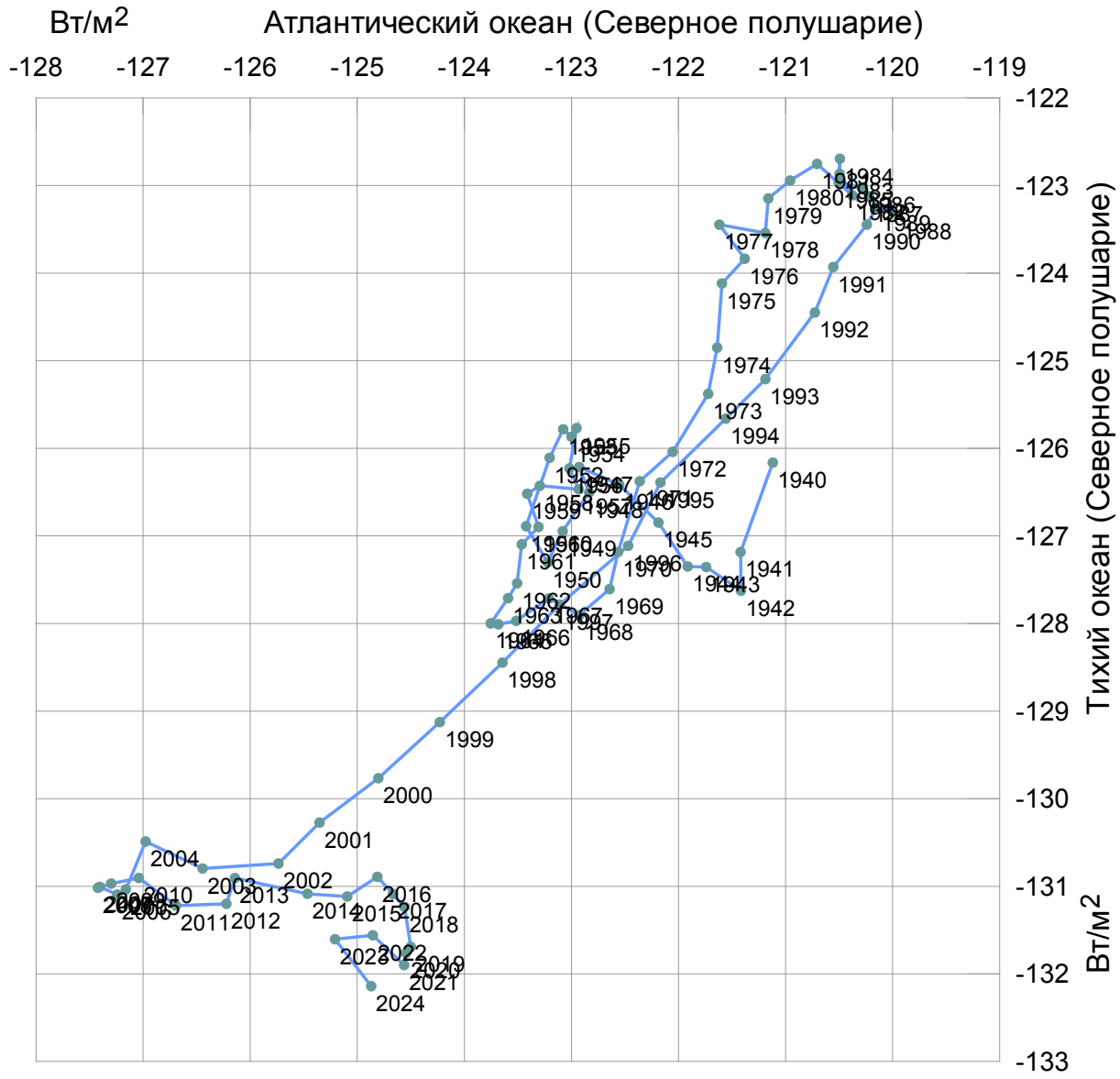


Рис. 2. Фазовая диаграмма средних интегральных потоков тепла (Вт/м^2) в Северном полушарии для Атлантического (0–67° с. ш.), ось абсцисс, и Тихого (0–57° с. ш.), ось ординат, океанов в период с 1940 по 2024 г.

Период с 1941 по 1968 г., например, характеризовался определенной устойчивостью потоков тепла рассматриваемых акваторий двух океанов (Атлантика 121–123 Вт/м^2, Тихий океан 126–128 Вт/м^2). Далее, с 1968 по 1988 г. наблюдался период сокращения величин потоков тепла в обеих акваториях (до 120 Вт/м^2 и 123 Вт/м^2 соответственно). Затем с 1988 по 2005–2007 гг. наблюдалось усиление потоков тепла в каждой из акваторий (до 127 Вт/м^2 и 131 Вт/м^2, соответственно). Последние 15–20 лет потоки тепла сохранялись на высоком уровне: в Атлантике 124,5–127,5 Вт/м^2, а в Тихом 131–32 Вт/м^2.

Заключение. Анализ потоков тепла из океана в атмосферу позволил установить их связь с изменчивостью. современного климата. Ослабление потоков тепла в Атлантике и в Тихом океане в 60-е и 70-е гг. прошлого столетия сопровождалось ростом теплосодержания верхнего деятельного слоя

океана, а увеличение потоков тепла в 80-е и 90-е гг. – сокращением его теплосодержания. Изменение соответствующих тенденций происходило на фоне климатического сдвига и перехода климатической системы в иное фазовое состояние.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0017).

Список источников

1. 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. 2863–2878. DOI 10.1007/s00024-017-1557-3

2. Бышев В. И., Серых И. В., Сидорова А. Н., Скляров В. Е., Анисимов М. В. Океанический фактор мультидекадной изменчивости современного климата и перспективы ее мониторинга // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 3. С. 5–19. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3)

3. Бышев В. И., Анисимов М. В., Гусев А. В., Грузинов В. М., Сидорова А. Н. О мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана // Океанологические исследования. 2020. Т. 48. № 3. С. 76–95. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5

4. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J-N. (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.f17050d7 (Accessed on 11-JUN-2025).

5. Бышев В. И., Анисимов М. В., Гусев А. В., Сидорова А. Н. Об особенностях структуры мультидекадной осцилляции Мирового океана // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 4. С. 3–23. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(4).1

6. 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 // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. N 10 (8). P. 1064. https://doi.org/10.3390/jmse10081064.

7. Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н. Концептуальные основы альтернативной физической модели современного климата // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 1. С. 5–33. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).1

8. Byshev V. I., Gusev A. V., Sidorova A. N. Multidecadal Phase Changes in the Thermodynamic State of the System: Ocean–Atmosphere–Continent // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. N 12(5). P. 758. https://doi.org/10.3390/jmse12050758

V. I. Byshev[1], A. V. Gusev[2], A. N. Sidorova[3]
[1, 2, 3] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia
[2] Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]byshev.v@mail.ru

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE PHASE MULTIDECADAL VARIABILITY OF THE EARTH'S MODERN CLIMATE AND THE DYNAMICS OF HEAT FLOWS FROM THE WORLD OCEAN TO THE ATMOSPHERE

Abstract. The dynamics of the Earth's modern climate is a complex problem that requires study and a deeper understanding of the observed changes. At the present stage, climate variability affects the economic, social and political aspects of people's lives, which determines the need for climate forecasts. One of the natural factors of climate change is the intra-system redistribution of heat between the World Ocean and the continent through the mediation of the general circulation of the atmosphere. The study shows that the dynamics of the Earth's modern climate demonstrates a connection with the phase structure of variability of heat flows from the World Ocean to the atmosphere.

Keywords: modern climate, sensible and latent heat fluxes, variability, multidecadal phase structure

УДК 631.43

Е. Р. Гавловская[1], М. В. Колодяжный[2], Е. А. Дунаева[3]
[1, 2, 3]Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма,
Симферополь, Россия
water_crimea@hotmail.com

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЦИФРОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ПОЧВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ таких баз данных почвенных характеристик, как *SoilHydroGrids*, *European Soil Databases* (*ESDB*), *USDAC*_3*D Soil Hydraulic Database of Europe*, *Unsaturated Soil Hydraulic Database* (*UNSODA*) и *SoilKsatDB*. Рассмотрены их основные характеристики – охват территории, пространственное разрешение, технические особенности работы, а также формат выходных данных и потенциальная сфера их применения. Перечисленные базы данных являются незаменимым источником информации для проведения моделирования основной гидрофизической характеристики почвы, однако требуют валидации и корректировки.

Ключевые слова: почвенные характеристики, водно-физические свойства, БД, картография

Введение. В настоящее время представлено большое количество баз данных почвенных характеристик, а также картографических систем, отображающих те или иные свойства почвенного покрова. В эпоху цифровизации всех сфер деятельности человека, в том числе сельского хозяйства, подобные источники данных являются незаменимыми как для научных исследований, так и для прикладного использования.

Большое внимание уделяется водно-физическим свойствам почвы (к примеру, гранулометрический состав, наименьшая влагоёмкость). В настоящее время существуют следующие базы данных: *SoilHydroGrids*, *European Soil Databases* (*ESDB*), *USDAC*_3*D Soil Hydraulic Database of Europe*, *Unsaturated Soil Hydraulic Database* (*UNSODA*) и *SoilKsatDB*. Ниже представлена информация по базам данных, каждая обладает особыми характеристиками, масштабом и методами получения данных.

Отдельного внимания заслуживает картографическая база данных *ISRIC Soil*, она представляет собой открытую систему глобального цифрового картографирования свойств почвы по всему миру. Это трехмерная пространственная европейская база данных по водно-физическим свойствам почвы. Она основана на наборах данных с различным пространственным разрешением (0,25 м и 1 км) – *SoilGrids*250*m* и *SoilGrids*1*km*, а также на педотрансферных функциях (*EU-PTF*), полученных на базе данных *EU-HYDI* (рис. 1).

© Гавловская Е. Р., Колодяжный М. В., Дунаева Е. А., 2025

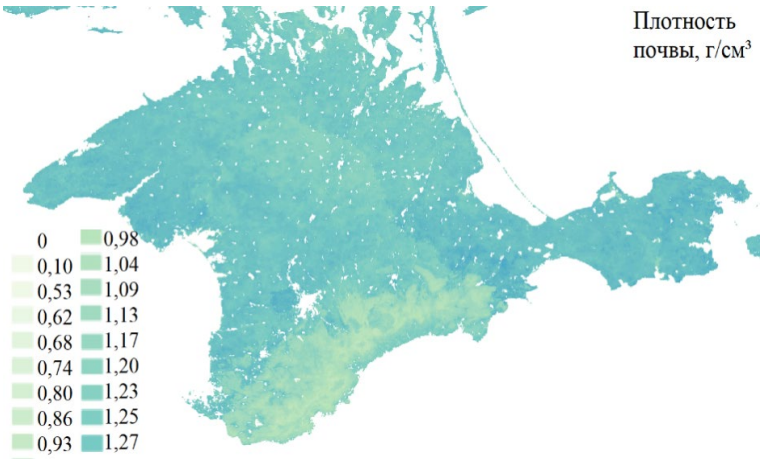


Рис. 1. Плотность почвы на территории Крыма (слой 0–5 см) по данным *ISRIC Soil*

SoilHydroGrids возможно выгрузить файлы по выбранному параметру и глубине почвенного горизонта (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, 100–200 см). Обработка данных осуществляется посредством *WMS*-подключения, что позволяет картографической информации регулярно обновляться в целях повышения точности и актуальности. Данные имеют пространственное разрешение 250 м.

SoilHydroGrids послужила основной для создания нескольких баз данных – как глобальных, так и региональных. К примеру, *USDAC_3D Soil Hydraulic Database of Europe и HiHydroSoil* [1, 2].

European Soil Databases (*ESDB*) (версия 2.0) – это комплексная европейская база данных почв, включающая как векторные, так и растровые пространственные данные. Зона интересов затрагивает Европу и западную часть Азии [3, 4]. Пространственное разрешение 1 км и 250 м в зависимости от рассматриваемых параметров.

Unsaturated Soil Hydraulic Database (*UNSODA*) (версия 2.0) – это Международная база данных о почвах, содержащая информацию о водно-физических свойствах ненасыщенных почв [5].

БД используется для моделирования переноса влаги и загрязняющих веществ в почве. В ней представлены следующие данные:

– кривые увлажнения;

– гидравлическая проводимость;

– коэффициент диффузии;

– основные физико-химические свойства почв (гранулометрический состав, объемная плотность, содержание органического вещества).

UNSODA не содержит картографической информации, она имеет только текстовые значения [6]. Можно получить информацию по типу почв, географическому положению, горизонтам почв, кривым водоудерживающей способности, влагопроводности и коэффициента диффузии. Также в ней содержится информация о источниках данных, годах и методах проведения испытаний. В данной БД отсутствуют данные по Республике Крым.

SoilKsatDB – глобальная база данных по измерениям в насыщенных почвах [7]. Она охватывает большинство регионов – Северную и Южную Америку, Европу, Африку, Азию, Австралию.

В неё включены следующие показатели:

– гранулометрический состав;

– плотность;

– содержание углерода в почве;

– полевая влагоемкость;

– влажность устойчивого завядания.

Сравнительная характеристика баз данных, описанных выше, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика баз данных по свойствам почвы (*Tóth et al*., 2015; *Hengl et al*., 2017) (*Panagos*, 2006; EC, 2004) (*Nemes et al.*, 2001; *UNSODA* manual)

	Unsaturated Soil Hydraulic Database (UNSODA)	***European Soil Databases (ESDB)***	***SoilHydroGrids***	***SoilKsatDB***
Год создания	1998–2001	2004	2017	2021
Доступность	Свободный доступ (*US-PD*)	После регистрации на сайте *ESDAS*	Лицензия *Open Data Commons Open Database* (*ODbL*)	Свободный доступ (*CC BY* 4.0)
Охват территории	Глобальный охват (большинство данных – США, Европа)	Европа и Евразия	Европа	Глобальный
Пространственное разрешение	Координаты	Векторные полигоны, растры – 1 км и 250 м	Растровые данные 250 м и 1 км	Координаты
Глубина профиля почвы	0–300 см	0–100 см	0–200 см (7 слоёв)	0–100 см
Формат данных	Табличный (база данных *MS Access*)	Векторные полигоны (*SGDBE*), таблицы (*PTRDB*), *GeoTIFF*	*GeoTIFF* (растр)	Табличный, точечный

Окончание табл. 1

	Unsaturated Soil Hydraulic Database (UNSODA)	***European Soil Databases (ESDB)***	***SoilHydroGrids***	***SoilKsatDB***
Данные о физических свойствах	Гранулометрический состав, содержание гумуса, объемная плотность, влагоёмкость	Гранулометрический состав, *pH*, содержание органических веществ, пористость	Гранулометрический состав, плотность, *pH*, содержание гумуса	Гранулометрический состав, содержание углерода в почве, полевая влагоемкость, влажность устойчивого завядания
Гидравлические параметры	*THS, FC, WP, KS*, диффузия, полный набор *PTF*	*KS, FC, WP* (сильно агрегированные значения)	*THS, FC, WP, KS*, параметры модели ван Генухтена	*KS* (измерения), *FC, WP*, плотность
Методология	Экспериментальные данные и эмпирические модели	Педотрансферные функции по доминирующему типу почвы	На основе *SoilGrids* и *EU-PTF*	Объединение наборов данных *SWIG, UNSODA* и *HYBRAS*
Подходит для моделирования	*HYDRUS, SWMS* и др.	Ограничен из-за агрегирования данных	*HYDRUS, SWAT, DSSAT* и др.	*PTF* калибровка, *HYDRUS, SWAT*, машинное обучение

Зачастую результаты исследований и лабораторных анализов научных организаций регистрируются и формируются в базы данных. Как правило, подобные БД имеют территориальную привязку и описывают ограниченное количество параметров. Одной из них является *BOREAS HYD*-1, сформированная в рамках изучения бореальных экосистем, а именно атмосферных и гидрологических явлений в них. Данные представлены в табличной форме и описывают такие параметры, как гидравлическая проводимость почвы и наименьшая влагоёмкость.

Заключение. На сегодняшний день существует большое количество источников данных, содержащих в себе территориально привязанную информацию о различных почвенных характеристиках. Подобные базы данных являются важным ресурсом при проведении моделирования водно-физических свойств почв. При этом важно понимать, что для получения репрезентативных данных, необходимо проводить корректировку данных

с учетом фактических измерений, полученных в ходе полевых или лабораторных исследований рассматриваемой почвы.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-16-00239 «Моделирование и анализ гидрофизических свойств почвы с учетом гистерезиса для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур».

Список источников

1. Brigitta Tóth, Melanie Weynants, László Pásztor and Tomislav Hengl, "3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution", in Hydrological Processes, John Wiley & Sons Ltd, Vol.31 Issue 14, 1 July 2017, Pages 2497–2666 (pages 2662–2666); DOI: 10.1002/hyp.11203; http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.11203/full

2. Montzka, Carsten & Herbst, Michael & Weihermüller, Lutz & Verhoef, Anne & Vereecken, Harry. (2017). A global data set of soil hydraulic properties and sub-grid variability of soil water retention and hydraulic conductivity curves. Earth System Science Data Discussions. 1-25. 10.5194/essd-2017-13.

3. European soil database (distribution version v2.0). European Commission Joint Research Centre, Italy (available after registration from ESDAC).

4. Hijmans, R. J., 2015. raster: Geographic data analysis and modeling. R package version 2.3-24. URL http://CRAN.R-project.org/package=raster.

5. Toth, B., Weynants, M., Nemes, A., Mako, A., Bilas, G., Toth, G., 2014. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. European Journal of Soil Science.

6. Gupta, S., Hengl, T., Lehmann, P., Bonetti, S., and Or, D.: SoilKsatDB: global database of soil saturated hydraulic conductivity measurements for geoscience applications, Earth Syst. Sci. Data, 13, 1593–1612, https://doi.org/10.5194/essd-13-1593-2021, 2021.

E. R. Gavlovskaya[1], M. V. Kolodyazhny[2], E. A. Dunaeva[3]

[1, 2] Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Agriculture of Crimea", Simferopol, Russia

[3] Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Agriculture of Crimea", Simferopol, Russia

water_crimea@hotmail.com

OVERVIEW OF EXISTING DIGITAL DATABASES OF SOIL INDICATORS

Abstract. The paper presents a comparative analysis of such databases of soil characteristics as SoilHydroGrids, European Soil Databases (ESDB), USDAC_3D Soil Hydraulic Database of Europe, Unsaturated Soil Hydraulic Database (UNSODA) and SoilKsatDB. Their main characteristics are considered – the coverage of the territory, spatial resolution, technical features of the work, as well as the format of the output data and the potential scope of their application. The listed databases are an indispensable source of information for modeling the basic hydrophysical characteristics of the soil, however, they require validation and correction.

Keywords: soil characteristics, water-physical properties, database, cartography

УДК 550.343

О. Е. Графеев
Томский государственный университет, Томск, Россия
ografeev@yandex.ru

ОБЛАЧНЫЕ И ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ

Аннотация. Работа направлена на изучение взаимосвязи сейсмических событий с атмосферой и основана на известных фактах существования некоторых типов атмосферных предвестников землетрясений. Автором анализируется информативность линейных облачных аномалий как краткосрочного предвестника для части территории Курильских и Японских островов, а также возможность комбинирования линейных облачных и ионосферных аномалий для формирования краткосрочного прогноза. Анализировалась данные за период с 2009 по 2011 г. Делается вывод о возможности применения сочетания предвестников и направлении дальнейшего исследования. Результаты работы могут быть использованы для повышения точности краткосрочного прогноза землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, прогнозирование землетрясений, атмосферные предвестники землетрясений, линейные облачные аномалии

Краткосрочный прогноз землетрясений является одной из актуальных проблем наук о Земле и практической деятельности, направленной на снижение ущерба от стихийных бедствий. К настоящему времени доказано существование ряда предвестников, которые наблюдаются за несколько часов или суток до землетрясения и потенциально могут быть использованы при формировании краткосрочного прогноза. К таким предвестникам относятся, в частности ионосферные предвестники и линейные облачные аномалии (ЛОА).

Ионосферные предвестники представляют собой изменение некоторых параметров ионосферы:

– локальное увеличение электронной концентрации на высотах внешней ионосферы;

– уменьшение максимума электронной концентрации в максимуме слоя *F2*;

– смещение максимума критической частоты на утренние часы относительно полуночи;

– превышение текущих значений критической частоты над медианными.

Указывалось, что максимум возмущенной области находится в непосредственной близости от области эпицентра, пространственный масштаб составляет около 1 000 км вдоль меридиана и несколько тысяч километров вдоль параллели [1].

© Графеев О. Е., 2025

ЛОА представляют собой линейно протяженные облачные структуры, полосы безоблачных каньонов в облачных полях либо резкие линейные границы облачных массивов, наблюдаемые над активизировавшимися разломами [2].

Автором проведена оценка информативности комплексного использования ЛОА и ионосферных предвестников для части территории Курильских и Японских островов (от 34,92° с. ш. до 50° с. ш.). Выбор территории обусловлен доступностью данных о состоянии ионосферы – использовались находящиеся в открытом доступе данные геофизической обсерватории «Хабаровск» ИКИР ДВО РАН. Данные опубликованы на ресурсе *World Data Centers in Russia* (*http://www.wdcb.ru*) [3]. Для выявления ЛОА использовались данные, опубликованные на ресурсе *NASA EarthData* [4].

Установлено, что в изучаемом регионе преобладающим типом ЛОА являются полосы безоблачных каньонов в облачных полях, другие типы ЛОА – линейно протяженные облачные структуры и резкие линейные границы облачных массивов – наблюдались, но встречались значительно реже.

Автором выделены следующие виды аномалий:

– истинные – аномалия предшествует (не более чем за 2 суток) землетрясению магнитудой не менее 5, соответствует одному из описанных типов ЛОА и трассирует разлом, с которым связан очаг землетрясения;

– неисключаемые – аномалия соответствует одному из описанных типов ЛОА и трассирует известный активный разлом, однако в течение 2 суток после наблюдения аномалии землетрясений магнитудой не менее 5 по линии данного разлома не происходило;

– исключаемые – аномалия соответствует одному из описанных типов ЛОА, однако не связана с известными разломами.

Оценка информативности выявленных ЛОА как предвестников приведена в табл. 1 (за 2010 г. данные доступны не за весь период).

Таблица 1

Оценка информативности ЛОА как предвестника

Показатель	**Всего**	**2009 г.**	**2010 г.**	**2011 г.**
Общее количество дней	**1003**	365	273	365
Количество истинных и неисключаемых аномалий	47	24	7	16
Вероятность появления в произвольный день	0,046859	0,065753	0,025641	0,043836
Достоверность предвестника (истинных/всего)	0,723404	0,583333	0,857143	0,875
Надежность предвестника (истинных/ кол-во землетрясений)	0,120141	0,16092	0,107143	0,1
Количество исключаемых аномалий	–	6	9	5
Вероятность случайного появления в произвольный день	–	0,016438	0,032967	0,013699
Достоверность предвестника	–	0,333333	0,222222	0,2
Надежность предвестника	–	0,022989	0,035714	0,014286

Таким образом, можно утверждать, что ЛОА как краткосрочный предвестник имеет:

– относительно высокую достоверность (относительно низкую долю «ложных тревог»);

– низкую надежность (высокую вероятность «пропуска цели»).

Автором рассмотрена возможность комбинирования ЛОА с одной из разновидностей ионосферных предвестников – смещением максимума критической частоты на утренние часы относительно полуночи.

Оценка информативности комплекса двух предвестников приведена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка информативности комплекса двух предвестников

Показатель	**Всего**	**2009 г.**	**2010 г.**	**2011 г.**
Общее количество дней	127	69	31	27
Количество истинных и неисключаемых аномалий	13	11	0	2
Вероятность появления в произвольный день	0,102362	0,15942	–	0,074074
Достоверность предвестника (истинных/ неисключаемых)	0,923077	0,909091	–	1
Надежность предвестника общая (истинных/кол-во землетрясений)	0,042403	0,114943	–	0,014286

К табл. 2 следует отметить:

1. В 2010 г. не охвачен период с октября по декабрь 2010 г. в связи с отсутствием данных.

2. Из событий, имевших ионосферные предвестники, учтены только те, которые сопровождались ЛОА. Надежность предвестника рассчитывалась исходя из общего количества землетрясений (в том числе не имевших никаких предвестников). Если в течение 1 суток произошло более 1 землетрясения в пределах одного и того же очага, то они учтены как 1 событие.

К полученным результатам могут быть предложены следующие выводы.

1. Существенное превышение достоверности ЛОА как предвестника относительно вероятности появления ЛОА в произвольный день указывает на существование причинно-следственной связи между процессом подготовки землетрясения и возникновением ЛОА.

2. Низкая надежность ЛОА как предвестника – как отдельного, так и в комплексе с рассмотренным ионосферным предвестником – обусловливает необходимость расширения перечня используемых предвестников и оценки их информативности в отдельности и в различных комбинациях.

3. Высокая достоверность комплекса рассмотренных предвестников позволяет предложить его к практическому использованию при формировании краткосрочного прогноза как частный вариант методики формирования прогноза.

Список источников

1. О возможности прогнозирования землетрясений по данным спутникового зондирования / С. А. Пулинец, А. Д. Легенька, А. Т. Карпачев и др. М. : ИЗМИРАН, 1991. 25 с.

2. Морозова Л. И. Проявление геодинамической активности земной коры в облачных полях // Геология и геофизика. 2012. Т 53. № 4. С. 541–550.

3. World Data Centers in Russia. URL: http://www.wdcb.ru (дата обращения: 20.06.2025).

4. NASA EarthData. Worldview Snapshots. URL: https://wvs.earthdata.nasa.gov (дата обращения: 20.06.2025).

O. E. Grafeev
Tomsk State University, Tomsk, Russia
ografeev@yandex.ru

CLOUD AND IONOSPHERIC EARTHQUAKE PRECURSORS – ASSESSMENT OF RELIABILITY

Abstract. The article is aimed at studying the relationship between seismic events and the atmosphere and is based on the known facts of the existence of certain types of atmospheric precursors of earthquakes. The author analyzes the informative value of linear cloud anomalies as a short-term harbinger for the part of the territory of the Kuril and Japanese Islands, as well as the possibility of combining linear cloud anomalies and ionospheric anomalies to form a short-term forecast. The data was analyzed for the period from 2009 to 2011. As a result, conclusions are proposed about the possibility of using the combination of precursors and the direction of further research. The results of the work can be used to improve the accuracy of short-term earthquake forecasts.

Keywords: earthquakes, earthquake forecasting, atmospheric precursors of earthquakes, hydrogen degassing, machine learning

УДК 528.88

М. Ю. Грищенко[1], А. А. Маслаков[2], А. Г. Григорян[3], И. А. Алдошин[4]
[1, 2, 3, 4]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[1]m.gri@geogr.msu.ru

ИНДИКАЦИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ЧУКОТСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Аннотация. Работа посвящена изучению связи характеристик растительного покрова и мерзлотных процессов на примере ключевого участка на Чукотском п-ове. В качестве основной характеристики растительного покрова использована вегетационная активность, определенная через значения индекса *NDVI*. Значения индекса рассчитаны по снимкам со спутников серии *Landsat*. Проведены полевые обследования растительного покрова, грунтов и мерзлотных процессов. Выявлено, что в пределах равнинной части исследуемого участка максимальные значения индекса *NDVI* характеры для долин водотоков и прочих отрицательных форм рельефа, к которым приурочено вытаивание подземных льдов, обусловленное ростом летних температур воздуха. Оттаивание мерзлоты изменило условия дренирования: оно улучшилось для природно-территориальных комплексов склонов и ухудшилось для плоских поверхностей, что отразилось на вегетационной активности.

Ключевые слова: географическое дешифрирование, *Landsat*, растительный покров, мерзлотные процессы, *NDVI*, Чукотский полуостров

Введение. Наблюдаемые изменения мерзлотных условий Арктики и Субарктики имеют комплексные последствия для природной среды. Особое внимание в исследованиях последних лет уделяется реакции растительных сообществ на мерзлотно-климатические изменения [1], поскольку растительность криолитозоны является одновременно чутким индикатором изменения природных условий и фактором, определяющим условия теплообмена атмосферы и подстилающих пород [2]. Отмечается [3–4], что напочвенные покровы (растительность и органогенный слой почвы) являются не менее мощным регулятором мерзлотных условий, чем изменения климата. К наиболее популярным исследованиям относится оценка динамики спектральных индексов (*NDVI*, *LAI* и др.), характеризующих состояние растительного покрова. Разность индекса *NDVI* за разные годы использовалась для выявления активности экзогенных процессов в криолитозоне, например, криогенных оползней [5]. Индекс *NDVI* косвенно свидетельствует о повышении глубины сезонного оттаивания почвы.

В данной работе внимание сфокусировано на территории приморских низменностей Чукотского п-ова – одном из самых труднодоступных райо-

© Грищенко М. Ю., Маслаков А. А., Григорян А. Г., Алдошин И. А., 2025

нов нашей страны. Двадцатилетние геоботанические исследования в пределах отдельных мониторинговых площадок зафиксировали смену растительных ассоциаций на фоне изменившихся мерзлотных условий и общего роста биопродуктивности растительного покрова [6]. Цель данной работы – выявить связь между характером изменений мерзлотных условий и растительным покровом приморских равнин Восточной Чукотки по данным дистанционного зондирования. В основе исследования лежат материалы полевых маршрутных наблюдений и анализ долгосрочных изменений индекса *NDVI*.

Материалы и методы. Район исследований – полигон «Приморские равнины Восточной Чукотки» площадью 210 кв. км – расположен на восточном побережье Чукотского п-ова. Территория представляет собой сглаженное низкогорье Мезозойской складчатости с отметками до 900 м абс. выс., окружённое узкой полосой приморских равнин. Территория относится к зоне типичных тундр. На равнинах преобладают травяно-кустарничковые кочкарные тундры, в ложбинах и долинах рек нередко встречаются заросли кустарниковой ивы. На склонах в предгорьях до отметок 100–200 м распространены горные злаково-моховые и лишайниковые тундры, а выше 200 м – гольцы с куртинами злаковых тундр.

В качестве важнейшей характеристики растительного покрова в настоящей работе использован нормализованный разностный вегетационный индекс *NDVI*. Он основан на соотношении интенсивности отраженной радиации в красном и ближнем инфракрасном каналах и позволяет визуализировать различия в интенсивности вегетации различных растительных сообществ, что позволяет использовать его для решения множества географических задач, в том числе связанных с состоянием многолетнемерзлых пород и характером мерзлотных процессов. Рассмотрен период 2000–2023 гг., для каждого года отобраны снимки со спутников серии *Landsat* (пространственное разрешение 30 м), охватывающие изучаемую территорию, а также снимок со спутника *Landsat-8* за 12.08.2024, полученный в период полевых обследований. Принимая во внимание значительную площадь исследуемого участка и его выраженное геоморфологическое разнообразие, решено проводить полевое дешифрирование растительного покрова по профилям. Наибольший интерес для нас представляют участки максимальных значений *NDVI*, так как к ним приурочены наилучшие с точки зрения рельефа, увлажненности и мерзлотных условий местообитания растительных сообществ, которые на этих участках вегетируют наиболее активно. Здесь можно ожидать интенсификацию мерзлотных процессов. В ходе маршрутов составлена серия полных геоботанических описаний по стандартной методике [7] с дополнительной характеристикой мерзлотных условий (мерзлотных процессов) и поверхностных отложений.

Результаты. Выявлено, что максимальные значения *NDVI* (>0,65) характерны для растительных сообществ, сформированных различными видами ив (особенно кустарниковых), хвощами, белокопытником, а также для сообществ, в которых злаки значительно преобладают над осоками,

в том числе и где осоки полностью отсутствуют. Сообщества с чуть меньшей интенсивностью вегетации (от 0,5 до 0,65) – это преимущественно схожие по составу и структуре с вышеописанными, но со значительным обилием (и преобладанием) осок. Значения *NDVI* <0,5 характерны для лишайниковых, мохово-лишайниковых, осоково-моховых, осоково-лишайниковых, лишайниково-кустарничковых и кустарничково-лишайниковых тундр, занимающих верхние высотные уровни рельефа и каменистые участки. Дифференциация мерзлотных процессов определяется в наибольшей степени поверхностными отложениями: бугры пучения приурочены к суглинистым отложениям в долинах водотоков, а каменные многоугольники наблюдаются на каменистых вершинных поверхностях. Выраженную связь между распространением выявленных мерзлотных процессов и интенсивностью вегетации растительных сообществ определить по итогам полевых обследований сложно, однако стоит отметить приуроченность высоких значений *NDVI* к процессам, связанным с разрушением мерзлоты.

Анализ рассчитанных изображений *NDVI* позволяет сделать выводы о динамике этого вегетационного индекса на изучаемой территории. Прежде всего, следует отметить устойчивое, хотя и довольно небольшое (до 0,3 за весь рассматриваемый период) повышение значений *NDVI*, характерное для всей территории. Для большей части территории характерно повышение значений менее чем на 0,1, что незначительно и не говорит о выраженной трансформации растительных сообществ. Однако на отдельных участках отмечено более существенное изменение значений индекса. Повышение интенсивности вегетации за последние 20 лет для участка приморских равнин Восточной Чукотки характерно в целом для отрицательных форм рельефа – долин водотоков, деллей, днищ дренированных озёр и т. д. Фоновое увеличение *NDVI* на 0,1–0,2 характерно для равнинных и предгорных участков южной экспозиции. Локальные участки с отрицательным трендом *NDVI* приурочены к местам активизации эрозионных процессов – термоэрозионные овраги, морские отступающие берега, меандрирущие русла рек. Отсутствие динамики *NDVI* или слабовыраженное уменьшение значений индекса характерно для плоских заболоченных участков, а также для северных макросклонов изучаемого района. Рост летней теплообеспеченности территории Восточной Чукотки привел к оттаиванию многолетнемёрзлых пород, что спровоцировало на равнинных участках, сложенных дисперсными породами, активизацию криогенных процессов – термоабразия, термоэрозия, образование криогенных оползней, термокарст. В результате произошло образование новых отрицательных форм рельефа и углубление существующих, что в условиях сурового субарктического климата привело к улучшению условий произрастания тундровой растительности. Зимой в понижениях накапливается больше снега, препятствуя чрезмерному выхолаживанию почвы и более раннему ее оттаиванию, а летом образуется ветровая тень и замедляется конвективный теплообмен поверхности с атмосферой. Кроме того, улучшение условий дренирования в результате

углубления ложбин стока привело к улучшению почвенного климата и активному зарастанию склонов ложбин, термоцирков и термокарстовых депрессий высокопродуктивными растениями – белокопытник, ива, хвощ, злаки.

Выводы. На равнинных участках повышение интенсивности вегетации за последние 20 лет характерно в целом для отрицательных форм рельефа, образованных как под воздействием природных факторов (долины водотоков, делли, днища дренированных озер, термокарстовые котловины, термоцирки), так и при антропогенном воздействии (обочины дорог, вездеходные пути). В большинстве случаев образование депрессий вызвано вытаиванием подземных льдов в результате роста летних температур воздуха, наблюдаемого с середины XX в.

Оттаивание верхних горизонтов мерзлоты изменило условия дренирования, что также отразилось на условиях обитания растительных сообществ. На плоских участках в условиях слабого дренажа оттаивание мерзлоты увеличивает приток влаги в почву, что выражается в увеличении доли осоки и уменьшении доли злаков и кустарничков и привело к снижению здесь вегетационного индекса *NDVI*. Для пологонаклонных участков, наоборот, углубление ложбин стока привело к улучшению условий дренажа и сокращению доли осок. На склонах ложбин и термокарстовых депрессий отмечается преобладание высокопродуктивных сообществ с участием кустарниковых ив, хвоща и злаково-разнотравных ассоциаций.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-77-01016 «Трансформация криогенных ландшафтов приморских равнин Чукотки на фоне изменений климата».

Список источников

1. Heijmans M. M., Magnusson R. I., Lara M. J., Frost G. V., Myers-Smith I. H., van Huissteden J., Jorgenson M. T., Fedorov A. N., Epstein H. E., Lawrence D. M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 68–84.

2. Тыртиков А. П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М. : Изд-во Моск. ун-та. 1969. 192 с.

3. Анисимов О. А., Жирков А. Ф., Шерстюков А. Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. № 2. Т. 3. С. 24–47.

4. Guo W. C., Liu H. Y., Anenkhonov O. A. Shangguan H. L., Sandanov D. V., Korolyuk A. Y., Hu G. Z., Wu X. C. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes // Agricultural and Forest Meteorology. 2018. Vol. 23. P. 10–17.

5. Rudy A. C., Lamoureux S. F., Treitz P., Collingwood A. Identifying permafrost slope disturbance using multi-temporal optical satellite images and change detection techniques // Cold Regions Science and Technology. 2013.Vol. 88. P. 37–49.

6. Maslakov A., Grischenko M., Grigoryan A., Zamolodchikov D. Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi peninsula (Russian northeast) // Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA. 2024. Vol. 3. No. 74. P. 291–309.

7. Юнатов А. А. Типы и содержание геоботанических исследований // Полевая геоботаника. Л. : Наука. Т. III. 1964. С. 9–36.

M. Y. Grishchenko[1], A. A. Maslakov[2], A. G. Grigoryan[3], I. A. Aldoshin[4]
[1, 2, 3, 4]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[1]m.gri@geogr.msu.ru

INDICATION OF PERMAFROST PROCESSES BY CHARACTERISTICS OF VEGETATION COVER ON THE CHUKOTKA PENINSULA

Abstract. The work is devoted to studying the relationship between the characteristics of the vegetation cover and permafrost processes on the example of a key area on the Chukotka Peninsula. Vegetation activity determined through the NDVI index values was used as the main characteristic of the vegetation cover. The index values were calculated from Landsat images. Field surveys of the vegetation cover, soils and permafrost processes were conducted. It was revealed that within the flat part of the study area, the maximum NDVI index values are typical for stream valleys and other negative relief forms, which are associated with the thawing of underground ice due to the increase in summer air temperatures. Permafrost thawing changed the drainage conditions - it improved for natural-territorial complexes of slopes and worsened for flat surfaces, which affected the vegetation activity.

Keywords: geographical interpretation, Landsat, vegetation cover, permafrost processes, NDVI, Chukchi peninsula

УДК 629.786.2:632

Р. Ю. Данилов[1], О. Ю. Кремнева[2], И. И. Середа[3], М. В. Зимин[4], Д. А. Истомин[5], К. Э. Гасиян[6]

[1, 2, 5, 6]Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия
[3] Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Ереван, Армения
[4] Московскийгосударственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[1]daniloff.roman2011@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ПАТОГЕНОВ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Аннотация. Исследования проводились в 2022–2024 гг. на опытном поле Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) и были направлены на выявление информационных признаков распознавания экономически значимых возбудителей болезней озимой пшеницы. Обобщенный анализ и интерпретация полученного массива данных осуществлялись в 2025 г. Объектами исследований являлись посевы четырех сортов озимой пшеницы: Курень, Бонус, Аксинья и Краснодарская 99, которые характеризуются разной степенью устойчивости к листостебельным болезням. Определена возможность детектирования изменения состояния посевов озимой пшеницы по многовременным данным наземного спектрометрирования. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о необходимости накопления и систематизации данных по спектральным характеристикам в течение значительного периода времени применительно к конкретным сортам пшеницы.

Ключевые слова: наземное спектрометрирование, пшеница озимая, сорт, болезни пшеницы, спектральные характеристики

Оценка физиологического состояния посевов пшеницы на основе анализа гиперспектральных данных является предметом активного изучения многих исследователей [1]. Результаты, полученные в этих работах, позволяют говорить о необходимости проведения исследований в области определения спектральных свойств пшеницы разных сортов, поскольку эти свойства могут искажать общую картину биотического и абиотического стресса в пологе пшеницы. Модели, разработанные только для одного сорта, оказались бесполезными при применении к другим сортам [2].

Целью настоящих исследований являлось выявление информационных признаков для распознавания экономически значимых возбудителей болезней на основе анализа данных наземного спектрометрирования с учетом генотипов разных сортов озимой пшеницы.

Исследования проводили в вегетационные сезоны 2022–2024 гг. на опытном поле Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) (г. Краснодар). Объектами исследований являлись

© Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Середа И. И., Зимин М. В., Истомин Д. А., Гасиян К. Э., 2025

посевы четырех сортов озимой пшеницы: Курень, Бонус, Аксинья и Краснодарская 99, которые характеризуются разной степенью устойчивости к листостебельным болезням. Участок посева каждого сорта был разделен на две зоны: 1 – защищенный от болезней фунгицидами (чистый фон), 2 – с искусственным инфекционным фоном бурой и желтой ржавчины (инфицированный). Для развития бурой и желтой ржавчин на экспериментальном участке применяли метод искусственного заражения растений озимой пшеницы спорами данных фитопатогенов [3]. Развитие болезней учитывалось по доле соотношения пораженного участка листовой пластинки растения к ее общей площади [4]. Наземное спектрометрирование проводилось бесконтактно на высоте 1,2–1,4 м от поверхности земли в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2500 нм со спектральным разрешением 1–10 нм. Для этого был использован спектрорадиометр «*ASD FieldSpec* 3 *Hi-Res*». 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. Корреляционный анализ связи развития заболевания с показателем количества обнаруженных спор возбудителя проводили на основе методов непараметрической статистики с использованием критерия Спирмена при уровне значимости 95 %.

В результате наземных спектрометрических измерений получены экспериментальные данные спектральных характеристик посевов озимой пшеницы сортов Курень, Бонус, Аксинья и Краснодарская 99 в зависимости развития фитопатогенов за период исследований 2022–2024 гг. Обобщенный анализ и интерпретация полученного массива данных осуществлялись в 2025 г.

По результатам корреляционного анализа в 2022 г. для желтой и бурой ржавчин была выявлена отрицательная взаимосвязь показателей их развития с переменными значениями КСЯ спектральных каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (табл. 1). Также для обоих патогенов установлена высокая и статистически значимая корреляция в спектральном канале среднего инфракрасного диапазона 1 445 нм.

Патогенный фон 2023 г. характеризовался наиболее высоким за весь период исследований уровнем развития желтой ржавчины, который отрицательно коррелировал с развитием септориозной пятнистости. Наиболее высокая и статистически значимая корреляция для желтой ржавчины была выявлена в спектральном канале ближнего инфракрасного склона 720 нм.

В патогенном фоне 2024 г. наблюдалось максимальное развитие мучнистой росы, бурой ржавчины и септориозной пятнистости, которое проявилось в корреляционной взаимосвязи их развития с переменными значениями КСЯ спектральных каналов ближнего инфракрасного. Для мучнистой росы эта взаимосвязь была наиболее высокой и статистически значимой. Статистически значимая взаимосвязь развития бурой ржавчины с переменными значениями КСЯ проявилась на длине волны 1 445 нм.

Таблица 1

Результаты оценки корреляционной взаимосвязи развития болезней с переменными значениями КСЯ спектральных каналов (фаза «цветение» *GS* 60–70, 2022–2024 гг.).

Патоген	**Спектральные каналы, нм**								
	490	**550**	**660**	**720**	**845**	**1 245**	**1 445**	**1 675**	**2 345**
2022 год									
Мучнистая роса	–0,39	0,13	–0,39	0,13	0,13	0,13	-0,13	0,13	–0,13
Желтая пятнистость	0,46	0,33	0,46	0,33	0,21	0,58	0,27	–0,27	0,27
Септориоз	0,49	0,2	0,49	0,2	0,09	0,31	0,26	–0,37	0,26
Желтая ржавчина	–0,46	–0,62	–0,46	–0,62	–0,62	–0,31	–0,62	–0,93*	–0,62
Бурая ржавчина	–0,68	–0,51	–0,68	–0,51	–0,51	–0,17	–0,68	–0,85*	–0,68
2023 год									
Мучнистая роса	0,03	0,31	0,03	0,31	0,2	–0,54	–0,66	–0,31	–0,31
Желтая пятнистость	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Септориоз	–0,2	–0,49	–0,2	–0,49	–0,77	0,09	–0,26	–0,66	–0,66
Желтая ржавчина	0,43	0,77	0,43	0,77	0,94*	0,03	0,14	0,54	0,54
Бурая ржавчина	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Мучнистая роса	0,03	0,31	0,03	0,31	0,2	-0,54	-0,66	-0,31	-0,31
2024 год									
Мучнистая роса	0,49	0,71	0,14	0,14	0,71	0,94*	0,94*	–0,49	0,6
Желтая пятнистость	0,2	–0,09	0,14	0,14	–0,09	–0,2	–0,2	0,31	–0,09
Септориоз	0,49	0,54	0,14	0,14	0,54	0,77	0,77	–0,49	0,43
Желтая ржавчина	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Бурая ржавчина	–0,54	–0,78	–0,3	–0,3	–0,78	–0,78	–0,78	0,85*	–0,3
Примечания: * – статистическая значимость корреляции данных подтверждена.									

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о необходимости накопления и систематизации данных по спектральным характеристикам в течение значительного периода времени применительно к конкретным сортам пшеницы.

Исследования выполнены согласно государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2025-0007.

Список источников

1. Terentev. A.; Dolzhenko. V.; Fedotov. A.; Eremenko. D. Current State of Hyperspectral Remote Sensing for Early Plant Disease Detection: A Review. // Sensors. 2022. 22. 757.

2. Danilov R. Yu.,. Kremneva O. Yu, Sereda I. I., Gasyan K. E., Zimin M. V., Istomin D., Pachkin A. A. Study of the Spectral Characteristics of Crops of Winter Wheat Varieties Infected with Pathogens of Leaf Diseases // Plants. 2024. 13(14). 1892.

3. 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.

4. Peterson R. F., Cempbell A. B., Hannah A. E. Diagrammatic scale for stimating rust intensity onleaves and stems of cereals // Canad. J. Rev. 1948. No. 26. P. 495–500.

R. Yu. Danilov[1], O. Yu. Kremneva[2], I. I. Sereda[3],
M. V. Zimin[4], D. A. Istomin[5], K. E. Gasiyan[6]
[1,2,5,6] Federal Research Center of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia
[3] GIS and RS department Center for Ecological-Noosphere Studies NAS RA
[4] M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

STUDYING THE IMPACT OF ECONOMICALLY SIGNIFICANT PATHOGENS ON THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WINTER WHEAT CROPS

Abstract. The studies were conducted in 2022–2024 in the experimental field of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center of Biological Plant Protection" (FSBSI FRCBPP) and were aimed at identifying information features for recognizing economically significant pathogens of winter wheat. The objects of the studies were crops of four winter wheat varieties: Kuren, Bonus, Aksinya and Krasnodarskaya 99, which are characterized by varying degrees of resistance to leaf-stem diseases. The possibility of detecting changes in the condition of winter wheat crops based on multi-temporal data of ground-based spectrometry was determined. The results of the studies allow us to conclude that it is necessary to accumulate and systematize data on spectral characteristics over a significant period of time in relation to specific wheat varieties.

Keywords: ground-based spectrometry, winter wheat, variety, wheat diseases, spectral characteristics

УДК 556.16(571.1)

И. В. Данилова[1], Т. А. Буренина[2], Е. В. Федотова[3]
[1, 2, 3]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[1]tiv80@ksc.krasn.ru, [2]burenina@ksc.krasn.ru, [3]elfed@ksc.krasn.ru

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5-LAND

Аннотация. Проведено сравнение значений атмосферных осадков и стока рек по данным реанализа глобального климата пятого поколения (*ERA5-Land*) с фактическими данными на метеостанциях и гидропостах. Сделан вывод о возможности использования данных реанализа для бассейна реки Подкаменная Тунгуска.

Ключевые слова: реанализ *ERA5-Land*, осадки, слой стока, Подкаменная Тунгуска

Введение. Данные наблюдений являются самыми достоверными для любого исследования. Однако для территории Сибири, особенно для ее северных районов, характерна редкая сеть метеорологических и гидрологических постов. В дополнение в рядах наблюдений присутствуют пропуски. При этом, как отмечает ряд авторов [2; 3], еще одной проблемой при использовании точечных данных является необходимость их интерполяции и осреднения по территории, что сопряжено с дополнительными ошибками.

В настоящее время для решения этих проблем – получения данных об отдельных составляющих водного баланса – используют базы данных реанализа за длительный период [1], который объединяет наблюдения прошлых лет с результатами численных расчетов с использованием математических моделей для создания последовательных временных рядов по различным климатическим и гидрологическим переменным. База данных реанализа представляет собой модельные данные в регулярной сетке с ассимилированными натурными данными наблюдений метеостанций, судов, самолетов, буев, данных дистанционного зондирования [7; 8], что позволяет получать наиболее полную гидроклиматическую информацию на обширные территории [4]. На сегодняшний день наиболее известные модели реанализа разработаны Национальным центром прогнозирования окружающей среды (*NCEP*, США), Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF*), Японским метеорологическим агентством (*JMA*) и др. Все данные находятся в открытом доступе.

Разные реанализы имеют разное качество и пространственное разрешение. Иногда независимые исследователи находят несогласованности в реанализах. Таким образом, оценка качества реанализов и их применение

© Данилова И. В., Буренина Т. А., Федотова Е. В., 2025

для исследуемой территории является важной задачей не только для создателей продукта, но и для независимых исследователей. В данной работе оценивается точность воспроизведения компонентов водного баланса (осадки и слой стока) по данным реанализа *ERA5-Land* для бассейна реки Подкаменная Тунгуска.

Район исследований. Исследуемая водосборная площадь бассейна реки Подкаменная Тунгуска была ограничена единственно действующим в настоящее время гидропостом факт. Кузьмовка. Длина реки на рассматриваемом участке составляет 1 700 км, площадь водосборного бассейна 223 тыс. км², средний расход 1 613 м³/с [5].

Значительная протяженность реки Подкаменная Тунгуска, а также ориентированность ее бассейна с юго-востока на северо-запад и особенности орографии отражаются на характере увлажнения территории и разнообразии почвенно-растительного покрова. В связи с этим в бассейне реки Подкаменная Тунгуска были выделены четыре частных водосбора, ограниченные местоположением гидрологических постов п. Чемдальск, факт. Усть-Камо, с. Байкит, факт. Кузьмовка.

Используемые материалы и методы. Данные по атмосферным осадкам на метеостанциях были получены с сайта: *https://www.krasmeteo.ru*. Фондовые материалы ФГБУ «Среднесибирское управление гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» использовались для расчета объема годового стока, которые послужили основой для расчета показателей стока на частных водосборах.

Облачная платформа Google Earth Engine и глобальная база данных *ERA5-Land Monthly Aggregated* (1951–2022) [8] использовались для извлечения данных реанализа (сток рек за месяц, сумма атмосферных осадков за месяц) на частные водосборы. *ERA5-Land Monthly Aggregated* предоставляет набор данных, находящихся в свободном доступе для исследователей, охватывает период с 1950 г. до настоящего времени, пространственное разрешение 11 132 м.

Для оценки сопоставимости фактических данных и данных реанализа в программе *Excel* рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, а также относительная и нормированная среднеквадратическая ошибки для оценки различия значений стока и его динамики [6].

Результаты исследований. Для извлечения данных реанализа были написаны программы на языке *JavaScript*. Данные извлекались в формате *CSV* и экспортировались в формат *Excel*, где и проводился дальнейший сравнительный анализ.

Данные по осадкам на метеостанциях представлены в точечном виде, следовательно оценка точности данных проводилась посредством сравнения результатов фактических наблюдений с данными, полученными в узлах сетки реанализа, в которых находится метеостанция. Данные извлекались за каждый месяц с 1971 по 2022 г., в годы, когда имелись фактические данные. Далее рассчитывалась сумма осадков за год.

Анализ согласованности суммы годовых атмосферных осадков по данным реанализа и фактических данных показал наличие достоверной корреляционной связи только для метеостанции Байкит (коэффициент корреляции Спирмена 0,71). Для остальных трех метеостанций коэффициент корреляции был меньше 0,39. Полагаем, что при моделировании осадков использовали только одну опорную станцию для всей территории исследования.

Одним из важных компонентов водного баланса является слой стока. Для каждого частного водосбора по данным реанализа *ERA5-Land* были рассчитаны средние по площади показатели слоя стока за те года, когда имелись фактические данные. При сравнении расчетных данных с фактическими отмечено постепенное уменьшение коэффициента ранговой корреляции Спирмена с востока на запад, т. е. от верховьев реки к устью. На участке исток реки – п. Чемдальск коэффициент корреляции модельных и фактических величин годового стока составляет 0,80, а на участке Байкит – Кузьмовка он уменьшается до 0,57.

Для частных водосборных площадей в бассейне реки Подкаменная Тунгуска относительная ошибка составляет 14–19 %, нормированная ошибка годового стока изменяется в пределах 19–40 %. Обе ошибки минимальны для водосборной площади исток – п. Чемдальск ($R = 16$ %, $nRMSE = 19$ %), здесь же наблюдается самое высокое значение корреляции ($r = 0{,}80$). Максимальная среднеквадратическая ошибка приходится на водосбор с. Байкит – факт. Кузьмовка ($nRMSE = 40$ %), и это соответствует самому низкому значению корреляции ($r = 0{,}57$).

Заключение. В ходе исследований проведен анализ показателей стока рек и годовых атмосферных осадков для четырех частных водосборов на реке Подкаменная Тунгуска.

Сравнение фактических и расчетных данных о сумме осадков показало, что при моделировании использовали только одну опорную метеостанцию Байкит, что существенно уменьшило точность модели. Следовательно, можно сделать вывод, что реанализ *ERA5-Land Monthly Aggregated* нельзя использовать при расчете такого показателя, как атмосферные осадки на территории бассейна реки Подкаменная Тунгуска.

Анализ согласованности динамики годового стока данных реанализа с фактическим данными показал наличие достоверных корреляционных связей ($r = 0{,}63$–$0{,}80$) для трёх частных водосборов (исток – п. Чемдальск, п. Чемдальск – факт. Усть-Камо, факт. Усть-Камо – п. Байкит), величина *nRMSE* находится в пределах 19–22 %. Для самого западного частного водосбора (с. Байкит – факт. Кузьмовка) отмечена максимальная ошибка ($nRMSE = 40$ %) и ниже коэффициент корреляции ($r = 0{,}57$).

В результате, несмотря на то что реанализ по стоку рек имеет некоторые неточности и ошибки, полученные на его основе модельные данные пригодны для анализа в бассейне реки Подкаменная Тунгуска.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИЛ СО РАН «Динамика компонентов углеродного цикла экосистем Сибири в меняющемся климате» (2024–2026 гг.), № FWES-2024-0023.

Список источников

1. Головинов Е. Э., Васильева Н. А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика, 2022, Т. 12, № 3. С. 92–105.

2. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Степаненко В. М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2022. № 86 (3). С. 435–446.

3. Кислов А. В., Китаев Л. М., Константинов И. С. Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 98–104.

4. Крючков А. Д. Пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова на территории Пермского края : автореф. дис. … канд. геогр. наук. Пермь, 2021. 22 с.

5. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей /под ред. Г. С. Карабаева. Л. : Гидрометеоиздат, 1967. 823 с.

6. Федотова Е. В., Буренина Т. А. Анализ сопоставимости характеристик речного стока по данным многолетних наблюдений и реанализа на примере рек западной Сибири // Метеорология и гидрология, 2023. № 6. С. 63–73.

7. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview.

8. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., and Thépaut J.-N.: ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis datase18t for land applications. Earth Syst. Sci. Data, 2021, №13. P. 4349–4383.

I. V. Danilova[1], T. A. Burenina[2], E. V. Fedotova[3]

[1, 2, 3]V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

[1]tiv80@mail.ru, [2]burenina@ksc.krasn.ru, [3]elfed@ksc.krasn.ru

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF REPRODUCTION OF WATER BALANCE COMPONENTS BASED ON ERA5-LAND REANALYSIS DATA

Abstract. The values of precipitation and river runoff based on the fifth-generation global climate reanalysis (ERA5-Land) data were compared with actual data at meteorological stations and flow gauging stations. A conclusion was made about the possibility of using reanalysis data for the Podkamennaya Tunguska River basin.

Keywords: ERA5-Land reanalysis, precipitation, runoff, Podkamennaya Tunguska

УДК 528.852 + 504.064

Е. С. Ёлкина[1], Д. Е. Плотников[2]
[1, 2]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]elkina@d902.iki.rssi.ru, [2]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Аннотация. В рамках развития методов оценки состояния культурной растительности был разработан подход к автоматизированному выявлению опасных агрометеорологических явлений (ОЯ) на территории России, учет которых, совместно с данными дистанционного зондирования Земли и имитационными моделями роста растений, потенциально позволит оценивать стрессы посевов и повысить точность кратко- и среднесрочного прогноза урожайности. Предлагаемый подход к выявлению опасных агрометеорологических явлений основан на использовании формализованных пороговых критериев наступления ОЯ по классификации Росгидромета, применяемым к растровым метеорологическим данным. Результатом применения критериев к подготовленному набору метеоданных стали наборы данных по России о произошедших опасных агрометеорологических явлениях за каждый год периода 1999–2024 гг. с отметкой о возможном наступлении ОЯ за каждый день по регулярной сетке (0,5 градусов) для следующих явлений: атмосферная засуха, почвенная засуха, заморозки, суховей, ледяная корка, условия вымерзания, условия выпревания озимых культур. Получаемые карты могут использоваться как самостоятельный источник информации, так и в качестве обучающего набора для моделей машинного обучения, ориентированных на выявление опасных агрометеорологических явлений.

Ключевые слова: метеорологические данные, опасные агрометеорологические явления, *NCEP*, продовольственная безопасность, оценка состояния посевов

Подавляющая часть пахотных земель России использует систему богарного земледелия, зависящую от погодных условий и связанных с ними неблагоприятных явлений, и в условиях меняющегося климата особенно нуждается в информационной поддержке и мониторинге. В ИКИ РАН разрабатываются методы картографирования, прогнозирования и оценки состояния сельхозкультур на основе временных серий спутниковых и метеорологических индикаторов [1–9]. В рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ «*DisasterWatch*» (уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) [10] разработан подход к автоматизированному выявлению опасных агрометеорологических явлений (ОЯ) на территории России с целью прогнозирования и оценки последствий их наступления для сельскохозяйственного сектора в условиях изменений климата.

Существующие источники информации об ОЯ в России ограничены сводными статистическими данными и анализом трендов [11; 12]. Согласно докладам Росгидромета [13], отмечается рост среднегодовой температуры, увеличение частоты экстремальных погодных явлений и аномалий. Однако

© Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е., 2025

открытых наборов данных об агрометеорологических ОЯ для России не существует, поэтому требуемое для проекта формирование независимого однородного набора исторических данных по опасным агрометеорологическим явлениям в России является необходимым этапом работы, в рамках которой были решены следующие задачи:

1. Подготовка и предварительная обработка метеорологических данных;

2. Формализация критериев возникновения опасных явлений;

3. Применение критериев к подготовленному набору метеоданных: выявление наступления опасных явлений; фильтрация по маске пахотных земель;

4. Формирование базы данных наблюдавшихся в России чрезвычайных агрометеорологических событий на основе исторических источников. Валидация выявленных автоматически событий по наземным наблюдениям, корректировка критериев наступления ОЯ;

5. Преобразование полученных наборов данных по событиям в обучающие выборки, пригодные для использования в моделях машинного обучения. Уточнение выявления опасных агрометеоявлений с помощью использования нейронных сетей, способных анализировать исторический временной ряд данных (*Bi-LSTM*).

Под опасным агрометеорологическим явлением – по определению Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [14] – понимается экстремальное метеорологическое явление (или сочетание явлений), которое происходит в критические периоды развития сельскохозяйственных культур и приводит к существенному ущербу посевам, снижению урожайности и/или потере сельскохозяйственной продуктивности. К опасным агрометеорологическим явлениям Росгидромет относит атмосферные и почвенные засухи, заморозки, суховеи, ледяную корку, переувлажнение почвы, условия вымерзания и выпревания озимых культур, для каждого явления указывая критерии их наступления. Описанные Росгидрометом критерии были превращены в математически формализованные условия, примененные к метеорологическим измерениям.

Источником метеоданных послужил глобальный датасет *NCEP* [15], архив ведётся в Центре коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [16]). Глобальный датасет *NCEP* представляет собой набор 6-часовых измерений, доступных с 1986 г. на регулярной широтно-долготной сетке с пространственным разрешением 0,5° градуса. Один пиксель *NCEP* имеет размеры приблизительно 55 × 30 км в средних широтах России; один муниципальный район в России покрывается от 1 до 4 пикселями *NCEP* 0,5°, в зависимости от формы района и его широты. Подготовка и предобработка данных включала в себя: извлечение из архивов необходимых параметров за исследуемые даты; обработку пропущенных значений; агрегацию 6-часовых данных до суточных показателей; преобразование па-

раметров в требуемые единицы измерения; расчет новых параметров на основе исходных данных, таких как суточные статистики (минимум, максимум, среднее), скорость ветра, эвапотранспирация и др. Работа с исходными данными *NCEP* в формате *grib*2 осуществлялась с использованием языка Python. В список обрабатываемых метеопараметров вошли температура и влажность воздуха, температура и влажность почвы на разных уровнях, количество осадков, атмосферное давление, глубина снежного покрова, а также ряд производных параметров и метрик. В результате на каждый год были сформированы однотипные массивы ежедневных измерений метеорологических характеристик (временные ряды). Набор метеоданных *NCEP* представляет собой трёхмерный массив с метеопоказателями и измерениями по времени, широте и долготе (*time*, *lat*, *lon*). Если совокупность условий (формализованных критериев наступления ОЯ) выполнялась в определенный день в определенном пикселе, записи «день-пиксель» присваивалась метка *True* для рассматриваемого явления (рис. 1, 2).

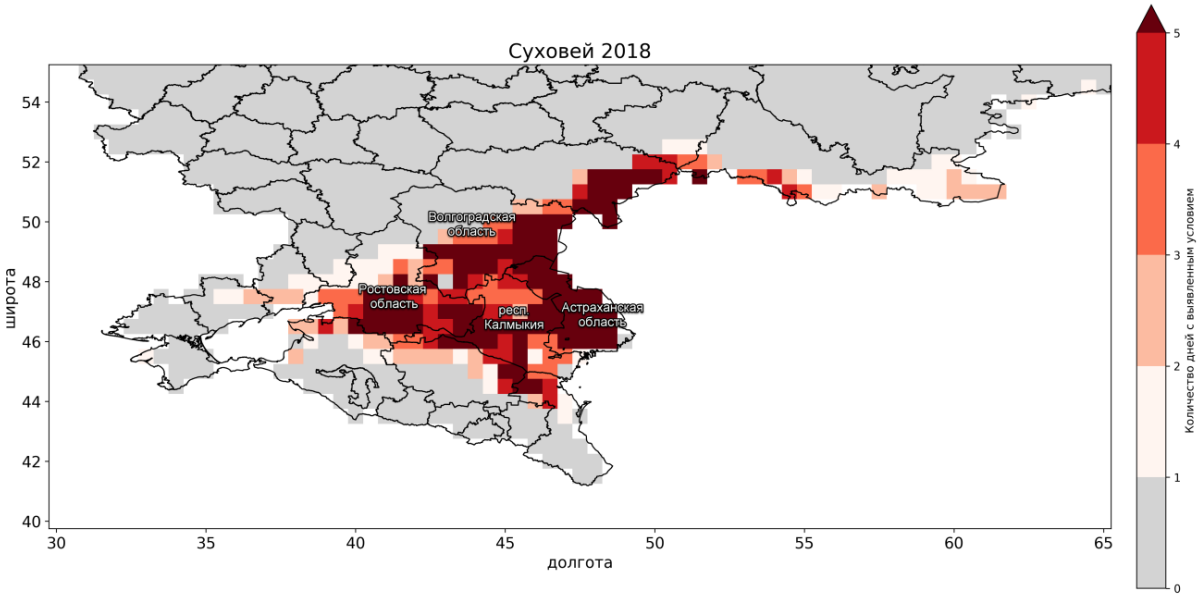


Рис. 1. Пример выявленного опасного явления «суховей» на территории России в 2018 г. на основе формализованных критериев (скорость ветра выше7 м/с, температура воздуха выше 25 °С и относительная влажность не превышает 30 %), примененных к набору метеоданных *NCEP*. Согласно данным МЧС, режим чрезвычайной ситуации из-за суховея был объявлен в Астраханской, Волгоградской, Ростовской областях, республике Калмыкия в июне-июле 2018 г., что согласуется с полученной картой. Градиент цвета шкалы соответствует частоте встречаемости явления в пикселе за год

Таким образом были выявлены условия наступления явлений: заморозки, суховей, атмосферная засуха, почвенная засуха, вымерзание, выпревание, ледяная корка. В результате работы были получены карты наступления ОЯ для каждого дня в году на территории России для каждого явления из списка (рис. 2). Полученные карты опасных явлений фильтровались

по маске используемых пахотных земель [17, 18] для исключения нерелевантных территорий, где наступление ОЯ не могло повлечь экономических потерь из-за снижения урожайности посевов.

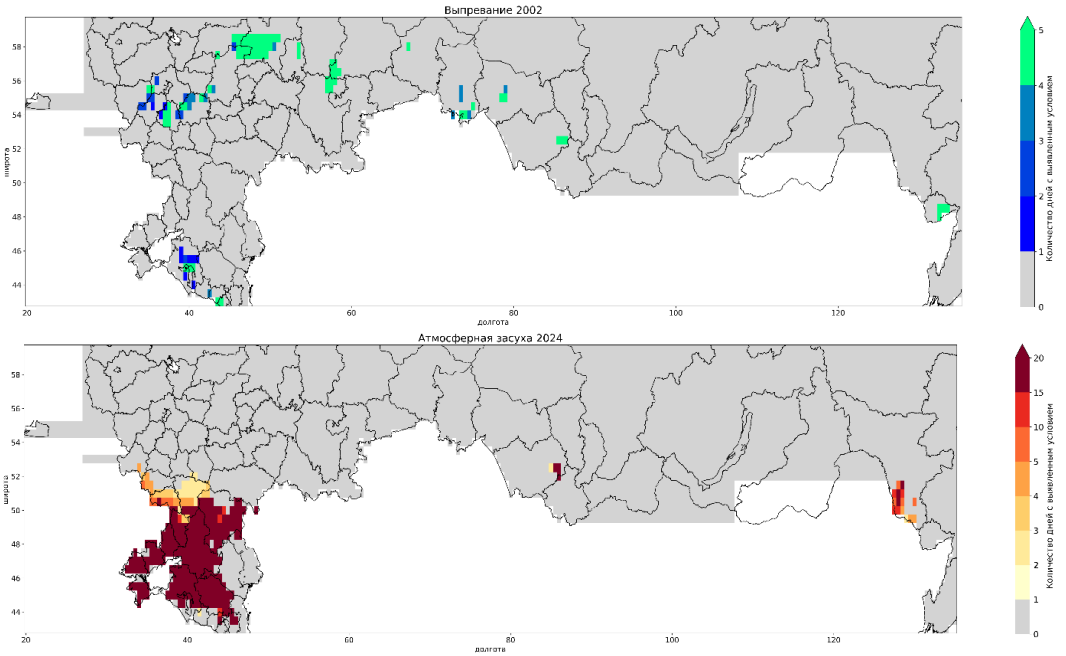


Рис. 2. Примеры выявленных явлений на территории России на основе формализованных критериев, примененных к набору метеоданных *NCEP*: вверху – территории с условиями выпревания озимых культур в 2002 г., внизу – условия атмосферной засухи в 2024 г. Градиенты соответствуют частоте встречаемости явления в пикселе за год

Полученные наборы данных позволили осуществить анализ пространственно-временных тенденций опасных агрометеорологических событий на территории пахотных земель России за 1999–2024 гг. (рис. 3).

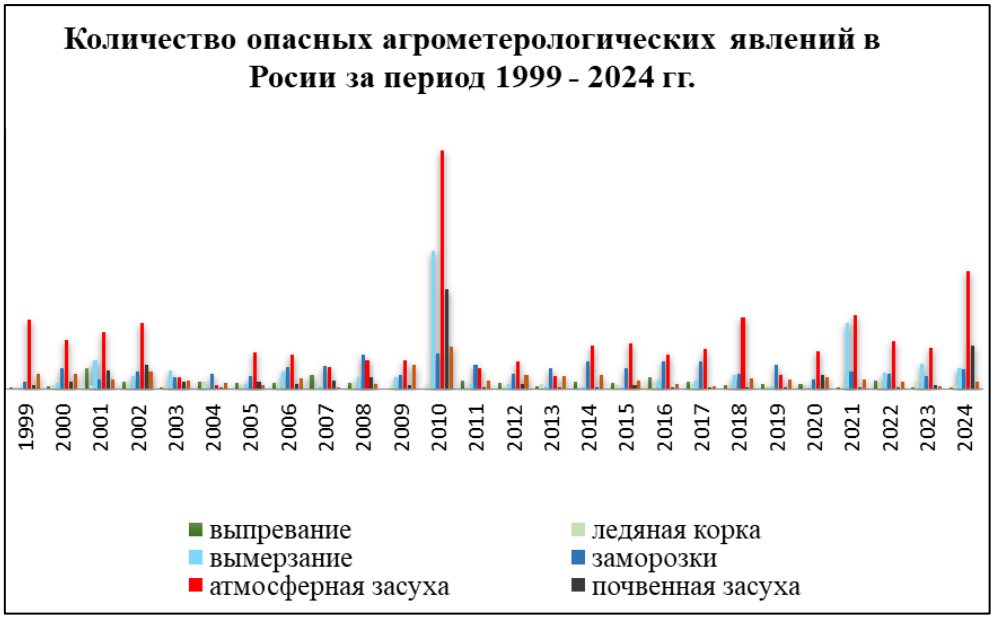


Рис. 3. Суммарное количество выявленных опасных агрометеорологических явлений в России за период 1999–2024 гг.

В настоящее время наблюдается увеличение частоты различных ОЯ, что согласуется с оценочными докладами об изменении климата. Раз в несколько лет наблюдается экстремальное количество ОЯ, например, в 2010 и 2024 гг. Наиболее заметен рост количества засух (атмосферной и почвенной), а также сильных морозов и риска вымерзания (при морозах в отсутствие достаточного снежного покрова).

Для проверки фактического наступления ОЯ была собрана база опасных агрометеорологических явлений на территории России за последнюю четверть века, подтверждаемых по спутниковым данным и зарегистрированных в различных информационных источниках. База данных находится на сайте проекта *DWATCH* и содержит информацию о датах, типе события, описание последствий ОЯ, ссылки на источники данных о произошедших опасных агрометеоявлениях, а также ссылки на систему спутникового мониторинга Вега [19] для каждого ОЯ, которые служат иллюстрацией и подтверждением наступления опасных явлений для посевов в терминах отклонений от нормы вегетационного индекса *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*). Экспертная валидация на разных уровнях (отдельных районов, группы районов, субъектов РФ) подтверждает корректность применённых критериев и обоснованность использования данных реанализа *NCEP*.

Карты наступления опасных явлений (ОЯ), полученные по данным *NCEP* для каждого дня года на территории России, могут быть далее улучшены с помощью методов машинного обучения для уточнения детекции ОЯ. Использование нейросетей в данной задаче представляется перспективным, поскольку они обладают способностью выявлять нелинейные пространственно-временные зависимости в многомерных метеорологических данных, находить сложные зависимости во временных рядах, превосходя пороговые методы [20]. В настоящей работе проведен эксперимент по обучению двунаправленной сети долгой краткосрочной памяти *Bi-LSTM*: *bidirectional long short-term memory* (*LSTM*) *neural network*. Для каждого опасного события использовалась отдельная модель. Обучение велось на стеке многих лет (70 % данных), предсказание на целевом годе, в результате чего были получены уточненные вероятности события для каждого дня.

В результате исследований разработана методика формирования комплексных наборов данных об экстремальных агрометеорологических явлениях на территории России за более чем 25-летний исторический период. Результатом применения критериев к подготовленному набору метеоданных являются растровые наборы данных для территории России о произошедших опасных агрометеорологических явлениях за каждый год периода 1999–2024 гг., с отметкой о наступлении ОЯ за каждый день по регулярной сетке (0,5 градусов) для следующих явлений: атмосферная засуха, почвенная засуха, заморозки, суховей, ледяная корка, условия вымерзания, условия выпревания озимых культур. Настоящая работа обеспечивает построение калибровочных наборов для обучения моделей обнаружения и оценки по-

следствий наступления ОЯ, обеспечивая вклад в разработку мер по адаптации к изменениям климата с целью повышения устойчивости сельскохозяйственного сектора экономики России.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Список источников

1. Ёлкина Е. С., Егоров В. А., Плотников Д. Е., Самофал Е. В., Барталев С. А., Патил В. К., Сунил Д. К., Чаван В. С. Развитие методов спутникового мониторинга состояния посевов сахарного тростника в южной Индии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 159–173. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-159-173.

2. Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.

3. Середа И. И., Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на Европейской территории России в октябре 2020 г.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.

4. Плотников Д. Е., Бойматов Ю. Ш., Ёлкина Е. С., Щербенко Е. В., Плотникова А. С. Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129.DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.

5. Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е., Дунаева Е. А. Обнаружение возможности дистанционного распознавания орошаемых земель Республики Крым на основе спектрально-временных и температурных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 379–386. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-379-386.

6. Савин И. Ю., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А., Медведева М. А., Плотников Д. Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 150–162.

7. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.

8. Дунаева Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Ёлкина Е. С., Барботкина Е. С., Вечерков В. В., Барталев С. А. Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 4 (20). С. 28–45.DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.

9. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A., Loupian E., Proshin A. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // IEEE proceedings of ITNT 2022. VIIIth International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IEEE, 2022. P. 9848630. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

10. Использование данных спутникового мониторинга для укрепления продовольственной безопасности и повышения устойчивости сельскохозяйственного сектора в условиях изменения климата (акроним DWATCH). URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=1052 (дата обращения 19.09.2025).

11. Панфутова Ю. А. Опасные метеорологические явления на равнинной территории Российской Федерации и риски, создаваемые ими : автореф. дис. … канд. геогр. наук: 25.00.30. Санкт-Петербург, 2008. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=nkqtix (дата обращения 19.09.2025).

12. Romanovskaya A. A. (2023). Trends In Extreme Weather Events With Socio-Economic Damage Over The Period 1991-2019 In Russia And Its Regions. Geography, Environment, Sustainability, 4(16), 82–90. https://DOI-10.24057/2071-9388-2023-2703.

13. Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2025. URL: http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2024_with_cover.pdf (дата обращения 19.09.2025).

14. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений: (РД 52.88.699–2008): руководящий документ: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: введен в действие приказом Росгидромета от 16.10.2008 № 387. URL: https://www.naai.ru/upload/iblock/5fe/5fee73a30ee041c12c26b4e27d1e2695.pdf (дата обращения 19.09.2025).

15. National Centers for Environmental Prediction. URL: https://ncep.noaa.gov (дата обращения: 19.09.2025).

16. 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. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

17. Плотников Д. Е., Трошко К. А., Щербенко Е. В., Толпин В. А., Денисов П. В., Кобец Д. А. Картографирование пахотных земель России на основе сезонных временных серий MODIS высокого временного разрешения // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 374. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.

18. Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е. Построение серий NDVI высокого временного разрешения по данным Landsat для оценки тридцатилетней динамики используемой пашни // XI Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск, 2024. С. 155–15.

19. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Толпин В. А. Система «ВЕГА-Science»: возможности работы с данными спутниковых наблюдений Земли для решения научных и прикладных задач. // Земля и Вселенная, 2025. № 1–2 (361–362). С. 66–85.

20. Siami-Namini S., Tavakoli N., Siami Namin A. The Performance of LSTM and BiLSTM in Forecasting Time Series // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Los Angeles, USA, 2019. С. 3285–3292. DOI: 10.1109/BigData47090.2019.9005547.

E. S. Elkina[1], D. E. Plotnikov[2]
[1, 2]Space Research Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[1]elkina@d902.iki.rssi.ru, [2]dmitplot@d902.iki.rssi.ru

AUTOMATED DETECTION OF EXTREME AGROMETEOROLOGICAL EVENTS IN RUSSIA

Abstract. As part of the research focused on crop condition assesment conducted by the Russian Space Research institute, this study focuses on developing the automated detection of extreme agricultural weather events in Russian regions over 25 years (1999–2024). The proposed approach to detecting hazardous agrometeorological events is based on the use of formalized threshold criteria defined by Roshydromet, applied to gridded meteorological data. The source of meteorological data is the global NCEP dataset (National Centers for Environmental Prediction). Application of these criteria to the prepared meteorological dataset resulted in raster datasets covering Russia that document the occurrence of extreme agrometeorological events for each year of the 1999–2024 period, with daily resolution on a regular grid (0,5°). The following events are included: atmospheric drought, soil drought, frost, dry wind, ice crust, winterkill and waterlogging conditions of winter crops. The resulting maps can be used both as an independent source of information and as a training datasets for machine learning for identification of extreme agricultural weather events and their impacts assesment, developing in support for agriculture sustainability and preserving biodiversity.

Keywords: meteorological data, extreme agrometeorological events, NCEP, food security, crop condition assessment

УДК 528.88, 630

С. Т. Им[1], И. А. Петров[2],
Д. А. Демидко[3], А. С. Шушпанов[4], М. Л. Двинская[5]
[1, 2, 3, 4, 5] Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[1, 3, 4] Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск, Россия
[1, 2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[1]stim@ksc.krasn.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ УСЫХАНИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ MODIS

Аннотация. В 2010-е гг. на территории юга Сибири наблюдалось распространение полиграфа уссурийского, приведшее к массовому усыханию пихтовых древостоев. В работе анализировались индексы *NDVI*, *EVI*, *NDII*, *GPP*, *NPP* и *LAI*, рассчитанные на основе спектрорадиометрической съемки *MODIS* для зон усыхания пихтовых древостоев, произраставших в национальном парке «Красноярские Столбы». В начальной фазе воздействия значения индексов значительно уменьшились. В последующие 1–4 года *EVI*, *GPP*, *NPP* и *LAI* возрастали. Только индекс *NDII* на протяжении 9 лет достоверно снижался (R^2 = 0,91, p < 0,05) и коррелировал с усыханием древостоев (r = –0,95, p < 0,05). Однако пространственная неоднородность и растянутость во времени воздействия полиграфа, сопровождающееся быстрым зарастанием травяным и кустарниковым покровом, затрудняет идентификацию и анализ таких участков.

Ключевые слова: *NDVI*, *EVI*, *LAI*, *GPP*, *NDII*, пихтовые древостои, «Красноярские Столбы»

В XXI в. на юге Сибири наблюдается сокращение темнохвойных лесов [1]. Причинами гибели лесов, помимо пожаров и вырубок, является распространение насекомых вредителей и болезней, инициированных изменениями климата [2]. Одним из них является полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus Blandford*), который с 2000-х гг. привел к усыханию значительный территорий пихтовых древостоев [3]. Данные дистанционного зондирования *Terra/MODIS* позволяют количественно оценить динамику и состояние древостоев на обширных территориях [4]. Целью работы являлся анализ особенностей динамики количественных показателей, вычисленных на основе спектрорадиометрической съемки *MODIS*, соответствующих зонам усыхания пихтовых древостоев, вызванных воздействием полиграфа уссурийского.

Объект исследования. Анализировались участки древостоев с преобладанием пихты, произраставших в национальном парке «Красноярские Столбы» (55,9° с.ш.; 92,7° в.д.; площадь ~47,2 тыс. кв. км; *https://krasstolby.ru*). Высоты ~200–800 м над у. м. В год выпадает 660 мм осадков. Средняя годовая температура –0,2 °С. Леса сформированы темнохвойными (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica*, *Picea obovata*), светлохвойными (*Pinus*

© Им С. Т., Петров И. А., Демидко Д. А., Шушпанов А. С., Двинская М. Л., 2025

sylvestris, *Larix sibirica*) породами, а также лиственными деревьями (*Betula* sp., *Populus tremula* и другие).

Материалы. Анализ производился на основе временных серий вегетационных индексов *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) и *NDII* (*Normalized Difference Infrared Index*), рассчитанных из продукта *MOD*13*Q*1 версии 6.1 с пространственным разрешением ~250 м [5]. Также, использовались данные о первичной продуктивности (*GPP* и *NPP*) и индексе листовой поверхности (*LAI*), извлеченные из продуктов версии 6.1 с пространственным разрешением ~500 м *MOD*17*A*2*HGF* [6] и *MOD*15*A*2*H* [7], соответственно. Анализировались данные за 2000–2024 гг. Анализируемые тестовых участки ($N = 3$) соответствовали территориям, исследованным в ходе полевых работ 2025 г. До массового распространения полиграфа на этих участках преобладали пихтовые древостои, которые к 2025 г. усохли. Данные о динамике усыхания пихтовых древостоев (сухостой) предоставлены национальным парком «Красноярские Столбы» в рамках выполнения работ по гранту РНФ № 25-14-20068.

Методика. Обработка данных состояла из следующих этапов: 1) расчет многослойных растров временных серий за 2000–2024 гг. показателей *NDVI*, *EVI*, *NDII*, *GPP*, *NPP*, *LAI*; 2) извлечение средних значений показателей в пределах 250-метровых буферных зон вокруг точек пробных площадок методом *ExactExctract* (*https://isciences.github.io/exactextract*), позволяющего учесть доли представленности пикселей при расчете статистик; 3) анализ графиков с целью выявления особенностей динамики анализируемых показателей. Геообработка производилась в *ESRI ArcGIS Desktop* (*https://www.esri.com*), Расчет *ExactExctract* производился с использованием библиотеки exactextract 0.2.2 (*https://pypi.org/project/exactextract*) на языке *Python*.

Результаты и обсуждение. До усыхания пихтовых древостоев индексу *NDVI* в среднем соответствовали значения 0,84±0,01 (рис. 1, *а*). С 2011 г. по 2016 г. значения уменьшались ($R^2 = 0,72$; $p < 0,05$), что свидетельствует об ухудшении состояния пихтовых древостоев, подвергавшихся атакам полиграфа уссурийского. Это согласуется с данными о динамике сухостоя, количество которого в 2014–2019 гг. возрастало на ~17 % в год ($R^2 = 0,92$, $p < 0,05$; рис. 1). К 2016 г. более 80 % деревьев пихты погибли. После 2016 г. *NDVI* возрастал из-за активного зарастания травяным покровом и кустарниками, а также появления возобновления (рис. 1, *а*). Интересно, что значения *EVI* значительно упали в 2012 г., а в последующие годы возрастали до 2024 г. ($R^2 = 0,81$, $p < 0,05$; рис. 1, *б*). при этом значения индекса *EVI* в 2000–2011 гг. были ниже, чем *NDVI*, и составлял 0,41±0,01.

Индекс *NDII* возрастал до 2012 г. ($R^2 = 0,60$, $p < 0,05$; рис. 1, *в*) вызванное увеличением влагосодержания в растительном покрове. После воздействия полиграфа (2012 г.) *NDII* стал уменьшаться ($R^2 = 0,91$, $p < 0,05$) и достиг минимума в 2020 г. (0,62; рис. 1, *в*). В этот период наблюдалась тесная обратная связь между долей усохших древостоев и *NDII* ($r = –0,95$, $p < 0,05$).

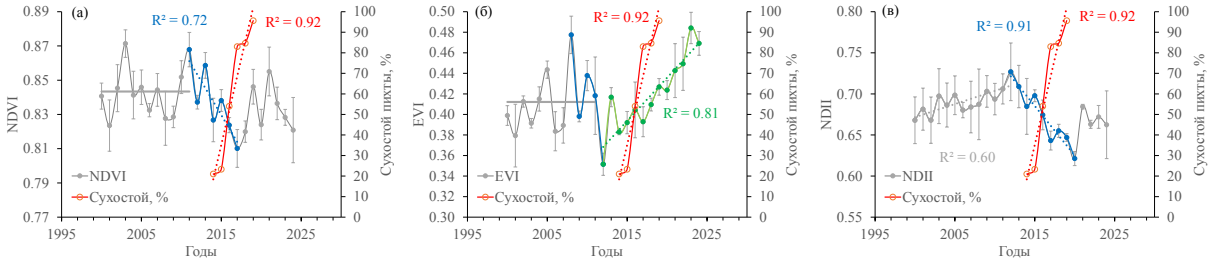


Рис. 1. Динамика усредненных индексов (*а*) максимальные *NDVI* и (*б*) *EVI*, (*в*) средние летние *NDII* по трем тестовым зонам усыхания пихтовых древостоев (2000–2024 гг.). Горизонтальная линия – средние значения за 2000–2011 гг. Тренды статистически значимые при $p < 0,05$. Рисками показаны 95 % доверительные интервалы

До начала массового воздействия полиграфа (до 2011 г.) наблюдался рост биомассы, возрастали *GPP* и *NPP* (R^2 = ~0,46, $p < 0,05$; рис. 2, *а*, *б*), и *LAI* ($R^2 = 0,28$, $p < 0,08$; рис. 2, *в*). В 2012 г. и 2017 г. показатели продуктивности упали до минимумов, а в промежутках они возрастали почти до прежних значений. При этом в период начала усыхания пихты (2011–2014 гг.) индекс *LAI* уменьшился с 60 до 40 ($R^2 = 0,87$, $p < 0,07$), а в последующие 8 лет стал возрастать из-за интенсивного роста травяного и кустарникового покрова.

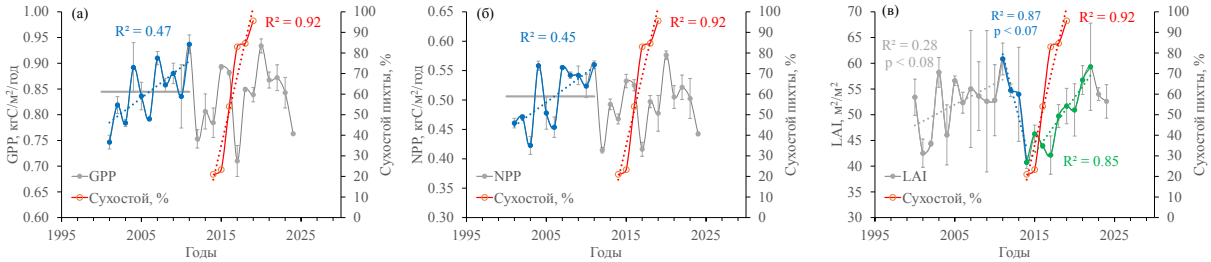


Рис. 2. Динамика усредненных значений годовых (*а*) *GPP* и (*б*) *NPP*, (*в*) максимальных *LAI* по трем тестовым зонам усыхания пихтовых древостоев (2000–2024 гг.). Горизонтальная линия – средние значения за 2000–2011 гг. Тренды статистически значимые при $p < 0,05$. Рисками показаны 95 % доверительные интервалы

Заключение. Анализ данных спектрорадиометрической съемки *MODIS* показал, что наблюдаемые изменения неоднородно описываются рассмотренными индексными показателями. Вегетационные индексы обладают разной чувствительностью, при этом *NDII* достаточно тесно связан с динамикой усыхания пихтовых древостоев ($r = –0,95$, $p < 0,05$). Первичная продуктивности и *LAI* возросли на 1–4 годы после воздействия. Это связано с особенностями воздействия полиграфа на древостои, такими как пространственная неоднородность и растянутость во времени, сопровождающиеся быстрым зарастанием таких участков травяным и кустарниковым покровом, что затрудняет их идентификацию и анализ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-14-20068).

Список источников

1. 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.

2. Kharuk V. I., Im S. T., Ranson K.J., Yagunov M. N. Climate-induced northerly expansion of Siberian silkmoth range // Forests. 2017. V. 8, Issue 301. URL: https://www.mdpi.com/1999-4907/8/8/301.

3. Kharuk V. I., Shushpanov A. S., Petrov I. A., Demidko D. A., Im S. T., Knorre A. A. Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) mortality in mountain forests of Eastern Sayan Ridge, Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2019. Vol. 12. № 4. P. 299–309.

4. Im S. Spatial analysis of vegetation cover response to climate trends in Khakassia (South Siberia) // Journal of Mountain Science. 2023. V. 20(10). P. 2869–2884. URL: https://doi.org/10.1007/s11629-023-8096-4.

5. Didan K. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061 // Distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. URL: https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061.

6. Running S., Zhao M. MODIS/Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 // Distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. URL: https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061.

7. Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 // Distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. URL: https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061.

S. T. Im[1], I. A. Petrov[2], D. A. Demidko[3], A. S. Shushpanov[4], M. L. Dvinskaya[5]

[1, 2, 3, 4]V. N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

[1, 3, 4]Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

[1, 2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

[1]stim@ksc.krasn.ru

IDENTIFICATION OF DARK CONIFEROUS STANDS' DECLINE BASED ON MODIS SATELLITE DATA

Abstract. In the 2010s, the spread of the *Polygraphus proximus* was observed in southern Siberia, which led to a massive decline in fir stands. NDVI, EVI, NDII, GPP, NPP and LAI indices were analyzed, calculated based on MODIS spectral radiometric data for zones of fir decline in the National Park "Krasnoyarsk Stolbi". In the initial phase of the impact, the index values decreased significantly. In the following 1–4 years, EVI, GPP, NPP, and LAI increased. Only the NDII index significantly decreased over the ~9 years ($R^2 = 0.91$, $p < 0.05$) and correlated with the decline of fir stands ($r = –0.95$, $p < 0.05$). However, the spatial heterogeneity and time-dilation of the polygraphus's impact, accompanied by rapid growth of grass and shrub cover, makes it difficult to identify and analyze such areas.

Keywords: NDVI, EVI, LAI, GPP, NDII, fir stands, "Krasnoyarsk Stolbi"

УДК 528.8:633.1

М. В. Колодяжный[1], Е. А. Дунаева[2]
[1, 2]Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма,
Симферополь, Россия
water_crimea@hotmail.com

ОЦЕНКА УРОВНЯ ВАРИАЦИИ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОСЕВОВ В ГОДЫ РАЗНОЙ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ

Аннотация. В работе представлены результаты оценки вариации неоднородности посевов в условиях различной водообеспеченности по данным спутникового мониторинга. Использовались данные для периодов 2022–2024 гг. и 2010–2013 гг., исходными материалами являются космические снимки *Landsat-7–9*, работа проведена с использованием веб-сервиса «Вега-*Science*». В ходе исследования определено влияние рельефа, почвенных условий, водообеспеченности на неоднородность посевов, что поможет точнее прогнозировать урожайность полевых культур и принимать управленческие решения на основе данных ДЗЗ.

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

Введение. Использование данных дистанционного зондирования Земли для оценки однородности посевов в условиях разной водообеспеченности, являются актуальными в регионах, подверженных засухе, так как позволяют оценивать потенциальную продуктивность сельскохозяйственных земель и эффективность применения оросительных мелиораций.

Целью данного исследования является оценка уровня вариации неоднородности посевов как отклик на условия водообеспеченности.

Материалы и методы. Дистанционный мониторинг посевов проводился для периодов 2012, 2020, 2023 и 2024 гг. для территории степной части (Первомайский и Красногвардейский районы) Крымского полуострова. Для оценки морфометрических характеристик рельефа использована цифровая модель рельефа *SRTM*, с пространственным разрешением 90 м. Определение зон неоднородности проводилось методом кластеризации (модуль *Raster Reclassifier* для ПО *QGIS* 3.30).

Данные по осадкам для территории исследования использованы по данным датасета *FLDAS* (*FEWS NET*) (*https://disc.gsfc.nasa.gov*) за период 1985–2024 гг. по точке с. Правда Первомайского района, в связи с тем, что для данного района отсутствует метеостанция сети Росгидромет, и в точке с. Клепинино Красногвардейского района Республики Крым на опытных полях ФГБУН «НИИСХ Крыма», что позволит сравнить наземную информацию с данными спутникового мониторинга.

В работе использовались данные высокого пространственного разрешения (*Landsat-7–9*). При проведении работ использовались следующие

© Колодяжный М. В., Дунаева Е. А., 2025

нормативные документы: ГОСТ Р 59082–2020 для создания тематических продуктов ДЗЗ; ГОСТ Р 70026–2022 для выбора эталонов; ГОСТ Р 59829 для проведения классификации в картографическом веб-сервисе (геосервис) Вега-*Science* (УНУ ЦКП «Ики-Мониторинг») [1].

Важно оценивать годы с различной водообеспеченностью, что позволит понять причины возникновения неоднородности посевов, является актуальным для территорий с аридным климатом, таких как Республика Крым.

Результаты. На рис. 1 представлена оценка морфометрических характеристик рельефа рассматриваемых участков. На обеих исследуемых территориях присутствует расчленение рельефа в виде балки, также равны абсолютные перепады высот (15–16 м), одинакова ориентация рельефа в пространстве (т. е. склоны северной экспозиции). При этом высота участка в Красногвардейском районе варьируется в диапазоне от 30 до 45 м, в Первомайском – от 0 до 15 м.

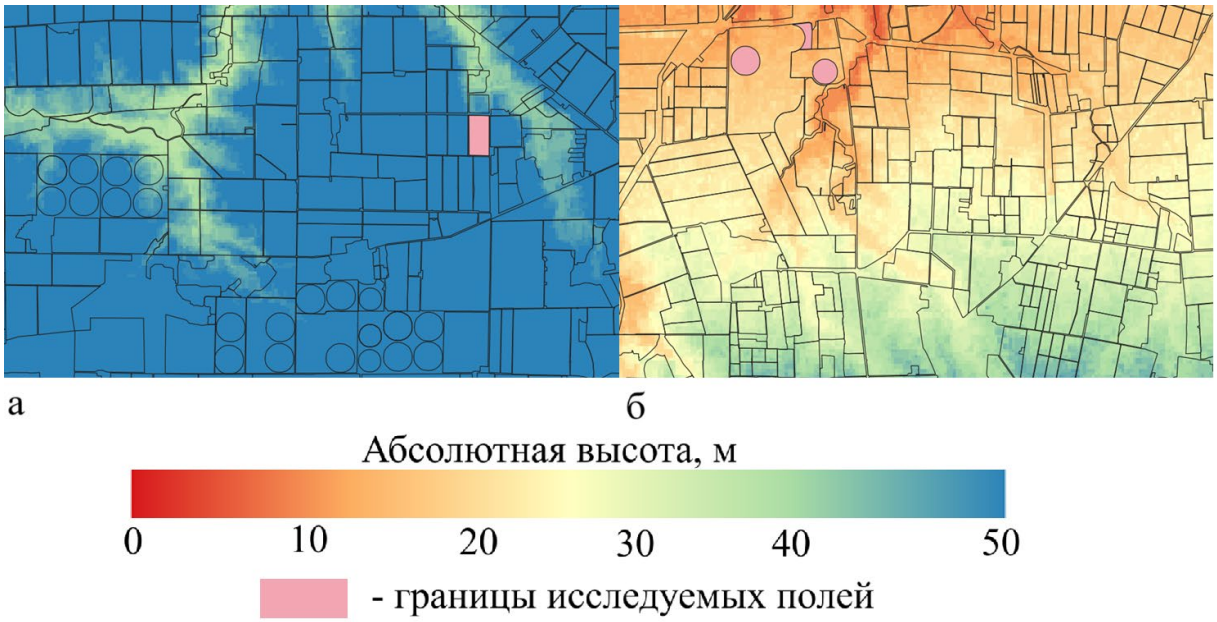


Рис. 1. Оценка морфометрических характеристик рельефа:
а – Красногвардейский район; *б* – Первомайский район

В Красногвардейском районе, помимо понижения около с. Клепинино, присутствует понижение глубиной 8–10 м вблизи с. Ястребовка. Для данной территории характерна большая неравномерность рельефа с ярко выраженными водораздельными пространствами. Средняя крутизна рельефа не превышает 3°.

На территории Первомайского района отмечаются более крутые склоны (до 5°) в непосредственной близости от балки, в то время как для прилегающих участков характерен более выположенный рельеф.

На территории Первомайского района почвенный покров неоднородный и представлен лугово-каштановыми степными и лугово-степными солонцеватыми, а также темно-каштановыми солонцеватыми почвами (по данным «Карты грунтов Украинской РСР» под редакцией профессора

М. К. Крупского, 1967 г.). Распределение почв по территории совпадает с морфометрическими особенностями рельефа – темно-каштановые почвы располагаются в понижениях, что свидетельствует о накоплении гумуса [2].

В Красногвардейском районе наблюдается схожая ситуация – почвенное разнообразие представлено черноземом южным слабогумуссированным на лессах и лессовидных породах, а также черноземы южные слабогумуссированные слабо- и среднесмытые. Ключевым почвообразующим фактором выступает рельеф – смытость почв возрастает с увеличением уклона.

На рис. 2 представлено сравнение неоднородности посевов в Первомайском районе по индексу *NDVI* в годы разной обеспеченности. К примеру, 2012, 2020 и 2024 гг. являлись засушливыми, в то время как 2023 г. был относительно влажным. Для кластеризации использовались космические снимки за первую декаду мая каждого года. Данные поля разделены на пять классов: 1-й класс – 0,4–0,5; 2-й класс – 0,5–0,6; 3-й класс – 0,6–0,7; 4-й класс – 0,7–0,8; 5-й класс – 0,8–0,9 [3].

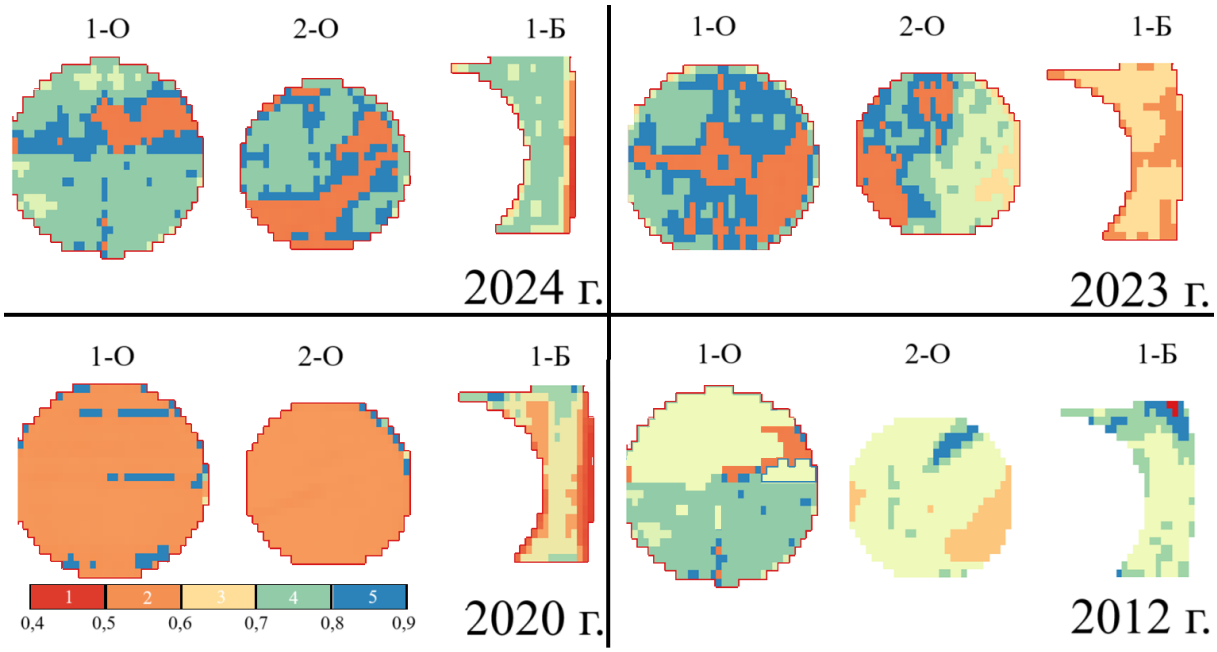


Рис. 2. Сравнение неоднородности посевов в Первомайском районе в годы разной водообеспеченности (1-О, 2-О – орошаемые поля, 1-Б – неорошаемое)

Важно отметить, что в 2012 г. поле 1-О орошалось с использованием фронтальной дождевальной машины, после – с использованием круговой. Разница в способе орошения также повлияла на неоднородность, так как в остальные годы она носит радиальный характер, а в 2012 г. – делится по центру.

Поле 2-О расположено в понижении, что явно отображается на значении *NDVI* – за каждый год заметен участок с повышенным значением *NDVI*, совпадающий с балкой.

Поле 1-Б имеет более бессистемную структуру неоднородностей посевов. Можно выделить ярко выраженный краевой эффект. Как правило, биомасса на границе поля существенно меньше, чем в его центре.

На рис. 3 представлен аналогичный анализ по Красногвардейскому району. Для кластеризации также использовалось на пять классов: 1-й класс – 0,4–0,45; 2-й класс – 0,45–0,50; 3-й класс – 0,50–0,55; 4-й класс – 0,55–0,60; 5-й класс – 0,60–0,65.

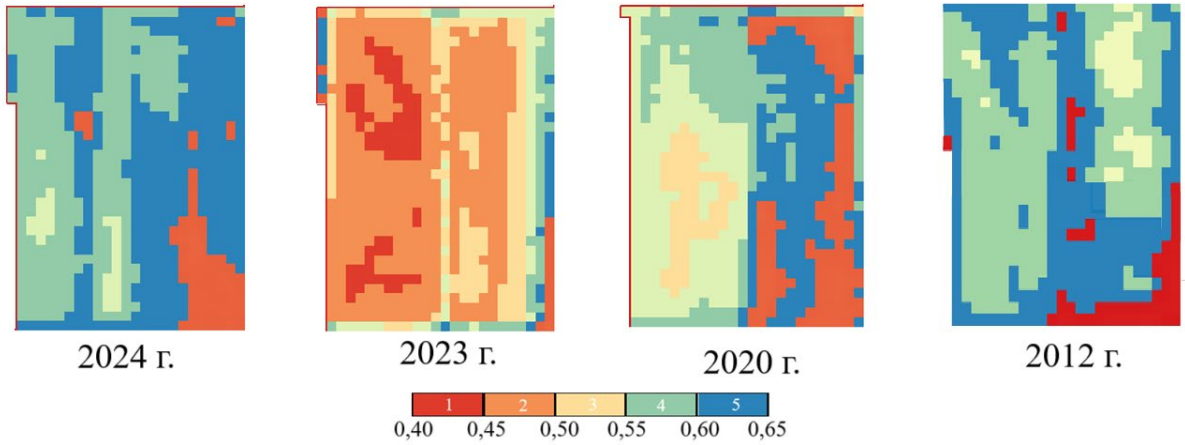


Рис. 2. Сравнение неоднородности посевов в Красногвардейском районе в годы разной водообеспеченности

Структура неоднородностей схожа за каждый год и объясняется рельефом местности. Через данное поле проходит балка, что способствует накоплению гумуса и влаги в почве в северо-восточной части поля. В то время как в юго-западной части находится возвышенность, что приводит к меньшему объему биомассы.

Выводы. Можно прийти к выводу, что на территории степного Крыма основополагающим фактором для развития растений является влага. Ее запасы в почве определяют неоднородность посевов в рамках одного поля. На орошаемых полях в меньшей степени проявляется неоднородность, так как они менее зависимы от существующих запасов влаги. При этом для указанных участков наиболее важным фактором является рельеф, предопределяющий почвообразующие процессы, распределение влаги по полю и т. д.

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [2].

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 24-27-00251.

Список источников

1. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

2. Половицкий И. Я., Гусев П. Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия : справочное изд. Симферополь : Таврия, 1987. 152 с.

3. Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия / В. П. Якушев, Ю. И. Блохин,

С. Ю. Блохина [и др.]. СПб. : Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. 76 с.

M. V. Kolodyazhny[1], E. A. Dunaeva[2]
[1]Federal State Budgetary Institution “Research Institute of Agriculture of Crimea”, Simferopol, Russia
[2]Federal State Budgetary Institution “Research Institute of Agriculture of Crimea”, Simferopol, Russia
water_crimea@hotmail.com

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF VARIATION OF CROP HETEROGENEITY IN YEARS OF DIFFERENT WATER AVAILABILITY

Abstract. The paper presents the results of assessing the variation of crop heterogeneity in conditions of different water availability according to satellite monitoring data. Data was used for the periods 2022–2024 and 2010–2013, the source materials are Landsat 7–9 satellite images, the work was carried out using the Vega-Science web service. The study determined the influence of relief, soil conditions, and water availability on crop heterogeneity, which will help to more accurately predict crop yields and make management decisions based on remote sensing data.

Keywords: remote sensing, service “VEGA-Science”, irrigation, NDVI.

УДК 528.8

А. М. Константинова[1], А. А. Бриль[2], Е. А. Лупян[3]
[1, 2, 3]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]konstantinova@d902.iki.rssi.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ДИОКСИДА АЗОТА С УЧЕТОМ МЕТЕОУСЛОВИЙ

Аннотация. В работе проводится оценка выбросов диоксида азота (NO_2) от крупных стационарных антропогенных источников с использованием спутниковых данных *TROPOMI* (*Sentinel-5P*), имеющихся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Применены методы порогового и итеративного анализа для выделения источников, а также расчет их мощности с учетом влияния скорости ветра. Полученные результаты позволяют классифицировать источники загрязнения и формировать рейтинги городов России по уровню выбросов NO_2, обеспечивая мониторинг качества воздуха.

Ключевые слова: диоксид азота, загрязнения атмосферы, *TROPOMI*, малые газовые составляющие, спутниковый мониторинг

Введение. В настоящее время задачи мониторинга качества воздуха становятся всё более актуальными в связи с постоянно возрастающим антропогенным воздействием на окружающую среду. Особенно важной задачей является отслеживание антропогенных источников загрязнения: крупных городов, промышленных предприятий, теплоэлектростанций, транспортных узлов и других стационарных объектов. Такие стационарные источники выбрасывают в атмосферу огромное количество опасных веществ, в том числе малых газовых составляющих (МГС), существенно ухудшая качество воздуха в городах и окрестностях. Поэтому необходим постоянный мониторинг таких объектов. Одним из основных загрязнителей атмосферы является токсичный газ – диоксид азота. В работе проводится исследование по оценке выбросов диоксида азота от крупных антропогенных источников с использованием данных прибора *TROPOMI* спутника *Sentinel-5P* [1].

Информационные продукты МГС, доступные в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Начиная с 2019 г. Институт космических исследований (ИКИ РАН) в рамках развития информационных систем, функционирующих на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (*http://ckp.geosmis.ru/*), активно ведет автоматизированный сбор и архивацию данных различных спутниковых систем, осуществляющих измерения загрязнений атмосферы [2; 3]. Получение и архивация таких данных реализована полностью в автоматическом режиме. В частности, через информационную систему «*Вега-Science*» (*http://sci-vega.ru/*, которая входит в семейство «Созвездие-Вега») [4], работающую на базе ЦКП, пользователям

© Константинова А. М., Бриль А. А., Лупян Е. А., 2025

предоставляется доступ к данным о концентрации МГС в атмосфере, полученных с помощью спутника *Sentinel-5P* прибора *TROPOMI*. Спутник *Sentinel-5P* находится на солнечно-синхронной орбите высотой около 824 км. Он совершает полный оборот вокруг Земли за 100 минут, что соответствует 14–15 виткам в сутки, проходя экватор в 13:30 по местному времени. Имея ширину полосы сканирования около 2 600 км, спутник предоставляет данные раз в сутки на каждую точку земного шара с достаточно хорошим пространственным разрешением (до 7,5 × 5,5 км). При этом в каждой точке предоставляются также метеоданные, например, скорость ветра из реанализа *ERA*5 [5]. В архивах ЦКП спутниковые данные прибора *TROPOMI* доступны с 2018 г. по настоящее время. Пользователям информационных систем доступны как оригинальные продукты загрязнений атмосферы, так и производные таких продуктов, в том числе различные временные композитные изображения на территорию всего земного шара. Для комплексного анализа загрязнений атмосферы диоксидом азота в архивы ЦКП были добавлены временные композитные изображения на территорию Северной Евразии, нормированные по направлению и скоростям ветра на высоте около 10 м над земной поверхностью. Такие изображения позволяют разрабатывать подходы для качественной оценки выбросов крупных источников загрязнения в тропосферном столбе атмосферы, в том числе для оценки мощности источника загрязнений, а также составления различных рейтингов городов России по степени загрязнения атмосферы.

Выделение стационарных источников выбросов NO_2. Для оценки мощности источника загрязнения атмосферы, на первом шаге возникает задача в выборе правильных границ и центра источника для расчета различных статистических показателей. Для выделения непосредственно самих источников и их центров был применен пороговый подход с использованием продукта многолетнего композитного изображения с концентрацией диоксида азота в безветренные дни. Суть похода заключалась в использовании определенного значения концентрации – порогового значения, при котором на композитном изображении выделялись кластеры пикселей, значения которых превышало данных порог. При этом, учитывая разную мощность источников и соответственно интенсивность выбросов, для выявления всех возможных источников загрязнений был применен итеративный подход, когда сначала выделялись наиболее крупные источники загрязнений, после чего порог снижался, а области, выявленные на первом этапе, исключались из рассмотрения. Такой подход позволил выявить все возможные уникальные источники загрязнений (см. рис. 1). Центром источника при этом считался пиксель с максимальным значением концентрации. В результате анализа выделенных областей были выявлены источники выбросов NO_2, которые легко разделяются на несколько типов: города-миллионники и крупные города, где основным источником выбросов является автотранспорт и теплоэнергетика; промышленные города с предприятиями металлургической и нефтехимической промышленности; угольные разрезы; города и рабочие посёлки при ГРЭС и цементных заводах [6].

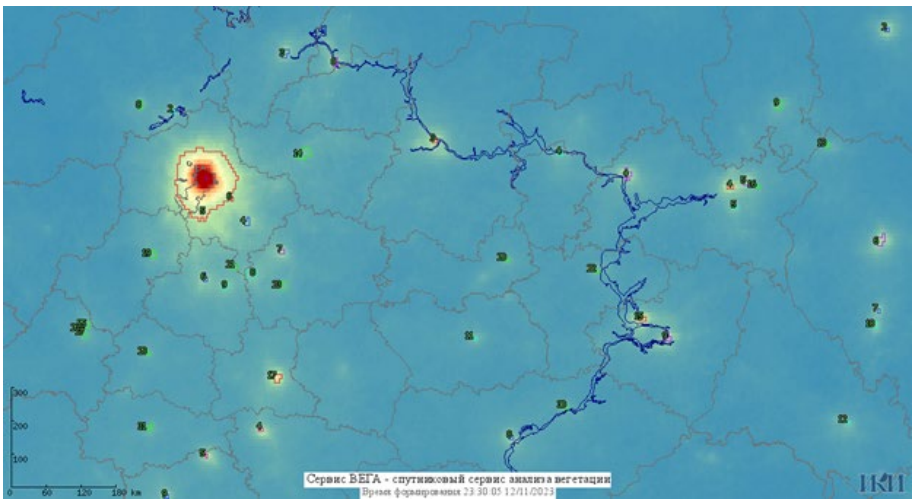


Рис. 1. Карта источников выбросов NO_2, выделенных разными порогами: от 90 до 30 мкмоль/м^2, с шагом 10 мкмоль

Восстановление мощности источника по данным TROPOMI совместно со скоростью ветра. При анализе пространственного распределения средних концентраций NO_2 на композитных изображениях, рассчитанных для различных диапазонов скорости ветра, установлено, что при оценке мощности источника выбросов в фиксированных границах в дни с сильным ветром часть эмиссии оказывается недоучтенной, поскольку загрязняющие вещества распространяются на значительно большие территории вокруг источника. В связи с этим для корректного определения мощности источников и их количественного ранжирования при использовании стационарных границ необходимо введение поправочного коэффициента, учитывающего скорость ветра. Для расчета данного коэффициента были построены зависимости суммарных выбросов диоксида азота от скорости ветра для каждого изучаемого источника, а также определен характер уменьшения величины выбросов с ростом скорости ветра. С учетом полученных зависимостей были восстановлены значения ежедневных выбросов от каждого источника, агрегированные далее на месячные и годовые интервалы, что позволило составить рейтинги крупных городов России по уровню загрязнению атмосферы.

Заключение. В работе представлен метод оценки выбросов диоксида азота от крупных антропогенных источников на основе информационных продуктов *TROPOMI*, доступных в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Применение итеративного порогового подхода позволило выделить стационарные источники выбросов. Найденные поправочные коэффициенты, учитывающие скорость ветра, позволили восстановить мощность исследуемых источников.

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [2], поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» Министерства науки и высшего образования РФ (госрегистрация № 122042500031-8), и при поддержке темы «Эмиссия» (госрегистрация № 122101700045-7).

Список источников

1. Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency. https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8 Gonzales H. B., Kuenzi J. J. Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education: A Primer // CRS Report for Congress – 2012. URL: https://fas.org/sgp/crs/misc/R42642.pdf.

2. 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. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

3. Бриль А. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Бурцев М. А. Возможности работы ЦКП «ИКИ Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.

4. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. №. 1. P. 77. DOI: doi.org/10.3390/rs14010077.

5. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

6. Константинова А. М., Бриль А. А., Лупян Е. А., Кашницкий А. В., Саворский В. П. Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа концентраций диоксида азота в атмосфере крупных источников загрязнений // Вычислительные технологии. 2024. Т. 29. № 3. С. 92–102. DOI: 10.25743/ICT.2024.29.3.008.

A. M. Konstantinova[1], A. A. Bril[2], E. A. Loupian[3]
[1, 2, 3]Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
[1]konstantinova@d902.iki.rssi.ru

RECOVERY OF NITROGEN DIOXIDE SOURCE POWER CONSIDERING METEOROLOGICAL CONDITIONS

Abstract. The paper evaluates nitrogen dioxide (NO_2) emissions from major stationary anthropogenic sources using TROPOMI (Sentinel-5P) satellite data archived at the IKI-Monitoring Center. Threshold and iterative analysis methods were applied to identify emission sources and to estimate their strength, taking into account the influence of wind speed. The obtained results make it possible to classify pollution sources and compile rankings of Russian cities by NO_2 emission levels, thus enabling effective air quality monitoring.

Keywords: nitrogen dioxide, air pollution, TROPOMI, minor gaseous components, satellite monitoring

УДК 528.8

А. С. Кузнецова[1], М. Г. Ерунова[2], О. Э. Якубайлик[3]
[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[3] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
[1]anna.simakina.97@mail.ru, [2]marina@icm.krasn.ru, [3]oleg@icm.krasn.ru

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ХОЗЯЙСТВА «КУРАГИНСКОЕ» НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ

Аннотация. Представлены результаты оценки состояния пахотных земель опытно-производственного хозяйства (ОПХ) «Курагинское». На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) *FABDEM*, спутниковых снимков *Sentinel-2a* и почвенных данных проведена классификация сельхозугодий по показателям продуктивности и эрозионной опасности. Методом аналитической иерархии (АНР) определены весовые коэффициенты ключевых факторов с учетом особенностей землепользования: крутизна склонов (38 %), *TWI* (27 %), тип почвы (14 %), формы рельефа (12 %) и *NDVI* (9 %). Результаты оценки показали, что 52 % обследованных площадей относятся к высокопродуктивным землям, тогда как 13 % требуют противоэрозионных мер.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, сельское хозяйство, ГИС, рельеф, почвы, водная эрозия

Оценка состояния сельскохозяйственных земель представляет собой процесс, направленный на определение их качества, продуктивности и устойчивости. Она включает анализ различных факторов, влияющих на урожайность и потенциал земель, таких как плодородие почв, климатические условия, рельеф местности, наличие инфраструктуры и др. [1].

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационные технологии предоставляют широкие возможности для решения этой задачи. На основе данных ДЗЗ подготавливаются геопространственные данные о землепользовании с высоким и средним пространственным разрешением [2]. Современные геоинформационные системы (ГИС), в свою очередь, позволяют интегрировать разнородные геопространственные данные и приводить их к единым параметрам. Это способствует проведению детальной классификации сельскохозяйственных земель с учетом особенностей отдельных землепользований.

Цель данной работы заключается в оценке состояния пахотных земель опытно-производственного хозяйства (ОПХ) «Курагинское» с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий.

В качестве объекта исследования выбрано ОПХ «Курагинское» – филиал ФГБУ ФИЦ КНЦ СО РАН. Территория хозяйства расположена в юго-

© Кузнецова А. С., Ерунова М. Г., Якубайлик О. Э., 2025

западной части Курагинского района Красноярского края. Общая площадь хозяйства составляет 14 374 га, из которых 6 342 га приходится на пашни.

К ключевым особенностям пахотных земель хозяйства относятся: продуктивные почвы (черноземы выщелоченные составляют 89 % от общей площади пашни), наличие участков с крутизной склонов более 5° (11 % от общей площади пашни) и проявления водной эрозии почвенного покрова.

Для классификации пахотных земель, с учетом их особенностей выбраны следующие факторы:

– крутизна склона – ключевой фактор, напрямую влияющий на риск возникновения водной эрозии почвенного покрова;

– топографический индекс влажности (*Topographic Wetness Index*, *TWI*) – помогает оценить зоны аккумуляции воды [3], что важно для прогнозирования эрозии и переувлажнения;

– тип почвы – определяет устойчивость к эрозии, водопроницаемость и продуктивность;

– форма рельефа – дает комплексное представление о сельскохозяйственном потенциале территории [4];

– нормализованный относительный индекс растительности ((*Normalized Difference Vegetation Index*, *NDVI*) – характеризует состояние растительного покрова [5].

В качестве исходных данных для вычисления выбранных факторов использовались: цифровая модель рельефа (ЦМР) *FABDEM* [6]; безоблачные спутниковые снимки *Sentinel-2a* за вегетационный период 2024 г. [7]; цифровые карты из геопространственной базы данных ОПХ «Курагинское» [8], содержащие информацию о расположение полей землепользования и типах почв.

Факторы «крутизна склона», *TWI* и «форма рельефа» были подготовлены на основе ЦМР *FABDEM* в *SAGA GIS* с использованием инструментов *Basic terrain analysis* и *TPI Based Landform Classification*. Для снимков *Sentinel-2a* выполнены атмосферная коррекция и расчет среднего значения индекса *NDVI* за вегетационный период 2024 г.

Полученные факторы в ГИС *QGIS* приведены к единым требованиям: растровые слои с пространственным разрешением 10 м в системе координат *UTM zone* 46*N*. Растровые слои были переклассифицированы по общей шкале измерений от 0 (очень низкий показатель) до 1 (очень высокий показатель). После переклассификации факторов была применена модель аналитического иерархического процесса (*Analytic Hierarchy Process*, *AHP*) для определения весовых коэффициентов: крутизна склона – 38 %, *TWI* – 27 %, тип почвы – 14 %, форма рельефа – 12 % и индекс *NDVI* – 9 %.

В результате получена цифровая карта пахотных земель ОПХ «Курагинское» по показателям продуктивности и эрозионной опасности, созданная путем наложения пяти растровых слоев с их относительными весами (рис. 1). На карте выделено три класса, характеризующих потенциал использования пахотных земель в сельском хозяйстве:

– первый класс (диапазон от 0 до 0,6) – ограниченно пригодные земли с высоким риском возникновения эрозии;

– второй класс (диапазон от 0,6 до 0,8) – умеренно продуктивные земли со средним риском возникновения эрозии;

– третий класс (диапазон от 0,8 до 1,0) – высокопродуктивные земли с низким риском возникновения эрозии.

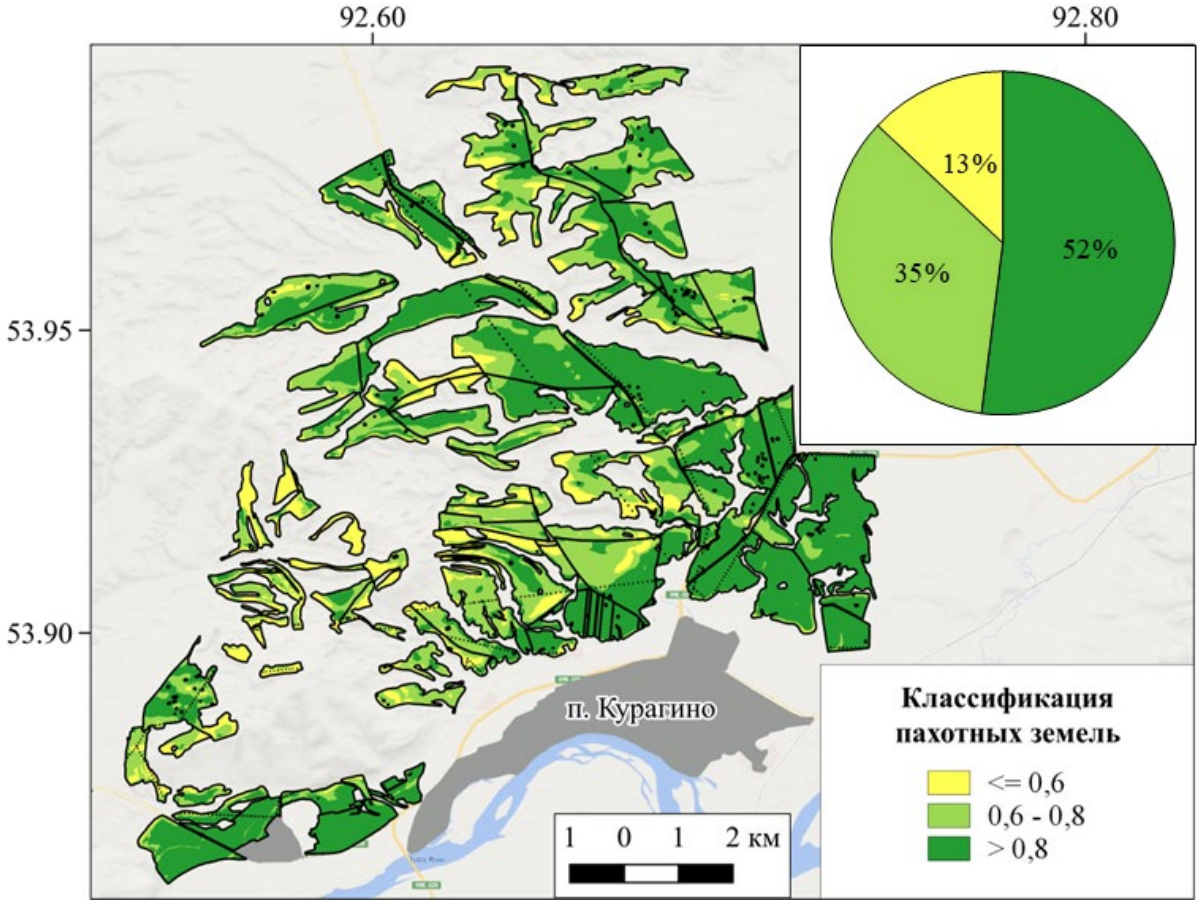


Рис. 1. Цифровая карта пахотных земель ОПХ «Курагинское» по показателям продуктивности и эрозионной опасности

Полученные результаты показали, что в пределах пахотных земель ОПХ «Курагинское» 52 % от общей площади относятся к высокопродуктивным землям с низким риском возникновения водной эрозии. Ограниченно пригодные земли с высоким риском эрозии занимают 13 % площади. Эти участки характеризуются: крутизной склонов более 5°; приподнятыми формами рельефа; менее продуктивными почвами (лугово-черноземными и темно-серыми лесными). На участки первого класса (диапазон от 0 до 0,6) следует обратить особое внимание при планировании технических операций, севооборотов и противоэрозионных мероприятий.

Разработанная методика оценки состояния пахотных земель ОПХ «Курагинское» на основе данных ДЗЗ и ГИС-технологий позволила провести их классификацию по показателям продуктивности и эрозионной опасности с учетом ключевых особенностей землепользования.

Список источников

1. Симаков А. В., Симакова Т. В. Оценка организации использования земель сельскохозяйственного назначения с применением статистического метода // International Agricultural Journal. 2024. Т. 67, № 2. С. 262–270. DOI: 10.55186/25876740_2024_8_2_19.

2. Ерунова М. Г., Кузнецова А. С., Шпедт А. А. и др. Геоморфометрический анализ сельскохозяйственных территорий на основе новой цифровой модели рельефа // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 4. С. 4–9. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_4_4.

3. Meles M. B., Younger S. E., Jackson C. R. et al. Wetness index based on landscape position and topography (WILT): modifying TWI to reflect landscape position // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 255. Article 109863. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109863.

4. Schmidt J., Hewitt A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position // Geoderma. 2004. Vol. 121. No. 3–4. P. 243–256. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.10.008.

5. Jordan C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology, vol. 50, pp. 663–666, Jul. 1969.

6. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. Article 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

7. Gatti A., Bertolini A. Sentinel-2 products specification document, Thales Alenia Sp. 2018. P. 487.

8. Ерунова М. Г., Симакина А. С., Якубайлик О. Э. Создание базы данных для точного земледелия ОПХ «Курагинское» // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1(178). С. 13–20. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.

A. S. Kuznetsova[1], M. G. Erunova[2], O. E. Yakubailik[3]

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

[2] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

[3] Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

[1]anna.simakina.97@mail.ru, [2]marina@icm.krasn.ru, [3]oleg@icm.krasn.ru

ASSESSMENT OF THE STATE OF CROPLANDS OF THE KURGANSKOYE AGRICULTURAL EXPERIMENTAL PRODUCTION FACILITY BASED ON REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents the results of the assessment of the state of croplands of the Kuraginskoye agricultural experimental production facility (EPF). Based on the FABDEM digital relief Model (DEM), Sentinel-2a satellite imagery, and soil data, farmland was classified according to productivity and erosion hazard indicators. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method determined the weighting coefficients of key factors, taking into account the characteristics of land use: slope (38 %), TWI (27 %), soil type (14 %), landform (12 %) and NDVI (9 %). The assessment results showed that 52 % of the surveyed areas belong to highly productive lands, while 13 % require anti-erosion measures.

Keywords: remote sensing, agriculture, GIS, relief, soils, water erosion

УДК 528.854, 528.88

С. О. Лалетина
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
solaletina@edu.hse.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОСЕВОВ ОПИУМНОГО МАКА В АФГАНИСТАНЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматриваются возможности применения спутникового мониторинга посевов опиумного мака в горной провинции Бадахшан (Афганистан) на основе использования временной серии вегетационного индекса *NDVI*, рассчитанного по высокодетальным снимкам *PlanetScope* (3 м). На основе анализа временных рядов *NDVI* за период апрель – ноябрь 2022 г. выявлены ключевые различия спектрально-временных профилей мака и пшеницы, в частности, более низкие стартовые значения *NDVI* (0,62 против 0,76) в фенологическом цикле. Протестированы различные алгоритмы машинного обучения для классификации посевов и выявлены основные пространственные закономерности в выращивании культур. Наилучший результат показал метод опорных векторов. Полученные результаты имеют важное значение для разработки систем дистанционного мониторинга и оценки эффективности антинаркотических мер в регионе.

Ключевые слова: опиумный мак, наркосодержащие культуры, Горный Бадахшан, временные серии *NDVI*, тематическая классификация

Введение. Обнаружение и картирование посевов наркосодержащих культур играет ключевую роль в контроле их выращивания и предотвращении незаконного производства наркотиков. Использование методов дистанционного зондирования Земли имеет ряд преимуществ по сравнению с наземными наблюдениями, особенно в отношении мониторинга выращивания опиумного мака на территории Афганистана, где информация, полученная в ходе наземных наблюдений, скудна и зачастую отсутствует из-за низкого уровня безопасности, затрудняющего доступ к посевам [1].

В апреле 2022 г. в Афганистане был введен запрет на выращивание, производство, торговлю и использование любых наркотических веществ. На тот момент страна обеспечивала 80 % мирового производства опиума, и опиумная экономика составляла от 9 до 14 % ВВП [2]. Спустя два года посевы мака достигли рекордно низких уровней. Анализ спутниковых снимков показал снижение общей площади посевов с 22,6 тыс. га в 2023 г. до 7,4 тыс. га в 2024 г., что почти в 30 раз меньше, чем 211 тыс. га, выращенных в 2022 г. накануне запрета [3].

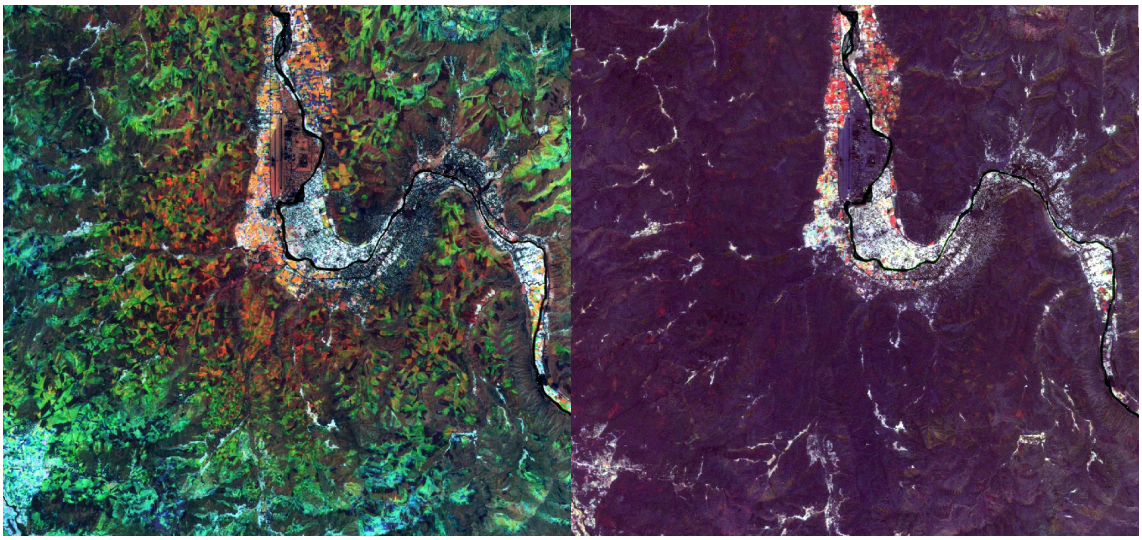
Существующие исследования дают различные оценки динамики сокращения посевных площадей по провинциям, однако однозначно отмечается смещение центра выращивания опиумного мака в Бадахшане, где эф-

© Лалетина С. О., 2025

фективность запретительных мер была существенно ниже из-за удаленности и изолированности провинции. В связи с чем в работе рассмотрено применение временных серий *NDVI*, рассчитанных по высокодетальным снимкам для выявления посевов опиумного мака на территории провинции Бадахшан.

Материалы и методы. Территория исследования включала в себя окрестности города Файзабад, ограниченного полигоном размером 15×15 км. Исследование проводилось по снимкам *PlanetScope* с пространственным разрешением 3 м. Всего проанализировано 26 сцен за период апрель – ноябрь 2022 г., на основе которых произведен расчет вегетационного индекса *NDVI*. По индексным изображениям проводилось полу- и автоматизированное дешифрирование в программах *ArcGIS 10.5*, *MultiSpec* и *SAGA GIS 9.8.1*. Пространственный анализ и визуализация результатов проводились в программе *ArcGIS*.

Результаты и их обсуждение. Выделение основных фенологических циклов по мультивременным индексным композитам показало, что на территории преобладают озимые культуры (рис. 1, *а*), в числе которых культивируется и опиумный мак. Исключение составляют северные участки в долине реки Кокча, где практикуется выращивание яровых культур – кормовых или бахчевых (рис. 1, *б*). Существенный перепад высот (около 1 100 м) обуславливает заметные различия в сроках сельскохозяйственных циклов – различие между пиками вегетации озимых культур, выращиваемых в долине реки и в высокогорных районах, составляет до трех недель.



а *б*

Рис. 1. Мультивременной композит в синтезе 04.04 – 25.05 – 24.06.2022 (*а*) и мультивременной композит в синтезе 29.09 – 27.10 – 28.11.2022 (*б*)

Предварительно в *ArcGIS* была создана маска сельскохозяйственных угодий. Для этого к мультивременному индексному композиту была применена неконтролируемая классификация *ISODATA*, по результатам которой были выделены классы, соответствующие многолетним плодово-ягодным насаждениям, посевам озимых культур и землям под паром.

Дальнейшая обработка данных осуществлялось в два этапа: сначала в программах *ArcGIS Pro* и *MultiSpec* проводилось эталонирование и анализ разделимости выборок по спектральным классам, после чего в *SAGA GIS* проводилась классификация с использованием трех алгоритмов машинного обучения – искусственной нейронной сети (*ANN*), случайного леса (*RF*) и метода опорных векторов (*SVM*), точность последнего была наивысшей. По результатам классификации отмечено преобладание посевов пшеницы в долине реки Кокча и преобладание мака на прилегающих поверхностях междуречья.

По временным сериям *NDVI* выявлено сходство в динамике значений индекса для пшеницы и мака. Наибольшие различия характерны для начальной стадии вегетации, когда значения *NDVI* пшеницы (0,76) существенно превышают показатели мака (0,62). Фенологический сдвиг проявляется в более позднем (на две недели) начале сбора опиума по сравнению с уборкой пшеницы. В послеуборочный период значения *NDVI* пшеницы снижаются быстрее, чем мака.

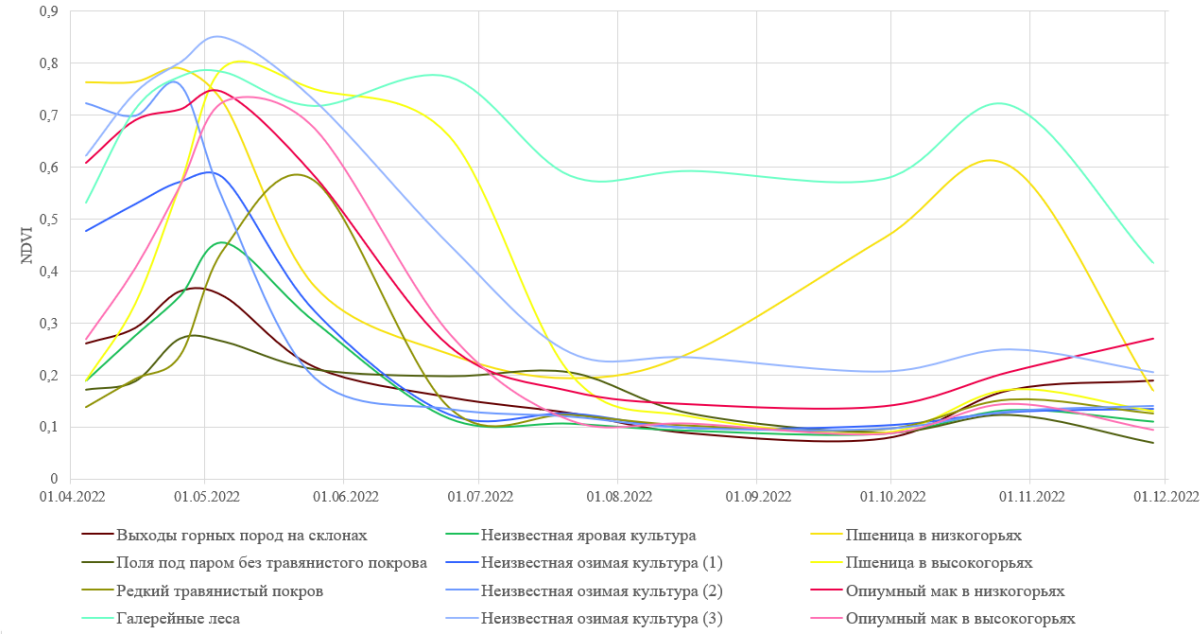


Рис. 2. Кривые *NDVI*, иллюстрирующие основные фенологические циклы (составлено автором)

Сравнение спектрально-временных характеристик посевов пшеницы и опиумного мака, полученных с тестовых участков в районе Аргу (юго-западная часть территории исследования), показало существование различий (рис. 3). В начале вегетационного периода опиумный мак имеет большую отражательную способность, чем пшеница, во всех диапазонах *NIR*. В мае этот разрыв увеличивается. В июне отражательная способность мака в *NIR* повышается, а пшеницы снижается, в результате чего на некоторое время мак характеризуется большей отражательной способностью во всех диапазонах. В июле, на стадии увядания, их профили становятся практически идентичны.

Полученные данные согласуются с результатами исследований, проведенных на тестовых участках в провинции Гильменд [4]. Однако демонстрируется заметный временной сдвиг в сроках фенологических циклов между провинциями (около полутора месяцев), обусловленный различиями в широтном и высотном положении Бадахшана и Гильменда.

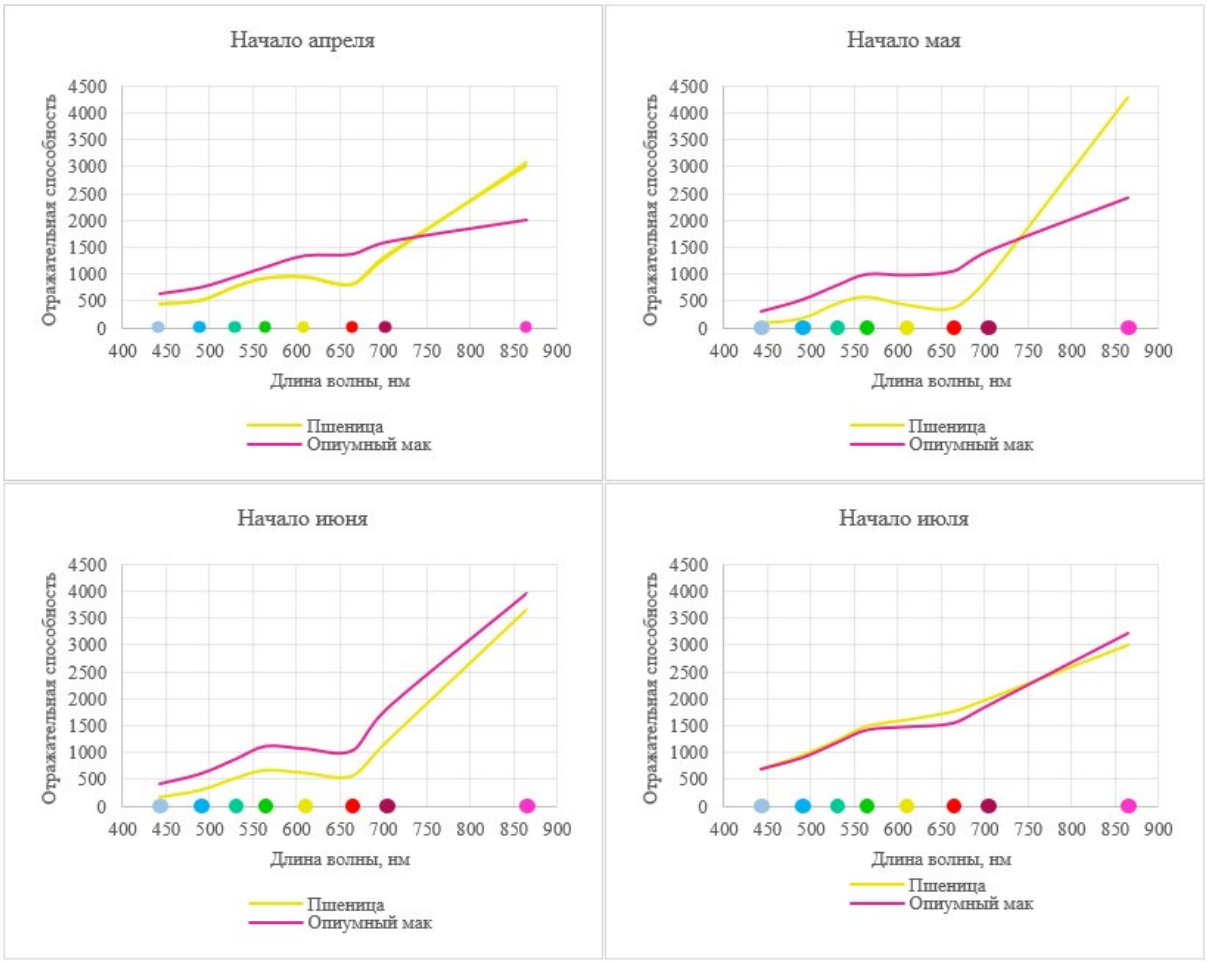


Рис. 3. Спектральные профили опиумного мака и пшеницы для территории Аргу; точками обозначены каналы спутника – *Coastal Blue*, *Blue*, *Green I*, *Green*, *Yellow*, *Red*, *Red Edge*, *NIR* (составлено автором)

Заключение. Результаты исследования показали перспективы использования разновременных высокодетальных снимков для выявления посевов опиумного мака. Применение алгоритмов машинного обучения (особенно *SVM*) продемонстрировало высокую точность классификации. Анализ временных серий *NDVI* и спектрально-временных характеристик озимых культур позволил разработать методику дифференциации мака от пшеницы, доминирующей культуры в районе. Полученные результаты имеют существенное практическое значение для организации системы мониторинга посевов мака в отдаленных и труднодоступных регионах, объективной оценки эффективности запретительных мер и прогнозирования пространственного перераспределения посевов мака.

Список источников

1. Simms D. M., Waine T. W., Taylor J. C., Juniper G. R. The application of time-series MODIS NDVI profiles for the acquisition of crop information across Afghanistan // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, no. 16. P. 6234–6254. DOI: 10.1080/01431161.2014.951099.

2. Afghanistan Drug Insights Volume 2: 2024 Opium Production and Rural Development. Vienna: UNODC, 2024. 36 p. URL: https://www.unodc.org/documents/crop-monitoring/Afghanistan/Afghanistan_Drug_Insights_V2.pdf.

3. Mansfield D. Sowing the Seeds of Division in Badakhshan // ALCIS. 2024. URL: https://www.alcis.org/post/taliban-poppy-ban-year-2.

4. Bennington A. L. Application of multi-spectral remote sensing for crop discrimination in Afghanistan. 2008. 145 p.

S. O. Laletina
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
solaletina@edu.hse.ru

IDENTIFYING OPIUM POPPY CULTIVATION IN AFGHANISTAN USING HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

Abstract. The paper discusses the possibilities of satellites-based monitoring of opium poppy crops in the mountainous province of Badakhshan (Afghanistan) based on the use of NDVI vegetation index time series calculated from highly detailed PlanetScope images (3 m). Based on NDVI time series analysis for the period April-November 2022, key differences in the spectral-temporal profiles of poppy and wheat were identified, in particular, lower NDVI starting values (0.62 vs. 0.76) in the phenological cycle. Different machine learning algorithms for crop classification were tested and the main spatial patterns of crops were identified. The support vector method showed the best result. The results obtained are important for developing remote monitoring systems and assessing the effectiveness of anti-drug measures in the region.

Keywords: opium poppy, drug crops, Gorno Badakhshan, NDVI time series, crop classification

УДК 528.8

О. Р. Малюта
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
ormalyuta@edu.hse.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКВЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрена пространственно-временная динамика поверхностного городского острова тепла (ПГОТ) Москвы на основе частично автоматизированного алгоритма обработки данных дистанционного зондирования спутников *Landsat.* Рассмотрена динамика поверхностных температур и площади ПГОТ в период с 1984 по 2024 г. Выполнена верификация результатов с использованием данных реанализа *CRU TS*. Представлен прогноз потенциальных изменений ПГОТ для Новой Москвы для сценария реализации официальных градостроительных документов. Полученные результаты могут быть применены в городском планировании для снижения негативного воздействия тепловой нагрузки.

Ключевые слова: городской остров тепла, Москва, дистанционное зондирование, *Landsat*, поверхностная температура, локальные климатические зоны

Введение. Городской остров тепла (ГОТ/UHI) представляет собой разницу температур в городе и за городом и наносит ущерб здоровью населения мегаполисов, а также увеличивает потребление электричества в летний период. Москва, крупнейший город России, испытала быструю урбанизацию в последние десятилетия, однако долговременная динамика ее поверхностного острова тепла (ПГОТ) остается слабоизученной. Мы предлагаем алгоритм, основанный на данных среднего разрешения для реконструкции изменений ПГОТ летнего периода за последних 40 лет, изучения его связи с локальными климатическими зонами (ЛКЗ) и изменением земельного покрова, а также представляем первый прогноз потенциального расширения ПГОТ на территории Новой Москвы на основе существующих карт функциональных зон.

$$UHI = T_u - T_r. \quad (1)$$

Методика исследования. 125 отфильтрованных по облачности летних (для фиксации сезона максимального распространения ПГОТ [1]) снимков *Landsat-5 TM* и *Landsat-8 TIRS* (июнь – август 1984–2024) были обработаны в *Google Earth Engine*. Температуры поверхности (*Land Surface Temperature*, *LST*) были получены с помощью алгоритма *single-channel* [2; 3], атмосферная коррекция выполнена с привлечением данных о содержании водяного пара *MERRA*-2. Усредненные внутри года композиты были

© Малюта О. Р., 2025

нормализованы на *LST* сельской местности согласно формуле (1) для вычисления ПГОТ в летний период (>2° с учетом погрешности алгоритма) и усреднены по восьми 5-летним промежуткам. Восемь классов ЛКЗ были выделены на основе высокодетальных изображений и изображений ПГОТ для дальнейшего анализа на уровне районов. Линейные тренды ПГОТ были вычислены методом наименьших квадратов и провалидированы с привлечением данных реанализа температур воздуха *CRU TS*. Для прогнозирования дальнейшего расширения ПГОТ в 10-летней перспективе использованы две официальные карты функционального зонирования: утвержденный план для «старой» Москвы до 2025 г. и план для Новой Москвы до 2035 г. Их легенды были приведены к общей схеме классификации, после чего зональные метрики ПГОТ (медиана и стандартное отклонение), полученные для зон 2025 г., были перенесены на соответствующие зоны Новой Москвы. Алгоритм обработки, включая код *Google Earth Engine* для обработки спутниковых снимков *Landsat-5*, *-8* и вычисления ПГОТ и код *Python*, реализованный для анализа результатов, открыт нами для использования в аналогичных исследованиях [4].

Результаты и обсуждение. По результатам валидации *LST* по данным реанализа *CRU TS* коэффициент корреляции Пирсона составил 0,535, а уравнения трендов описывались следующим образом:

температуры воздуха *CRU TS*: $0,04117x - 64,39$;
вычисленные *LST*: $0,04038x - 56,2$,

что позволяет говорить о репрезентативности вычисленных данных для дальнейшего анализа ПГОТ. Согласно коэффициентам регрессии, территория Москвы и ее окрестностей за 1984–2024 гг. нагревалась в среднем на 0,04/год.

В период между 1984 и 2024 гг. площадь ПГОТ>2° в пределах Центральной кольцевой автодороги увеличилась на 26 % (или более чем на 1 000 км^2). Самое быстрое расширение произошло в Новой Москве (+125 %, или 187 км^2) в связи с замещением плотной жилой застройкой лесов и полей. В соответствии с ЛКЗ, актуальными для Москвы, в период исследования *LST* увеличивалась на 0,19/год для территорий новой застройки, на 0,13/год для сформированных промзон и на 0,1/год в районах центра. Детрендирование данных подтвердило увеличение количества положительных температурных аномалий в упомянутых типах ЛКЗ, в то время как крупные парки и территории редевелопмента промышленных зон (таких как ЗИЛ) показали слабый и часто статистический незначимый положительный тренд (0,04–0,06/год), что говорит об эффективности озеленения и деиндустриализации для минимизации эффекта ПГОТ. Анализ ЛКЗ подтверждает, что «степень застроенности» тесно связана с поверхностными температурами (Коэффициент корреляции Пирсона = 0,68 между индексом застройки *built-up index* и *LST*). Сценарий землепользования, полученный на основе карты функциональных зон 2035 г., предполагает дальнейшее расширение

ПГОТ на юго-запад вдоль Калужского, Киевского, Филатовского, Филимонковского шоссе и ш. Ракитки, а также вдоль прилежащих улиц. Интеграция зеленых зон в формируемые кластеры жилой застройки представляется актуальной задачей для сдерживания расширения ПГОТ.

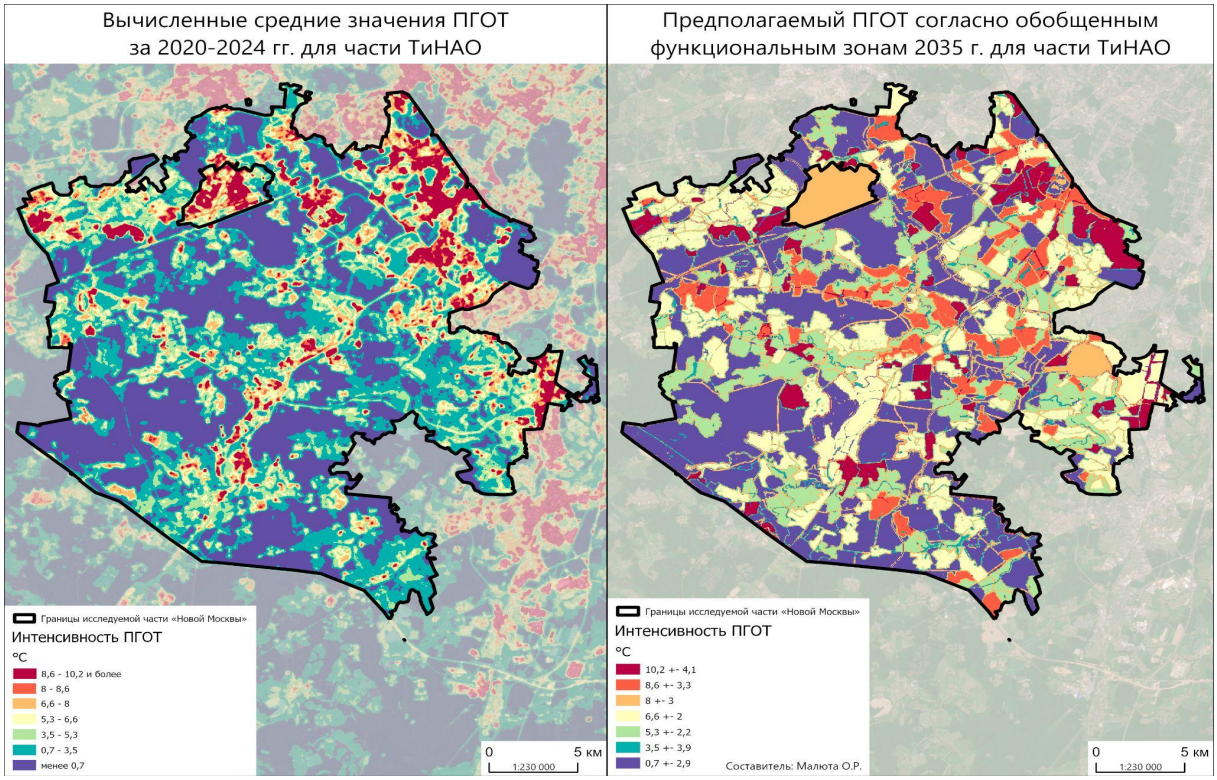


Рис. 1. Современный (2020–2024) и прогнозируемый (2035) ПГОТ для части Новой Москвы

Заключение. В проведенном исследовании впервые представлена последовательная 40-летняя хронология изменчивости ПГОТ Москвы на внутригородском уровне и показана ее связь с городским планированием. Открытый алгоритм с использованием временных серий *Landsat MERRA*-2 может быть использован для любых других расширяющихся городов и обоснования адаптационных стратегий.

Список источников

1. Локощенко М. А., Енукова Е. А., Алексеева Л. И. О современных изменениях «острова тепла» Москвы //Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 243–253.

2. Jimenez-Munoz J. C. et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2008. Vol. 47. № 1. P. 339–349.

3. Jimenez-Munoz J. C. et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data // IEEE Geoscience and remote sensing letters. 2014. Vol. 11. № 10. P. 1840–1843.

4. Малюта О. Р. Репозиторий программного кода для исследования городского острова тепла Москвы по данным Landsat. 2025. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.15583573 (дата обращения: 29.06.2025). DOI: 10.5281/zenodo.15583573.

O. R. Malyuta
Higher School of Economics, Moscow, Russia
ormalyuta@edu.hse.ru

MODELLING THE STRUCTURE AND TEMPORAL DYNAMICS OF THE MOSCOW SURFACE URBAN HEAT ISLAND USING MEDIUM-RESOLUTION SATELLITE DATA

Abstract. The paper considers spatiotemporal dynamics of the Moscow surface heat island using implemented partially automated algorithm of Landsat 5, 8 remote sensing data processing. The dynamics of surface temperatures and the SUHI area between 1984 and 2024 is investigated. Verification of the results using CRU TS reanalysis data is performed. A forecast of hypothetical changes in the SUHI for New Moscow using official urban planning documents is presented. The obtained results can be applied in urban planning and city planning to reduce the negative impact of heat load.

Keywords: urban heat island, Moscow, remote sensing, Landsat, land surface temperature, local climate zones

УДК 528.94

Т. А. Мыльникова[1], В. В. Елсаков[2]
[1, 2]Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия
[1]mylnikova.t.a@ib.komisc.ru, [2]elsakov@ib.komisc.ru

ТРАНСФОРМАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СРЕДНЕЙ ТАЙГИ В БАССЕЙНАХ РЕК ПЕЧОРЫ И ВЫЧЕГДЫ

Аннотация. Рассматривается методика и результаты классификации растительного покрова бассейнов рек Печоры и Вычегды методом *Random Forest* на основании медианных композитов *Landsat* (сенсоры *ETM* и *OLI*) для оценки динамики. Сравнение тематических карт за разные временные срезы (2000 и 2023 гг.) выявили значительную трансформацию лесных экосистем: сокращение темнохвойных (на 21,9 %) и светлохвойных (19,3 %) лесов при одновременном росте лиственных насаждений (+40 %). Отмечено резкое увеличение нарушенных территорий и урбанизированных земель. Стабильность сохранили болотные и водные экосистемы (±1–2 %). Полученные данные свидетельствуют о глубоких изменениях структуры растительного покрова, требующих дальнейшего изучения влияния климатических и антропогенных факторов. Результаты значимы для разработки стратегий устойчивого лесопользования и сохранения биоразнообразия в бореальных регионах.

Ключевые слова: *Landsat*, динамика растительного покрова, бореальные леса, *Random Forest*

Введение. Наиболее оперативным и чувствительным индикатором трансформаций геосистем является растительный покров, поскольку он отражает интегральное воздействие климата и антропогенной деятельности. В частности, лесной покров, занимающий 31 % поверхности планеты [1] и более 49 % площади земель России [2], характеризует важные показатели экологического, промышленного и экономического потенциала территории. Многолетние исследования показывают, что наиболее значимыми факторами воздействия на бореальные леса являются пожары [3] и вырубки [4], в отдельных регионах ветровалы [5], вспышки размножения насекомых [6] и т. д. В отличие от стационарных исследований, возможности и потенциал развития методов дистанционного зондирования, нарастающий уровень открытости спутниковых данных, усовершенствование алгоритмов обработки облачных платформ позволяют оперативно оценить современное состояние и динамику растительного покрова на большие территории более корректно [2].

Цель исследования – оценить динамику растительного покрова в границах бассейнов рек Печоры и Вычегды с 2001 по 2023 г.

Материалы и методы. Бассейны рек Печоры и Вычегды суммарно занимают площадь около 200 тыс. км^2, для покрытия которой требуется большое количество безоблачных сцен. Ввиду этого, для картографирова-

© Мыльникова Т. А., Елсаков В. В., 2025

ния исследуемой территории на платформе *Google Earth Engine* был сгенерирован медианный композит из сцен спутников *Landsat* за вегетационный период 2000 г. (*ETM*) и 2023 г. (*OLI*). Подобная фильтрация позволяет вычислить медиану всех значений в каждом пикселе по стеку совпадающих полос и отбросить слишком высокие или низкие значения, связанные со скачками отражательной способности растений в разные периоды вегетации, а также облаками или их тенями.

Для классификации изображений для каждого класса растительного покрова были отобраны 30 обучающих полигонов на основании комбинации каналов *SWIR*2-*NIR*-*GREEN*, а также готовые тематические продукты *Global Forest Change и Eastern'Europe Forest Cover Change*, которые содержат данные об изменениях лесного покрова за период с 1986 по 2023 г. Таким образом удалось выделить 22 класса: темнохвойный лес, светлохвойный лес, лиственный лес, смешанный лес, смешанный с преобладанием темнохвойных лес, смешанный с преобладанием лиственных лес, вырубки 1986–1988 гг., вырубки 1989–2000 гг., вырубки 2001–2010 гг., вырубки 2011–2020 гг., вырубки 2021–2023 гг., пожары 1986–1988 гг., пожары 1989–2000 гг., пожары 2001–2010 гг., пожары 2011–2020 гг., пожары 2021–2023 гг., водные объекты, болото, урбанизированные территории, луга, горная тундра, открытый грунт/горные породы и тени горных пород.

Постобработка изображений позволила выявить сигнатуры классов и объединить некоторые из них (рис. 1).

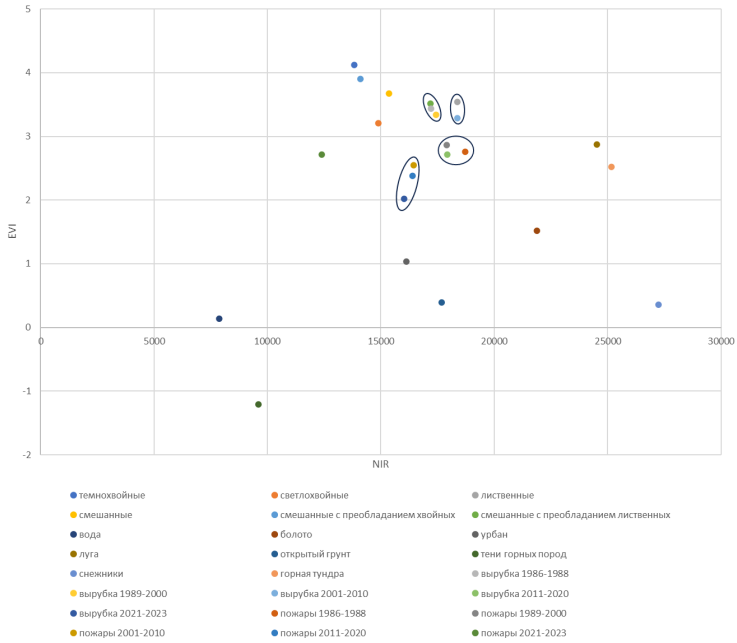


Рис. 1. Медианы выделенных классов

На основании новых данных композиты были классифицированы методом *Random Forest*. В качестве предикторов выступили каналы *RED*, *NIR*, *SWIR*1, *SWIR*2, а также вегетационные индексы *NDVI*, *NDWI* и *EVI*. Итогом обработки являются тематические карты растительного покрова бассейнов

рек Печоры и Вычегды за 2000 и 2023 гг., которые позволяют перейти к площадной оценке трансформаций (табл. 1).

Таблица 1

Площадная структура изменений территории
по результатам классификации

№	Класс	Площадь, км²		Потери/прирост относительно 2000 г., %
		2000 г.	2023 г.	
1	Темнохвойный лес	22 499,23	17 581,03	–21,8594
2	Светлохвойный лес	18 051,63	14 559,46	–19,3455
3	Лиственный лес	17 123,46	23 963,51	39,94549
4	Смешанный лес	68 823,18	48 654,23	–29,3055
5	Смешанный лес с преобладанием хвойных пород	19 512,06	14 126,38	–27,6018
6	Смешанный лес с преобладанием лиственных пород	18 460,1	23 589,67	27,78734
7	Горная тундра	19 780,03	19 203,91	–2,91263
8	Луга	11 725,95	10 066,49	–14,152
9	Водные объекты	551,0664	554,07	0,545052
10	Болото	18 125,36	18 560,9	2,402932
11	Урбанизированные территории	1 617,317	3 144,36	94,41829
12	Тени горных пород	32,47468	36,605	12,71859
13	Открытый грунт/ горные породы	626,3409	621,74	–0,73457
14	Участки трансформаций	8 998,051	19 452,11	116,1814
15	Свежие гари	17 615,22	29 187,36	65,69399
Итого:		243 541,47	243 301,825	

Результаты. За анализируемый период произошли существенные изменения в структуре растительного покрова. Темнохвойные массивы уменьшились на 4 918 км², что составляет 21,9 % от их первоначальной площади, а светлохвойные – на 3 492 км² (19,3 %). Особенно сильно пострадали смешанные леса с преобладанием хвойных пород, потерявшие 27,6 % своей территории.

Параллельно с этим наблюдается активное распространение лиственных лесов. Их площадь увеличилась на 6 840 км². Смешанные леса с преобладанием лиственных пород также значительно расширились, прибавив 5 130 км². Также наблюдается резкое увеличение нарушенных территорий. Урбанизированные земли расширились в два раза, что свидетельствует об интенсивном развитии инфраструктуры. При этом болотные экосистемы и водные объекты остались относительно стабильными.

Для понимания причин наблюдаемых процессов и разработки мер по сохранению природных комплексов требуется дополнительное исследование с привлечением данных о климатических изменениях, пожарной активности и хозяйственной деятельности в регионе.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках реализуемого на базе НИУ «Высшая школа экономики» проекта № 24-68-00055 «Из прошлого в будущее: сельские сообщества в условиях постаграрного вектора трансформаций».

Список источников

1. Состояние лесов мира – 2020. Леса, биоразнообразие, люди. FAO, UNEP, 2020. 228 с. DOI:10.4060/ca8642ru.

2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016.

3. Hislop S., Haywood A., Jones S., Soto-Berelov M., Skidmore A., Nguyen TH. A satellite data driven approach to monitoring and reporting fire disturbance and recovery across boreal and temperate forests // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. № 87. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102034.

4. Владимиров И. Н. Антропогенная нарушенность и динамика геосистем Байкальской Сибири // Природа Внутренней Азии. 2018. № 1 (6). С. 19–30. DOI: 10.18101/2542-0623-2018-1-19-30.

5. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Semakina A. V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. № 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.

6. Алексеев А. С., Черниховский Д. М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Известия вузов. Лесной журнал. 2024. №. 2. С. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.

T. A. Mylnikova[1], V. V. Elsakov[2]
[1, 2]IB Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia
[1]mylnikova.t.a@ib.komisc.ru, [2]elsakov@ib.komisc.ru

TRANSFORMATION OF THE VEGETATION COVER OF THE MIDDLE TAIGA IN THE BASINS OF THE PECHORA AND VYCHEGDA RIVERS

Abstract. The study showed a decrease in coniferous forests (by 19–22 %) and an increase in deciduous forests (up to +40 %) in the Pechora and Vychegda basins in 2001–2023 based on the classification of Landsat satellite images using the Random Forest method. An increase in harems (> 65 %) and urbanized territories (2 times) has been found, indicating an intensive transformation of boreal ecosystems.

Keywords: Landsat, vegetation dynamics, boreal forests, Random Forest

УДК 504.064

Т. О. Перемитина[1], И. Г. Ященко[2]
[1, 2]Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
[1]peremitinat@mail.ru, [2]sric@ipc.tsc.ru.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ КРАПИВИНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА НЕФТИ

Аннотация. В октябре 2020 г. на Крапивинском нефтяном месторождении Томской области произошел крупный разлив нефти, вызвавший значительное загрязнение почвы и водных объектов. В работе проведен многолетний спутниковый мониторинг восстановительных процессов экосистемы с использованием индекса вегетации *EVI* на основе данных *MODIS* (2020–2024 гг.). Анализ динамики *EVI* показал снижение активности растительного покрова в начале вегетационного периода и устойчивый рост в середине и конце сезона, что свидетельствует о положительном влиянии рекультивационных мероприятий и естественного восстановления экосистемы.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, восстановление экосистем, нефтяное загрязнение, растительный покров, улучшенный вегетационный индекс (*EVI*)

Введение. В октябре 2020 г. на Крапивинском нефтяном месторождении Каргасокского района Томской области произошел крупный разлив нефти. Первоначально площадь загрязнения оценивалась примерно в 15 га, однако после проверки Росприроднадзором площадь пострадавшей территории была уточнена и составила 4,9 га, включая 0,27 га водной поверхности – ручья, являющегося правым притоком реки Большая Каирка. Также загрязнение могло распространиться на притоки реки Васюган, в частности реку Ягылъях. Этот инцидент стал крупнейшей экологической аварией региона в 2020 г. [1], вызвав значительное загрязнение почвы и водных объектов. По заключению Росприроднадзора, данный случай стал крупнейшим загрязнением окружающей среды в Томской области за 2020 г.

Основной целью данной работы являлась многолетняя оценка экологического состояния территории Крапивинского месторождения с использованием растительного покрова в качестве ключевого индикатора, поскольку он наиболее полно отражает воздействие различных факторов на окружающую среду. Для анализа динамики восстановления растительности применялись данные радиометра *MODIS* со спутника *Terra* [2], в частности 40 16-дневных композитов *MOD13Q*1 с пространственным разрешением 250 м, охватывающих вегетационные периоды с 25 мая по 20 сентября 2020–2024 гг.

© Перемитина Т. О., Ященко И. Г., 2025

Материалы и методы исследования. В работе использовался индекс вегетации *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) [3], оптимальный для мониторинга изменений растительного покрова благодаря сниженной чувствительности к почвенным и атмосферным воздействиям. Значения *EVI* варьируются от –1 до 1, что позволяет эффективно сопоставлять спутниковые данные с реальным состоянием растительности [4]. С помощью ГИС *ArcGIS 10.8* был выполнен расчет средних значений индекса *EVI* по территории Крапивинского месторождения с применением инструмента «зональная статистика» [5] на основе наложения векторных полигонов на спутниковые снимки *MOD13Q1*.

Результаты и обсуждение. Средствами геоинформационной системы *ArcGis 10.8* для исследуемой территории Крапивинского месторождения выполнен расчет значений индекса *EVI* по спутниковым данным *MOD*13*Q*1 (2020–2024 гг.) [6]. Расчет проведен с применением инструмента «зональная статистика» путем наложения векторных моделей полигонов территорий углеводородных месторождений на разновременные спутниковые снимки *MOD*13*Q*1 с информацией об индексе *EVI*. На рис. 1 представлена динамика изменения средних значений индекса *EVI* за исследуемый период.

Проведено исследование динамики значений *EVI* за полные периоды вегетации с 25 мая (145-й композит) по 20 сентября (257-й композит) для всех исследуемых углеводородных месторождений в 2013–2022 гг. На рис. 1 представлена динамика изменения средних значений индекса *EVI* за 10-летний период.

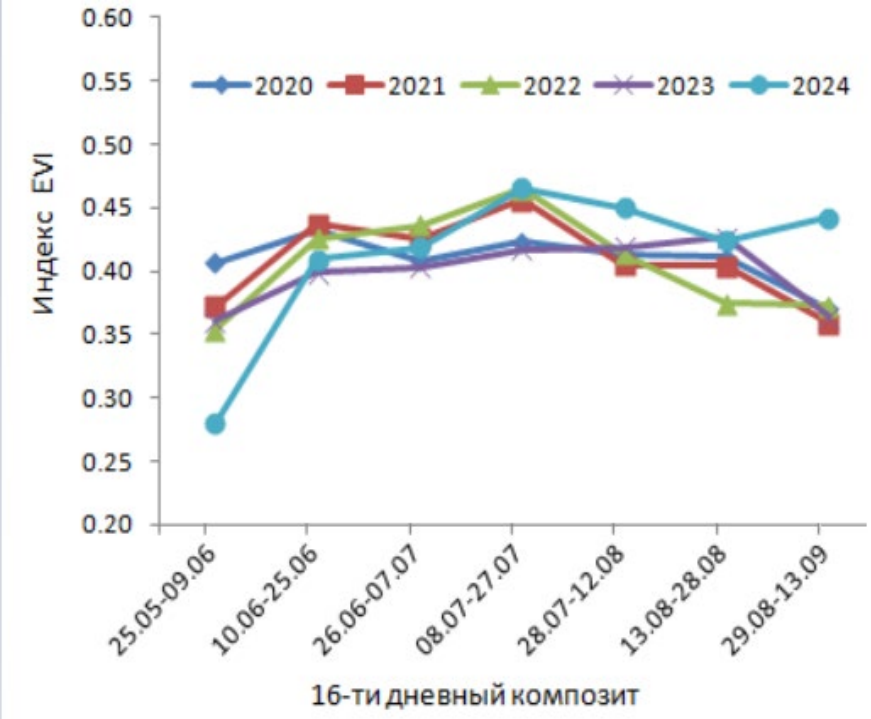


Рис. 1. Динамика изменения средних значений индекса *EVI* вегетационных периодов 2013–2022 гг.

В начале вегетационного периода (25.05–09.06) значения индекса *EVI* в 2020 г. составляли 0,4202, постепенно снижаясь к 2024 г. до 0,2934. Это свидетельствует о заметном уменьшении активности растительного покрова на старте вегетационного сезона за рассматриваемый период. В разгар вегетации (08.07–27.07) наблюдается наибольший рост *EVI*: в 2020 г. показатель составлял 0,4366, а к 2024 г. достиг максимального значения – 0,4794. Это может указывать на улучшение условий для роста растений в середине лета, несмотря на снижение показателей в начале сезона.

В конце вегетационного периода (29.08–13.09) индекс *EVI* также демонстрирует положительную динамику: если в 2020 г. значение составляло 0,3841, то в 2024 г. оно увеличилось до 0,4558. Средний прирост по этому периоду составил около 18,6 %, что свидетельствует о продлении периода активной вегетации и возможном улучшении состояния растительного покрова к завершению сезона.

Таким образом, анализируя динамику *EVI* за 2020–2024 гг., можно отметить, что несмотря на снижение показателей в начале вегетационного периода, в середине и конце сезона наблюдается устойчивый рост значений индекса. Это может быть связано с изменениями погодных условий, адаптацией растительных сообществ или влиянием антропогенных факторов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рекультивационные работы в сочетании с естественными процессами самовосстановления способствовали заметному улучшению состояния растительного покрова и восстановлению экосистемы на загрязненной территории, а также указывают на тенденции к удлинению вегетационного периода и повышению продуктивности растительного покрова на исследуемой территории Крапивинского месторождения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500048–1).

Список источников

1. Крупный разлив нефти произошел на месторождении в Каргасокском районе / РИА Томск. 21.10.2020. URL: https://www.riatomsk.ru/article/20201021/krupnij-razliv-nefti-proizoshel (дата обращения: 17.06.2025).

2. Официальный сайт радиометра MODIS: описание системы TERRA и сканера MODIS. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov (дата обращения: 17.06.2025).

3. Сидоров Д. В., Лебедева М. П. Анализ динамики вегетационных индексов NDVI и EVI для оценки экологического состояния территорий нефтедобычи // Экология и промышленность России. 2020. Т. 26, № 4. С. 58–65.

4. Петрова Н. А., Иванов С. В. Спутниковый мониторинг восстановления растительности с использованием индекса EVI на территории загрязнённой нефтью // Вестник геоинформационных систем. 2021. № 3. С. 45–52.

5. Перемитина Т. О., Ященко И. Г. Исследование динамики состояния растительного покрова углеводородных месторождений с использованием спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 9–18.

6. MODIS: MOD13Q1. URL: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/6/MOD13Q1 (дата обращения: 17.06.2025).

T. O. Peremitina[1], I. G. Yashchenko[2]
[1, 2] Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk, Russia
[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia
[1]pto@ipc.tsc.ru.ru, [2]sric@ipc.tsc.ru.ru

SATELLITE MONITORING OF ECOSYSTEM RECOVERY AT THE KRAPIVINSKOYE OIL FIELD AFTER AN EMERGENCY OIL SPILL

Abstract. In October 2020, a major oil spill occurred at the Krapivinskoye oil field in the Tomsk region, causing significant contamination of soil and water bodies. This study presents a multi-year satellite monitoring of the ecosystem recovery processes using the Enhanced Vegetation Index (EVI) derived from MODIS data for the period 2020–2024. Analysis of EVI dynamics revealed a decline in vegetation activity at the beginning of the growing season, followed by a steady increase in the middle and late stages, indicating the positive impact of reclamation measures and natural ecosystem restoration.

Keywords: satellite monitoring, ecosystem recovery, oil pollution, vegetation cover, enhanced vegetation index (EVI)

УДК 912.412

И. А. Полежайкин[1], М. И. Таранюк[2], Ю. П. Мыльников[3]
[1, 2, 3]АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия
[1]PolezhaykinIA@tomsknipi.ru, [2]TaranyukMI@tomsknipi.ru,
[3]MylnikovYP@tomsknipi.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ТЕРРИТОРИИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Аннотация. В работе представлен накопленный опыт работы управления экологии АО «ТомскНИПИнефть» в части применении геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли для решения задач экологического ландшафтного мониторинга на объектах нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: ландшафты, ландшафтный мониторинг, антропогенное воздействие, антропогенно-измененные ландшафты, дистанционное зондирование Земли

Введение. ХМАО-Югра является одним из крупнейших нефтедобывающих регионов России. Развитие нефте- и газодобычи приводит к росту интенсивности воздействия на окружающую среду, увеличению площадей антропогенных ландшафтов и нарушению естественных природно-территориальных комплексов и [1, 2].

Для контроля и оценки антропогенного воздействия, постановлением правительства ХМАО-Югры устанавливается необходимость проведения локального экологического мониторинга на территориях лицензионных участков нефтяных месторождений, одной из целей которого является выявление антропогенной нагрузки и мониторинг динамики площадей антропогенных изменений, а также отражение данных изменений на ландшафтных картах [3]. Периодичность проведения ландшафтного экологического мониторинга составляет 5 лет.

Наиболее перспективными методом выявления областей нарушенного антропогенной деятельностью ландшафта является дешифрирование крупномасштабных мультиспектральных космических снимков. Применение данного метода обеспечивает высокую точность определения участков интереса, при приемлемых финансовых затратах.

Цели и задачи работы. Целью работы является анализ динамики площадей антропогенно-измененных ландшафтов на территории лицензионных участков нефтяных месторождений ХМАО-ЮГРЫ за 5 лет и актуализация ландшафтных карт территории месторождений по материалам ДДЗ.

Для реализации поставленных целей, выделены следующие задачи: по материалам ДДЗ дешифрировать участки с антропогенно-измененными

© Полежайкин И. А., Таранюк М. И., Мыльников Ю. П., 2025

ландшафтами, провести сравнительный анализ полученных данных с результатами мониторинга за прошлый период, вычислить динамику площадей антропогенной нагрузки, актуализировать ландшафтные карты.

Подбор исходных данных. На данном этапе проведено формирование требований к исходным данным и технико-экономического обоснования различных вариантов получения ДДЗ. Снимки для экологического ландшафтного мониторинга должны давать возможность точно различать границы природных и антропогенных ПТК.

Для этих целей были определены следующие минимально необходимые технические требования к материалам ДДЗ: красный, зеленый, синий и ближний инфракрасный спектральные каналы, пространственное разрешение не меньше 6 м/пикс., уровень облачности не более 10 %, отклонение от надира 0–20°; радиометрическая и геометрическая коррекции, ортокоррекция, выполнение съемки в бесснежный период.

Были рассмотрены три пути получения исходных данных: открытые данные спутниковой съемки *Landsat*, *Sentinel*; мониторинг по данным крупномасштабной спутниковой съемки, мониторинг по материалам АФС с БПЛА.

Вариант проведения мониторинга по открытым ДДЗ сразу был отклонен, так как системы *Landsat* и *Sentinel* не обеспечивают требуемого пространственного разрешения. Из оставшихся вариантов было принято решение в пользу крупномасштабной спутниковой съемки. Решающим аргументом в пользу применения спутниковой съемки стала в несколько раз меньшая стоимость данных спутниковых снимков по отношению к АФС при достаточном пространственном и спектральном разрешении [4; 5], а также отсутствие дополнительных временных затрат полевые выезды и создание ортофотопланов.

Выполнение ландшафтного экологического мониторинга. В начале работ по мониторингу ландшафтов на территорию нефтяного месторождения составляется ландшафтная карта. Общая ландшафтная структура территории определяется путем синтеза тематической картографической информации о разных компонентах ландшафта: геологии (карты четвертичных отложений м-ба 1:200000), орографии (геоморфологическая карта 1:500000), гидрографии (средне- и крупномасштабные топографические карты), растительности (топографические и лесные карты), данных полевого отбора проб и ранее проведенных изысканий. На основании этих данных выявляются типы местности и границы урочищ, выбирается степень детализации и масштаб ландшафтного картографирования, обычно он составляет от 1:25000 – 1:50000, в зависимости от размера месторождения. По результатам изысканий формируется ГИС-проект, содержащий данные о типах местности, границах урочищ, гидрографии, направлении стока, промышленных объектах и контурах лицензионного участка месторождений.

Ввиду необходимости соблюдения коммерческой тайны, названия месторождений будут заменены номерами, а их территории будут описываться в привязке к географическим объектам. Также с карт будут удалены объекты обустройства месторождений.

Месторождение 1 расположено в Нижневартовском р-не ХМАО-Югры, на левобережье р. Оби, в верховьях р. Акимкина, верховьях р. Бол Еган.

Месторождение 2 расположено Нижневартовском р-не ХМАО-Югры, в верховьях р. Курьеган.

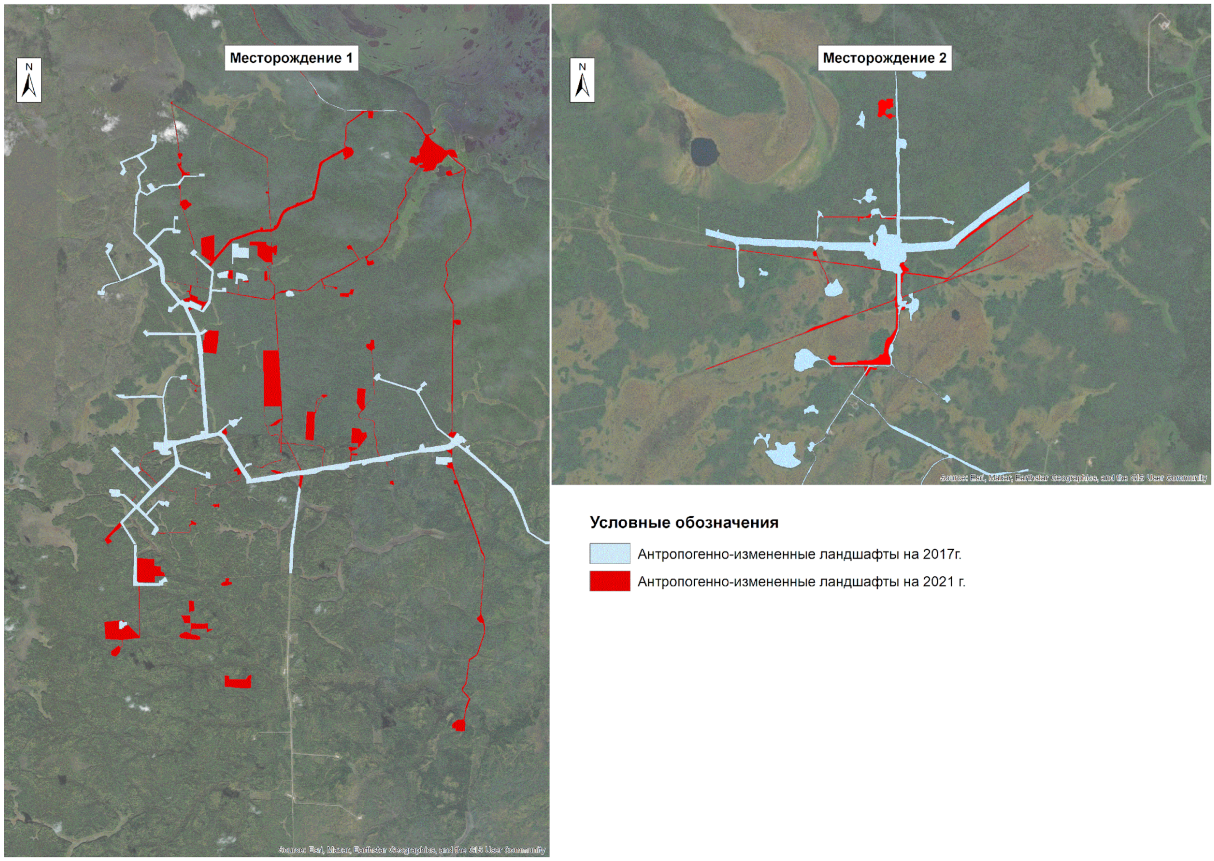


Рис. 1. Схема дешифрированных участков с антропогенно-измененными ландшафтами на месторождениях 1 и 2 за период наблюдений. В качестве подложки использованы данные покрытия *Arcgis Imagery*

Для обнаружения антропогенно-измененных участков проведено дешифрирование с помощью ПО *ArcGis*, полученных космических снимков. Основным методом дешифрирования является визуальный, с оконтуриванием вручную интересующих участков, с применением различных комбинаций каналов для лучшего отображения различных типов поверхностей. Одновременно с обнаружением нарушенных человеком площадей проводилось их нанесение на имеющиеся ландшафтные карты и проводилась корректировка ГИС-проекта.

В ходе следующего этапа работы проводится сравнительный анализ контуров антропогенных участков за актуальный и предыдущий этапы дешифрирования и делается заключение о динамике роста площадей антропогенной нагрузки.

На территории месторождения 1 в ходе мониторинга в 2017 г., выявлено 1 048,2716 га антропогенно-нарушенных ландшафтов, по состоянию на 2021 г. – 2 288,4946 га.

На территории месторождения 2 в 2017 г. дешифрировано 530,18 га. антропогенных ландшафтов, на период мониторинга в 2021 г. площадь антропогенного воздействия составила 542,83 га.

По результатам работы выявлен значительный пророст антропогенной нагрузки на территориях обследованных месторождений. Полученные данные занесены в отчет для гос. органов Ханты-Мансийского АО.

Заключение. По результатам работы определено, что по технико-экономическим показателям применение крупномасштабной спутниковой съемки является наиболее перспективным источником данных для ландшафтного экологического мониторинга. Преимуществами этого метода стали: большой пространственный охват – возможность единовременной съемки территории целого месторождения; высокое пространственное разрешение (в ходе закупочных процедур получены снимки с разрешением 2 м/пикс.); комбинирование нескольких спектральных каналов и относительно невысокая стоимость получения данных.

Применение крупномасштабной спутниковой съемки позволило выявить значительное увеличение площади антропогенного воздействия на территории рассматриваемых месторождений за период с 2017 по 2021 г. По полученным данным внесены корректировки в ранее построенные ландшафтные карты на эти месторождения.

Рассмотренная в статье тема является перспективной и с научной точки зрения.

С методологической точки зрения представляет интерес изучение возможностей применения инструментов полуавтоматической классификации изображений на основе обучающих выборок для поиска участков антропогенной деятельности. С точки зрения мониторинга антропогенной нагрузки представляет интерес изучение характера и динамики геоморфологических процессов в местах нарушения естественных ПТК, а также комплексный мониторинг и картографирование антропогенных нагрузок с выделением их типов, направлений воздействия и интенсивности.

Список источников

1. Козин В. В. Ландшафтный анализ в нефтегазопромысловом регионе: Монография. Тюмень : Издательство ТюмГУ, 2007. 240 с.

2. Козин В. В. Ландшафтно-экологическая среда Западной Сибири: учеб. пособие. Часть 1. Ямало-Гыданская область. Тюмень : Издательство ТюмГУ, 2007.144 с.

3. Постановление правительства Ханты-Мансийского автономного округа-Югры от 23.12.2011 № 485-п (в ред. постановления Правительства ХМАО – Югры от 21.03.2014 № 98-п) О системе наблюдения за состоянием окружающей среды в границах

лицензионных участков на право пользования недрами с целью добычи нефти и газа на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и признании утратившими силу некоторых постановлений правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

4. Заказ космической съемки // Официальный сайт компании Иннотер. URL: https://innoter.com/services/dannye-dzz/zakaz-novoy-semki/ (дата обращения 30.07.2025).

5. Заказ аэрофотосъемки съемки // Официальный сайт компании Иннотер. URL: https://innoter.com/services/dannye-dzz/aerofotosemka/(дата обращения 30.07.2025).

I. A. Polezhaykin[1], M. I. Taranyuk[2], Y. P. Mylnikov[3]
[1, 2, 3]AO «TomskNIPIneft», Tomsk, Russia
[1]PolezhaykinIA@tomsknipi.ru, [2]TaranyukMI@tomsknipi.ru, [3]MylnikovYP@tomsknipi.ru

APPLICATION OF LARGE-SCALE SATELLITE SURVEY DATA TO MONITORING THE DYNAMICS OF ANTHROPOGENIC LANDSCAPES IN OIL FIELDS

Abstract. The paper presents the accumulated experience of the environmental department of AO «TomskNIPIneft» in terms of the application of geoinformation technologies and Earth remote sensing data (ERS) to solve the problems of environmental landscape monitoring of oil field territories.

УДК 528

К. И. Сафин
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
kisafin@edu.hse.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ПИРОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ООПТ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ В XXI ВЕКЕ

Аннотация. Среднее Поволжье представлено восточной частью Восточно-Европейской равнины и предгорья Урала и обладает уникальными лесными заповедниками и национальными парками, охраняющими редкие виды флоры и фауны. Всего в данном регионе 8 заповедников и 5 национальных парков. Главная угроза для этих территорий – пожары, вызванные как природными, так и антропогенными факторами, приводящие к гибели биоразнообразия и загрязнению атмосферы. Несмотря на все жесткие меры по противопожарной безопасности, изредка приходится слышать, что в определенном субъекте Среднего Поволжья огонь уничтожил территорию того или иного федерального ООПТ. Цель работы – провести сравнительный анализ количества тепловых аномалий в зависимости от климатических условий, близости к дорогам, заповедникам и национальным паркам региона.

Ключевые слова: пожар, ООПТ, Среднее Поволжье, природный фактор, волна жары 2010 года, термоточки

Макрорегиональный анализ факторов и географии возгораний на территории Среднего Поволжья в 2000–2020-е гг. Для анализа факторов и географии возгораний были взяты данные по тепловым аномалиям Института научно-исследовательских данных (ИНИД), в котором содержится набор данных содержит оперативные сведения МЧС России о географических точках, типах и датах природных пожаров, происходивших на территории России с 2012 по 2021 г. [1], и Рослесхоза [2]. В них также содержатся информация о дате возгорания в формате ГГГГ-ММ-ДД, описание типа пожара, его долгота и широта. Для анализа горимости на федеральных ООПТ были собраны климатические данные с 6 метеостанции (температура [3] и осадки [4]).

По полученным данным был проведен корреляционный анализ по зависимости числа термоточек по ИНИД от температуры и количества осадков для каждого субъекта в регионе Среднего Поволжья. Результаты представлены в табл. 1.

По табл. 1 сразу можно заметить, что для большего числа регионов имеется сильная положительная связь числа термоточек с температурами летнего периода, а также обратная зависимость между количеством термоточек и суммой осадков за летний период. Увеличение температуры сопровождается снижением осадков. Наибольшая связь количества термоточек

с температурой наблюдается в Чувашии, Мордовии и Нижегородской области, что объясняется их соседством, равнинным рельефом и преобладанием легковоспламеняющихся лесов и торфяников. В Башкирии корреляция слабее из-за горного рельефа. Связь количества термоточек с осадками везде обратная, наиболее сильная в Нижегородской области (из-за торфяников), наиболее слабая – в Чувашии и Мордовии.

Таблица 1

Связь числа зарегистрированных термоточек (данные ИНИД) с климатическими характеристиками в летние периоды 2010–2021 гг.

Регион	**Корреляция по температуре. 2012–2021 гг.**	**Корреляция по осадкам. 2012–2021 гг.**
Республика Башкортостан	0,44	–0,62
Республика Марий Эл	0,62	–0,38
Республика Мордовия	0,74	–0,13
Республика Татарстан	0,65	–0,40
Чувашская Республика	0,80	–0,18
Нижегородская область	0,73	–0,70

По данным Рослесхоза тоже был проведен корреляционный анализ, но здесь и значения термоточек больше и интервал длиннее. В связи с этим значения сильно отличаются от тех, что были получены при ИНИД.

Таблица 2

Связь числа зарегистрированных термоточек (данные Рослесхоза) с климатическими характеристиками в летние периоды 2010–2021 гг.

Регион	**Корреляция по температуре. 2010–2021 гг.**	**Корреляция по осадкам. 2012–2021 гг.**
Республика Башкортостан	0,15	–0,34
Республика Марий Эл	0,26	–0,23
Республика Мордовия	0,12	–0,27
Республика Татарстан	0,08	–0,04
Чувашская Республика	0,02	–0,43
Нижегородская область	0,51	–0,79

Наиболее высокая корреляция по температуре у Нижегородской области. Это свидетельствует о том, что концентрация тепловых аномалий выше. Кроме того, обратная связь по осадкам также выше у данного региона. Низкая корреляция по температуре у Татарстана и Чувашии, при этом у Чувашии обратная связь по осадкам средняя, что говорит о низкой зависимости числа термоточек по данным Рослесхоза от температуры и о средней зависимости от осадков.

Выявление факторов возгорания по анализу близости к дорогам. Регион Среднее Поволжье имеет достаточно протяженную дорожную сеть. Согласно данным от Росавтодора и Росстата, в период с 2010 по 2021 г. протяженность только увеличивалась. По данным ИНИД и Рослесхоза можно вычислить количество точек по годам. За каждый год можно определить количество тепловых аномалий по субъектам Среднего Поволжья. По данным термоточек и протяженностью автомобильных дорог был проведен корреляционный анализ. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции числа термоточек и протяженности автомобильных дорог по субъектам РФ региона Среднего Поволжья

Регион	**ИНИД**	**Рослесхоз**
Республика Башкортостан	0,47	0,53
Республика Марий Эл	–0,19	–0,22
Республика Мордовия	0,70	0,20
Республика Татарстан	0,82	0,42
Чувашская Республика	0,64	0,26
Нижегородская область	0,70	0,25

Во многих регионах наблюдается связь между количеством термоточек и густотой дорог, кроме Марий Эл, где связь слабая и даже отрицательная из-за низкой плотности дорожной сети (3,71 км/тыс. га) и, возможно, других причин возникновения пожаров. По данным ИНИД, в Нижегородской области, Татарстане и Мордовии корреляция высокая. По данным Рослесхоза, корреляция ниже 0,55 во всех регионах, наибольшая – в Башкирии, в остальных – средняя, кроме Марий Эл, где слабые отрицательные связи числа термоточек и плотности дорожной сети свидетельствуют о меньшей транспортной доступности при обнаружении и тушении пожаров.

Пирогенные воздействия на федеральные ООПТ как репрезентативные территории природы Среднего Поволжья. По данным ИНИД и Рослесхоза было подсчитано количество тепловых аномалий в пределах ООПТ на расстоянии от 500 до 2 000 м. По данным табл. 4 видно, что по мере отдаления от границ ООПТ количество термоточек увеличивается, однако не всегда количество тепловых аномалий совпадает с масштабом последствий пожаров.

Таблица 4

Количество тепловых аномалий по данным ИНИД и Рослесхоза

ООПТ	**ИНИД (кол-во точек)**	**Рослесхоза (кол-во точек)**
ООПТ (2 000 м)	215	424
ООПТ (1 500 м)	203	348
ООПТ (1 000 м)	197	280
ООПТ (500 м)	187	201

Для изучения возникновения и частоты пожаров в Среднем Поволжье проанализированы спутниковые снимки *Landsat* (*USGS Earth Explorer*) [5], а также по данным СМИ и официальных сайтов. Выявлено 4 заповедника и 2 нацпарка, наиболее пострадавших от пожаров в 2010–2020-е гг.

Список источников

1. Институт научно-исследовательских данных. https://data.rcsi.science/data-catalog/datasets/202/.

2. Природные пожары по данным Рослесхоза с 2000 года. https://tochno.st/datasets/fires?ysclid=m7zalx9ezq55522924.

3. Архив погоды с 1929 года. http://pogoda-service.ru/archive_gsod.php.

4. Погода и климат. http://www.pogodaiklimat.ru/.

5. USGS Earth Explorer. https://earthexplorer.usgs.gov/.

K. I. Safin

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

kisafin@edu.hse.ru

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF PYROGENIC IMPACTS ON FEDERAL PROTECTED AREAS OF THE MIDDLE VOLGA REGION IN THE 21ST CENTURY

Abstract. The paper discusses a comparative analysis of the number of thermal anomalies depending on the climatic conditions, proximity to roads, nature reserves, and national parks in the region.

Keywords: fire, protected areas, Middle Volga region, natural factor, 2010 heat wave, thermometers

УДК 551.524, 550.34

Л. Г. Свердлик
Научная станция РАН в Бишкеке, Кыргызстан
Кыргызско-Российский славянский университет, Бишкек, Кыргызстан
l.sverdlik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОМ РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Аннотация. Представлены результаты ретроспективного исследования аномальных изменений термической структуры атмосферы в области тропопаузы над эпицентральными областями 6 землетрясений с магнитудами $M > 6{,}0$, которые были зарегистрированы в 2015–2016 гг. на территории, протянувшейся от Памиро-Гиндукушской сейсмической зоны Афганистана на юго-западе до Восточного Памира (Таджикистан) на северо-востоке. На примере этих событий проведена оценка пространственного масштаба, локализации, продолжительности и времени проявления аномальных возмущений температуры. Результаты анализа профилей температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (*UTLS*) показали, что перед каждым из исследованных землетрясений атмосфера находилась в возмущенном состоянии. Наиболее выраженные изменения температуры наблюдались за 1–5 суток до землетрясений и были локализованы вблизи эпицентральных областей.

Ключевые слова: спутниковые измерения, температура, землетрясение, *UTLS*, критерий *STA/LTA*, интегральный параметр, аномалия

Наблюдения с использованием спутникового дистанционного зондирования играют важную роль в исследованиях изменений параметров атмосферы во время стихийных бедствий, в частности, в периоды сейсмической активности. Выделение атмосферных эффектов крупных землетрясений проводилось с использованием специального алгоритма [1], который основан на анализе динамики пространственно-временной изменчивости температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (*UTLS*) и ранее уже применялся к событиям в нескольких регионах Азии и Европы (напр., [2]). Цель настоящего исследования состояла в дополнительном тестировании алгоритма на примере шести землетрясений с магнитудами $M \geq 6{,}0$, произошедших в 2015–2016 гг. в сейсмоактивном регионе Центральной Азии (34–42° N и 68–76° E), являющегося частью зоны столкновения Евразийской и Индостанской тектонических плит.

Эпицентры событий располагались в относительно узкой полосе шириной ~120 км, протянувшейся от Памиро-Гиндукушской сейсмической зоны Афганистана на юго-западе до Восточного Памира (Мургабский район Таджикистана) на северо-востоке. Распределение гипоцентров по глубине под Гиндукушем достигали глубины 250 км, в то время как в восточной части зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира их глубина (D) не превышала

© Свердлик Л. Г., 2025

30 км. Такой широкий диапазон глубин залегания гипоцентров позволил сопоставить значения этого параметра с интенсивностью и пространственной протяженностью тепловых аномалий в *UTLS*. Характеристики землетрясений по данным *USGS* [3] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики землетрясений (*EQ*) $M > 6{,}0$ (*https://earthquake.usgs.gov*)

№	Дата	Время, *UTC*	Широта, град. с. ш.	Долгота, град. в. д.	*D*, км	*M*	Расположение эпицентров
*EQ*1	26.10. 2015	9:09:42	36,52	70,37	231,0	7,5	Гиндукуш, Афганистан
*EQ*2	07.12. 2015	7:50:05	38,21	72,78	22,0	7,2	104 км от Мургаба, Таджикистан
*EQ*3	25.12. 2015	19:14:47	36,49	71,13	206,0	6,3	42 км от Ишкашима, Афганистан
*EQ*4	10.04. 2016	10:28:58	36,47	71,13	212,0	6,6	42 км от Ишкашима, Афганистан
*EQ*5	26.06. 2016	11:17:11	39,48	73,34	13,0	6,4	92 км от Кызыл-Эшме, Кыргызстан
*EQ*6	25.11. 2016	14:24:30	39,27	73,98	17,0	6,6	122 км от Мургаба, Таджикистан

Исследование воздействия сейсмических событий на состояние атмосферы было основано на данных наземных и спутниковых измерений температуры на уровнях 500–40 гПа, представленных в архиве глобального реанализа *MERRA*-2 [4] с 3-часовой дискретизацией по времени на географической сетке с шагом 0,5° по широте и 0,625° по долготе.

Результаты расчета пространственно-временного распределения интегрального параметра δT_C в предсейсмические периоды самых сильных в исследуемой последовательности землетрясений $M = 7{,}5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC) и $M = 7{,}2$ (07.12.2015; 07:50:05 UTC) приведены на рис. 1.

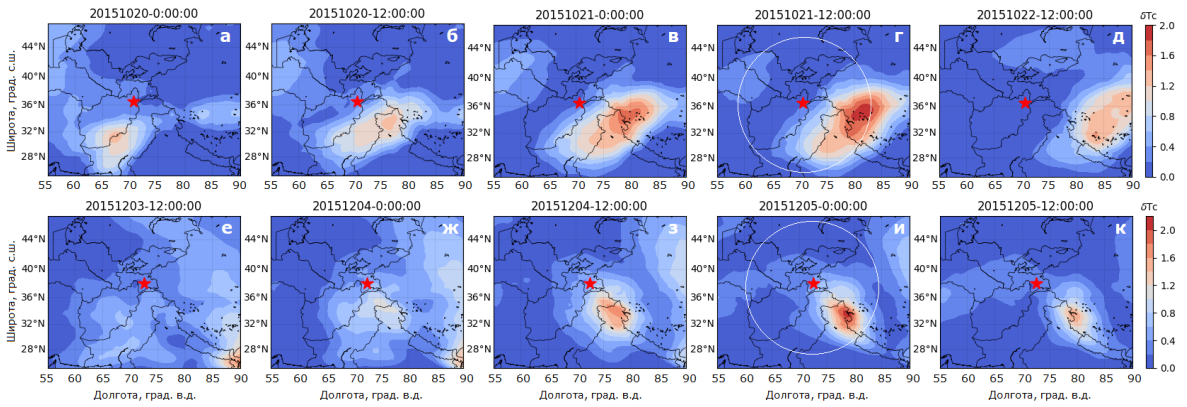


Рис. 1. Эволюция пространственного распределения параметра δT_C в периоды с 20 по 22 октября 2015 г. (а–д) и с 3 по 5 декабря 2015 г. (е–к). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M = 7{,}5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC) и $M = 7{,}2$ (07.12.2015; 07:50:05 UTC). Белые круги обозначают области подготовки землетрясений [5]

Наборы карт демонстрируют все стадии процесса эволюции возмущений температуры – от развития до ослабления и постепенного распространения на восток в период с 20 по 22 октября (рис. 1, *а–д*) и с 3 по 5 декабря 2015 г. (рис. 1, *е–к*). Хорошо выраженные области высоких значений параметра δT_C = 1,5–2,2 с горизонтальными размерами порядка 500–1 000 км были устойчиво локализованы вблизи эпицентров землетрясений на протяжении более 24 ч. Максимумы в развитии возмущений температуры наблюдались 21 октября и 5 декабря 2015 г. за ~5 суток и за 2–3 суток до событий, соответственно, и располагались на удалении в несколько сотен километров от эпицентров. Согласованное поведение температуры и сейсмичности в обоих случаях позволило квалифицировать области устойчиво высоких значений параметра δT_C ($\delta T_C \geq 2{,}0$) как значительные предсейсмические тепловые аномалии в *UTLS*.

Карты пространственного распределения возмущений температуры для остальных четырех землетрясений, представленные на рис. 2, также демонстрируют связь со временем возникновения этих событий. Анализ спутниковых данных показал, что предсейсмические аномалии либо перекрывали эпицентры, либо концентрировались в непосредственной близости от них в пределах области с радиусом Добровольского [5]. Сравнивая атмосферные эффекты землетрясений, следует отметить сопоставимые по продолжительности (1–2 суток) и интенсивности возмущения с достаточно близкими максимальными значениями параметра δT_C (δT_C=1,6–2,0). Определенное различие во времени запаздывания сейсмических событий относительно появления тепловых аномалий (от 1 до 5 суток), а также размеров возмущенных областей может быть связано с различающимися глубинами гипоцентров.

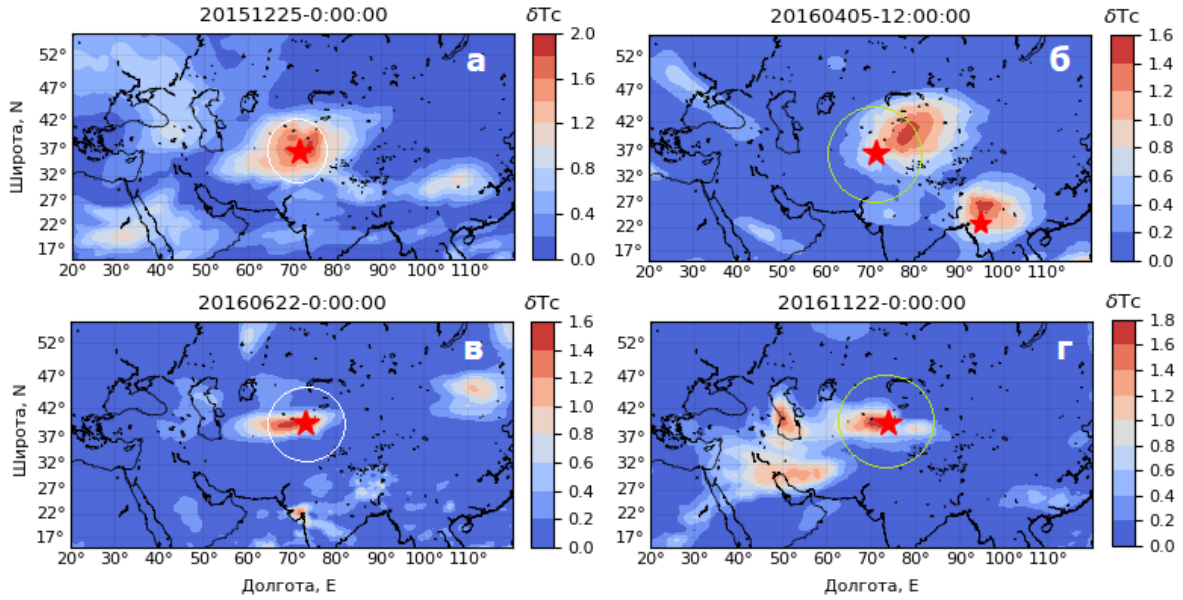


Рис. 2. Пространственное распределение параметра δT_C 25 декабря 2015 г. (*а*), 5 апреля 2016 г. (*б*), 22 июня 2016 г. (*в*) и 22 ноября 2016 г. (*г*). Маркерами показаны эпицентры землетрясений: в Афганистане *M* = 6,3 (25.12.2015) и *M* = 6,6 (10.04.2016), Кыргызстане *M* = 6,4 (26.06.2016), Таджикистане *M* = 6,6 (25.11.2016)

Важная особенность выявленных предсейсмических возмущений, которая явно проявилась в результатах и согласуется с предыдущими исследованиями (напр., [2]), состоит в том, что пространственное распределение тепловых аномалий перед сильными землетрясениями с глубоким гипоцентром ($D > 200$ км) было более широким. Возмущенные области были, как правило, вытянуты вдоль параллелей вследствие влияния преобладающего ветрового режима в верхней тропосфере.

Таким образом, результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования атмосферы показали, что пространственно-временная эволюция возмущений температуры в *UTLS* достаточно хорошо согласуется с сейсмичностью. Мезомасштабные возмущения температуры отчетливо наблюдались за несколько суток до событий и, вероятно, могут служить проявлением реакции слоев нижней атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке крупных землетрясений.

Автор благодарен сотрудникам NASA GES-DISC за доступ к данным.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме № 1021052806454-2-1.5.1. В исследовании также принимали участие сотрудники Высокогорной Обсерватории Физики Атмосферных Процессов КРСУ и НС РАН по Программе Развития КРСУ.

Список источников

1. Свердлик Л. Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.

2. Свердлик Л. Г. Предсейсмические возмущения метеопараметров в нижней атмосфере по данным спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 56–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-6.

3. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/.

4. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/.

5. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. P. 1025–1044.

L. G. Sverdlik
Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyzstan
Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan
l.sverdlik@mail.ru

STUDY OF THE THERMAL ANOMALY DYNAMICS IN THE SEISMICALLY ACTIVE REGION OF CENTRAL ASIA

Abstract. The paper presents results of retrospective study of anomalies in changes of atmosphere thermal stratification in the tropopause over epicentral areas of 6 earthquakes of M = 6,0, which were registered in 2015–2016 in the territory stretching from Pamir–Hindu Kush seismic zones of Afghanistan on the south-west to the East Pamir (Tajikistan) on the

north-east. Through the example this event an assessment of the spatial scale, localization, duration and time of anomalous temperature perturbations manifestations was performed. Results of temperature profiles analysis in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) showed that the atmosphere was in a perturbed state before each studied earthquake. Temperature disturbances maxima were observed 1–5 days before earthquakes and they were located near epicentral areas.

Keywords: satellite measurements, temperature, earthquake, UTLS, STA/LTA criterion, integral parameter, anomaly

УДК 528

Н. М. Склюева
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
nmsklyueva@edu.hse.ru

ДИСТАНЦИОННАЯ ИНДИКАЦИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО НА ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ ОБОРОТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

Аннотация. Рассмотрен метод обнаружения инвазивного вида борщевика Сосновского по данным спутниковых систем дистанционного зондирования Земли среднего (*Sentinel-2*) и высокого (*PlanetScope*) пространственного разрешения. Применение индекса *HSI* (*Heracleum Sosnowskyi Index*) в фазу активного цветения растения позволяет выявить основные места обитания борщевика Сосновского и особенности его распространения в пределах заброшенных сельскохозяйственных земель на примере двух географически различных районов Тверской области. Валидационный анализ результатов работы индекса показывает высокую степень взаимозависимости данных *Sentinel-2* и *PlanetScope*.

Ключевые слова: борщевик Сосновского, инвазивный вид, *Sentinel-2*, *PlanetScope*, индекс *HSI*, мультиспектральные данные

В современном мире проблема биологической инвазии остается одной из основных причин интенсивного снижения биоразнообразия в экосистемах. Площадь, занятая инвазивными сообществами, ежегодно увеличивается: на сегодняшний день борщевик Сосновского – неприхотливый к условиям и обладающий высокой семенной продуктивностью инвазивный вид – занимает около 15–20 % сельскохозяйственных земель России [1]. Выполнявший функцию силосной культуры в СССР борщевик Сосновского сформировал вторичный ареал в районе центральных и северо-западных регионов РФ [2], где в условиях заброшенности сельскохозяйственных земель после 1991 г., как в Тверской области, создаются благоприятные условия для быстрого внедрения инвазивного вида в местные растительные сообщества [3]. Для получения актуальной информации о степени трансформации экосистем борщевиком Сосновского используются данные краудсорсинговых платформ (Антиборщевик, *iNaturalist*), а также дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [4]. Метод дистанционной индикации позволяет извлечь достоверные пространственные данные для оперативных и прогнозных оценок территории, подверженной влиянию инвазивного вида, а также выявить пространственно-временные закономерности распределения борщевика Сосновского по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения.

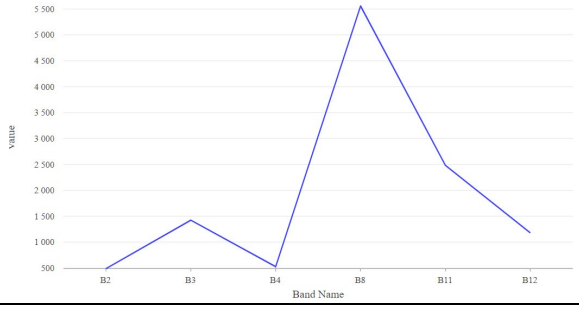
© Склюева Н. М., 2025

Первым этапом исследования стало районирование Тверской области по факторам, влияющим на произрастание борщевика Сосновского. Для анализа были выбраны Ржевский муниципальный округ в центральной и Кашинский городской округ в восточной части региона, которые характеризуются высоким процентом заброшенных земель и населенных пунктов, что позволяет рассматривать данные АТД в качестве территорий для изучения пространственных различий в распространении борщевика Сосновского.

Работа с данными среднего пространственного разрешения *Sentinel-2* (10 м) осуществлялась на платформе *Google Earth Engine*, где для индикации борщевика Сосновского выбирались даты с минимальной облачностью в период активного цветения растения (медианный июльский снимок), тогда как дешифрирование инвазивного вида происходило по ярко-зеленому оттенку растения в синтезе *RGB* (табл. 1).

Таблица 1

Визуализация местообитаний борщевика Сосновского в Кашинском районе на медианном снимке *Sentinel-2* в период с 01.07.2024 по 30.07.2024

Очаг произрастания	**Спектральная кривая**
	

Разработанный Д. М. Рыжиковым спектральный индекс *HSI* обеспечивает идентификацию участков произрастания борщевика Сосновского благодаря эмпирически подобранному пороговому значению, при превышении которого территорию можно считать пораженной борщевиком Сосновского (для *Sentinel*-2 от 6 до 9, для *PlanetScope* от 5 до 8) [5].

$$HSI = NIR / \left|GREEN - BLUE\right|.$$

Перед использованием индекса HSI производилась процедура маскирования водных объектов и распаханных сельскохозяйственных полей по индексу *NDVI* для анализа исключительно растительного покрова. В результате работы индекса HSI был получен бинарный растр со значением 0 и 1, где 0 – отсутствие информации, 1 – предположительное произрастание борщевика Сосновского.

Наибольшая площадь распространения борщевика Сосновского (2 159 га) сосредоточена вблизи города Кашин из-за заброшенных сельскохозяйственных земель в отсутствии лесных массивов (рис. 1). Пригородная нарушенная зона создает благоприятные условия для экспансии инвазивного вида в действующие пахотные угодья через дороги и выведенные

из оборота сельскохозяйственные земли. Во Ржевском округе борщевик Сосновского распространен более точечно и фрагментированно, преимущественно вдоль дорог, СНТ, заброшенных деревень и занимает меньшую площадь (1 725 га). Неравномерность распространения борщевика Сосновского связана с высокой залесенностью и меньшей хозяйственной освоенностью данной территории.

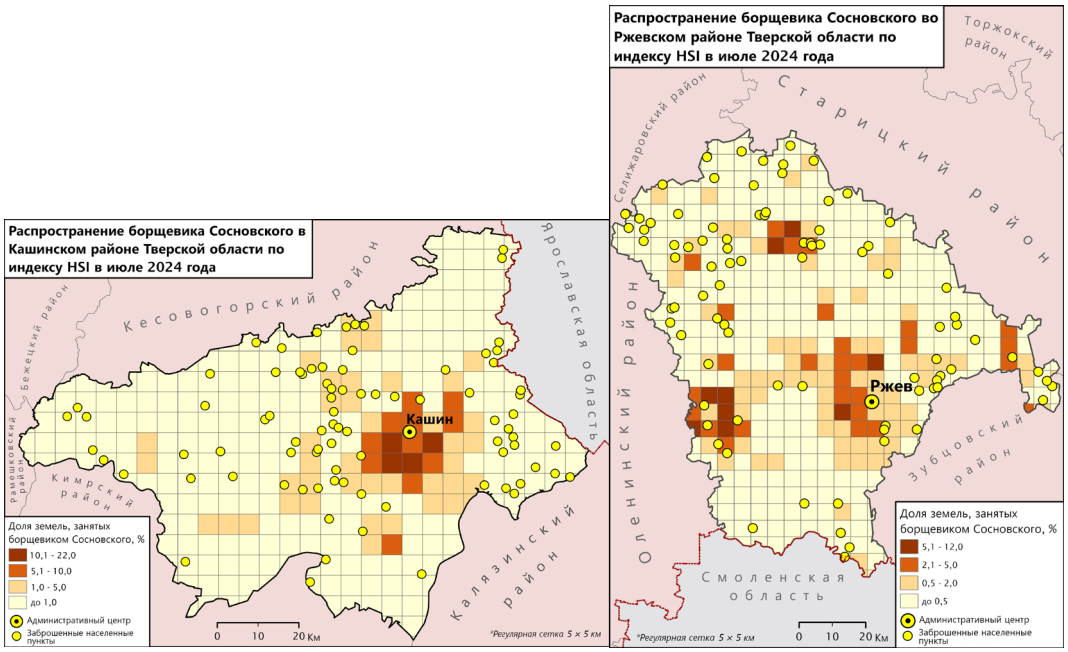


Рис 1. Распространение борщевика Сосновского в изучаемых районах

Для валидации участков произрастания борщевика Сосновского на выведенных из оборота сельскохозяйственных землях, распознанных индексным изображениям *HSI* по данным *Sentinel-2* с пространственным разрешением 10 м, использовались спутниковые снимки системы *PlanetScope Super Dove* высокого пространственного разрешения (3 м) за 2024 г. На тестовых участках в различные фенофазы растения были распознаны основные очаги борщевика Сосновского по индексу *HSI*. Индекс *HSI* по снимкам *Sentinel-2* и *PlanetScope* в Кашинском округе показывает высокую согласованность данных (разница ~10 га), но среднее значение коэффициента детерминации из-за сложного точечного распространения инвазивного вида по территории. Во Ржевском районе различия в оценках индекса *HSI* также незначительны (10–12 га), но более высокий R^2 указывает на лучшую точность работы индекса при меньшей плотности зарослей (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение данных об основных местах произрастания борщевика Сосновского в исследуемых округах

Округ	**Высокое разрешение *PlanetScope***		**Среднее разрешение *Sentinel*-2**	**Коэффициент детерминации R^2**	
	Площадь, га		**Площадь по июльскому медианного снимка, га**	**Между 28.06 и медианным снимком (*PlanetScope* и *Sentinel-2*)**	**Между 21.08 и медианным снимком (*PlanetScope* и *Sentinel*-2)**
	28.06.24	**21.08.24**			
Ржевский	62,33	53,15	56,02	0,55	0,61
Кашинский	88,04	89,11	80,12	0,53	0,52

Подводя итог, следует отметить, что интеграция данных ДЗЗ разного пространственного разрешения позволила актуализировать информацию о степени поражения территории борщевиком Сосновского, а также провести детальный анализ особенностей распространения инвазивного вида в пределах заброшенных сельскохозяйственных земель на примере двух районов Тверской области.

Список источников

1. Лунева Н. Н., Конечная Г. Ю., Смекалова Т. Н., Чухина И. Г. О статусе вида борщевик Сосновского Heracleum sosnowskyi Manden. на территории РФ // Вестник защиты растений. 2018. № 3 (97). С. 10–15.

2. Афонин А. Н., Лунева Н. Н., Ли Ю. С., Коцарева Н. В. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (Heracleum sosnowskyi Manden) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России // Экология. 2017. № 1. С. 66–69.

3. Лунева Н. Н. Борщевик Сосновского в Российской Федерации // Защита и карантин растений. 2014. № 3. С. 12–18.

4. Петрова И. Ф., Королева Е. Г. Оценка опасности распространения борщевика Сосновского в России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 86. № 5. С. 788–798.

5. Рыжиков Д. М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6 (91). С. 43–51.

N. M. Sklyueva
National Research University “Higher School of Economics”, Moscow, Russia
nmsklyueva@edu.hse.ru

REMOTE DETECTION OF SOSNOVSKY’S HOGWEED ON DECOMMISSIONED AGRICULTURAL LANDS

Abstract. The paper presents a method for detecting the invasive species Heracleum sosnowskyi using satellite remote sensing data from medium-resolution (Sentinel-2) and high-resolution (PlanetScope) systems. The application of the Heracleum Sosnowskyi Index (HSI)

during the plant's active flowering phase enables the identification of the main habitats of H. sosnowskyi and reveals patterns of its distribution within abandoned agricultural lands, using two geographically distinct areas of Tver Region as case studies. Validation analysis of the HSI results demonstrates a high degree of correlation between Sentinel-2 and PlanetScope data.

Keywords: Heracleum sosnowskyi, invasive species, Sentinel-2, PlanetScope, HSI index, multispectral data

УДК 574.45; 551.588.6

А. В. Скороходов[1], Т. Б. Журавлёва[2]
[1, 2]Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
[1]vazime@yandex.ru, [2]ztb@iao.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОЛНЕЧНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ С ПАРАМЕТРАМИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Аннотация. Солнечно-индуцированная флуоресценция является перспективным показателем фотосинтетической активности растений для мониторинга продуктивности экосистем в глобальном масштабе. В работе проведена оценка динамики фотосинтеза различных типов растительности юга Западной Сибири по спутниковым данным *TROPOMI* за период 2018–2024 гг. Исследованы связи солнечно-индуцированной флуоресценции с температурно-влажностными параметрами окружающей среды, биофизическими индикаторами и радиационными характеристиками. Анализ выполнен как для всего целевого региона в целом, так и по отдельным широтным зонам. Выделены ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на фотосинтез различных типов растительности.

Ключевые слова: динамика фотосинтеза, корреляционный анализ, солнечно-индуцированная флуоресценция, спутниковые данные, типы растительности

Фотосинтез является основой жизни на Земле, поэтому его изучение актуально по нескольким причинам. Первая из них фундаментальная, поскольку раскрываются тонкие механизмы адаптации растений к меняющейся среде. Вторая заключается в том, что фотосинтез является ключевым параметром моделей углеродного цикла и климатических прогнозов. В-третьих, информация об этом процессе используется в сельском хозяйстве для рационального земледелия. Кроме того, развиваются и современные направления, связанные с синтетической биологией и проблемами искусственного фотосинтеза. Прямые измерения фотосинтеза растений носят локальный характер и выполняются преимущественно с помощью метода статических камер и башен вихревой ковариации через оценку потоков парниковых газов. Реже используется подход, регистрирующий флуоресцентное свечение хлорофилла, индуцированного солнечным светом (*SIF*, *solar-induced fluorescence*). Однако именно он обеспечивает прямые измерения фотосинтеза и, в сравнении с различными вегетационными индексами, лучше отражает функциональное состояние растений и влияние на них различных стрессовых факторов. *SIF* представляет собой собственное излучение, испускаемое молекулами растений в спектральном диапазоне 600–800 нм в те-

© Скороходов А. В., Журавлёва Т. Б., 2025

чение нескольких наносекунд после поглощения солнечного света. На флуоресценцию тратится всего 1–2 % от всей поглощенной фотосинтетически активной радиации (*fPAR*, *fraction of photosynthetically active radiation*). Основные пики *SIF* на 680 и 740 нм расположены вблизи сильных линий Фраунгофера (687 и 760 нм), что делает возможным выделение столь слабого сигнала спутниковыми инструментами [1].

В настоящее время основное применение информации о *SIF* связано с оценкой валовой первичной продукции (*GPP*, *gross primary production*) различных экосистем. В глобальном масштабе на длительных интервалах времени между *GPP SIF* наблюдается практически линейная зависимость [2]. Однако на региональном уровне даже для отдельно взятой экосистемы связь *GPP-SIF* может значительно варьироваться под влиянием различных факторов, включающих структуру растительного покрова, фотохимическую эффективность, температурно-влажностные характеристики и др. [3]. Данная проблема особенно актуальна для регионов со значительной природной неоднородностью и выраженной сезонностью, таких как, например, юг Западной Сибири. Территория этого региона характеризуется коротким, но интенсивным вегетационным периодом, резкими перепадами температуры и влажности, а также значительной изменчивостью соотношения прямой и рассеянной солнечной радиации в условиях континентального климата. Эти факторы формируют уникальную модель динамики фотосинтеза, в которой связь *GPP-SIF* может быть иной по сравнению с характерной для тропических регионов и умеренных лесов Европы и Северной Америки, наиболее часто становящихся объектами исследований.

Целью настоящей работы является выявление ключевых параметров окружающей среды, оказывающих наибольшее влияние на *SIF* для экосистем юга Западной Сибири (рис. 1) по данным дистанционного зондирования и реанализа за период 2018–2024 гг. Информация о *SIF* извлекается из стандартного продукта сенсора *TROPOMI* (спутник *Sentinel-5P)*. В качестве исследуемых характеристик рассматриваются сведения о температуре воздуха на уровне 2 м (*T2M*), температуре верхнего слоя почвы (*SKT*, *skin temperature*), количестве осадков (*TP*, *total precipitation*) и дефиците давления водяного пара (*VPD*, *vapor pressure deficit*), полученная по данным реанализа *ERA-5*. Продукция сенсора *MODIS* (спутник *Aqua*) использовалась для получения индексов растительности *NDVI* (*normalized difference vegetation index*), *EVI* (*enhanced vegetation index*) и *LAI* (*leaf area index*), а также *fPAR* и температуры подстилающей поверхности (*LST*, *land-surface temperature*). Значения прямой и диффузной составляющих фотосинтетически активной радиации (*PAR_dir* и *PAR_dif* соответственно) извлекались из продуктов широковолновых радиометров проекта *CERES* (спутники *Aqua*, *Terra* и *NOAA-20*). Источником информации о влажности почвы (*SM*, *soil moisture*) является продукт Европейского космического агентства (*C3S-SOILMOISTURE*), агрегирующий результаты спутниковой съемки несколькими системами активного и пассивного зондирования. В работе рас-

сматривались месячные значения перечисленных выше характеристик в вегетационном периоде исследуемого региона (май – сентябрь); вся информация о параметрах окружающей среды была приведена к единому пространственному разрешению 0,05°.

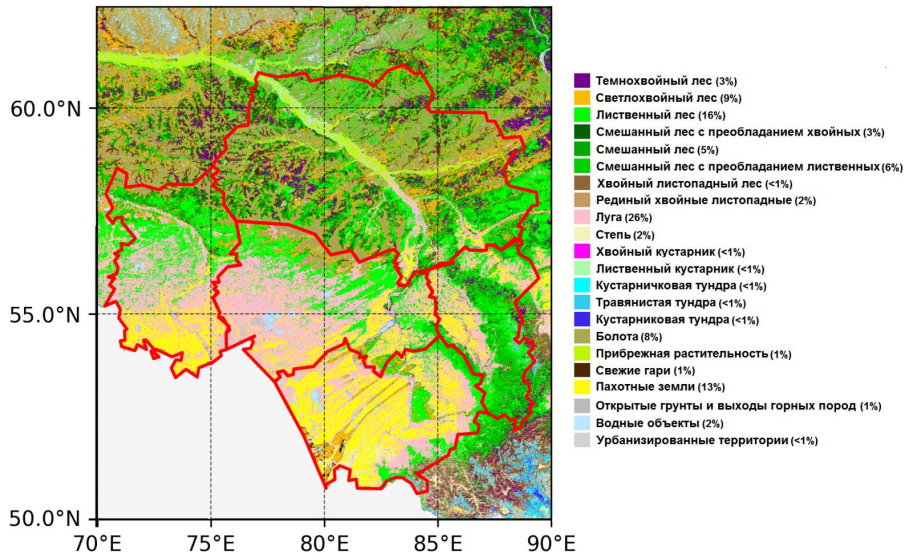


Рис. 1. Карта растительности целевого региона
(в скобках указана доля покрытия экосистемой исследуемой территории)

На данном этапе исследований связь между *SIF* и различными параметрами окружающей среды рассматривалась через анализ коэффициентов корреляции Пирсона (r) с учетом их статистической значимости (p). На рис. 2 показаны значения r между *SIF* и параметрами окружающей среды для наиболее распространенных экосистем юга Западной Сибири. Отметим, что при $r > 0{,}3$ коэффициенты корреляции являются значимыми на уровне $p = 0{,}05$. Анализируя график, можно упорядочить группы признаков по степени их взаимосвязи с *SIF*. Наиболее тесная связь наблюдается у искомого параметра с биофизическими индикаторами растительности, затем идет температурный режим, далее радиационные характеристики и на последнем месте влажностные параметры.

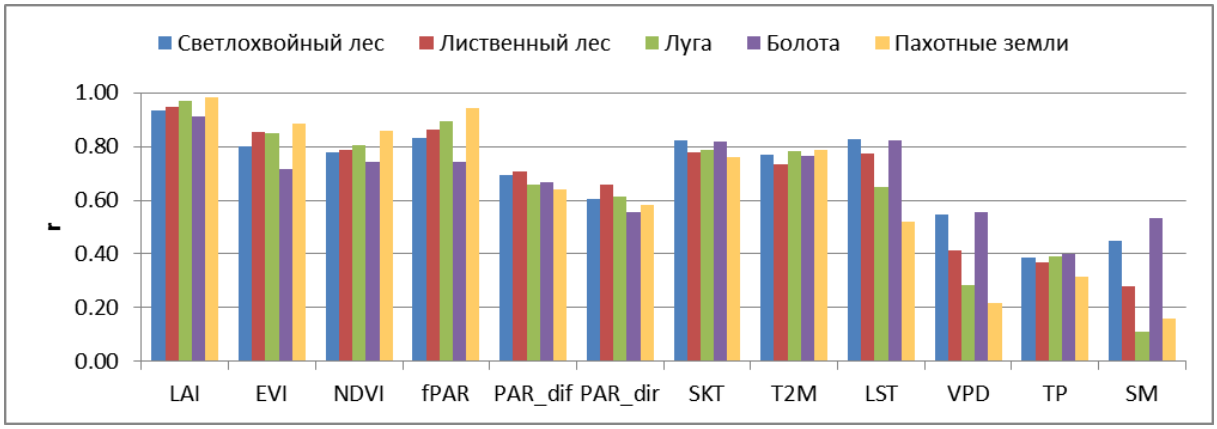


Рис. 2. Значения коэффициента корреляцмм Пирсона для *SIF*
с рассматриваемыми параметрами окружающей среды

На следующем шаге строились тепловые (корреляционные) карты, на основе которых оценивались взаимосвязи как между характеристиками одной группы, так и разных для наиболее распространенных типов растительности целевого региона. Высокие значения корреляции ($r > 0,8$) наблюдаются внутри группы биофизических индикаторов и температурных параметров. Между радиационными характеристиками взаимосвязь средняя ($0,5 < r < 0,7$). Внутри группы влажностного режима связь между параметрами слабая ($r < 0,5$) для всех типов растительности за исключением лугов и пашен. Для межгрупповых связей ситуация различная. Так, значения $r > 0,8$ для *EVI* с *SKT*, *T2M* и *LST* для лесов и болот, а $r > 0,8$ для *EVI* с *SKT* и *T2M*, но $r < 0,5$ для *EVI* с *LST* для лугов и пашен, что предположительно связано с большим вкладом почвы в *LST*, чем растительности у этих экосистем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

Список источников

1. Frankenberg C., Berry J. Solar-induced chlorophyll fluorescence: Origins, relation to photosynthesis and retrieval // Comprehensive Remote Sensing. 2018. P. 143–162.

2. Li X et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence is strongly correlated with terrestrial photosynthesis for a wide variety of biomes: First global analysis based on OCO-2 and flux tower observations // Glob. Chang. Biol. 2018. V. 24(9). P. 3990–4008.

3. Wang Y. et al. Elucidating climatic drivers of photosynthesis by tropical forests // Global Change Biology. 2023. V. 29(17). P. 4811–4825.

A. V. Skorokhodov[1], T. B. Zhuravleva[2]
[1, 2]V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
[1]vazime@yandex.ru, [2]ztb@iao.ru

RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR-INDUCED FLUORESCENCE AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS FOR VARIOUS TYPES OF ECOSYSTEMS IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA BASED ON REANALYSIS AND SATELLITE DATA

Abstract. Solar-induced fluorescence is a promising indicator of plant photosynthetic activity for monitoring ecosystem productivity on a global scale. The paper discusses the dynamics of photosynthesis for various vegetation types in the south of Western Siberia using TROPOMI data for the period 2018–2024. The relationships between solar-induced fluorescence and temperature and humidity parameters of the environment, biophysical indicators, and radiation features are studied. The analysis is performed both for the entire target region as a whole and for individual latitudinal zones. The key factors that have the greatest impact on photosynthesis of various vegetation types are identified.

Keywords: photosynthesis dynamics, correlation analysis, solar-induced fluorescence, satellite data, vegetation types

УДК 528.88-631.42

А. С. Степанов[1], А. С. Бордаков[2],
Е. А. Фомина[3], Т. А. Асеева[4], К. Н. Дубровин[5]
[1, 3, 4] Дальневосточный НИИ сельского хозяйства, Хабаровский край, Восточное, Россия
[1, 2, 3, 5] Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
[1]stepanfx@mail.ru, [2]979artem979@gmail.com,
[3]eliz37@mail.ru, [4]aseeva59@mail.ru, [5]nob_keeper_93@mail.ru

МОНИТОРИНГ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ ПО ДАННЫМ ДЗЗ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Аннотация. Для эффективного управления пахотными землями целесообразно сочетать данные наземных наблюдений, космо- и аэрофотосъемки. В статье рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки продуктивности и неоднородностей развития посевов сельскохозяйственных культур, а также выявления засоренных посевов сои. Для опытных полей Хабаровского края в 2024 г. получены снимки спутника *Seninel-2,* осуществлена шестикратная аэрофотосъемка БПЛА *DJI Mavic3M*, произведен двухкратный отбор почвенных образцов. Для каждого пикселя сформированы аппроксимированные с использованием нелинейных функций временные ряды *NDVI*. Выявлены изменения агрохимических характеристик пахотного горизонта в ходе сезона. Установлены достоверные корреляционные связи между показателями продуктивности, влажностью, кислотностью, значениями *NDVI*. Пространственное распределение *NDVI* по данным *Sentinel-2* в августе 2024 г. соответствовало распределению по данным *DJI Mavic3M* (коэффициент корреляции превышал 0,85). Для исследуемых полей с соей по аппроксимированным кривым сезонного хода *NDVI* определялась засоренность посевов: от 5 до 15 % площади посевов сои были отнесены к засоренным. Описанные в статье подходы в дальнейшем станут основой системы комплексного мониторинга пахотных земель Хабаровского края при развитии точного земледелия.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, пахотные земли, аппроксимация, засоренность, неоднородность

Введение. В настоящее время в точном земледелии используются передовые цифровые технологии, большие массивы данных и аналитические методы для проведения комплексного мониторинга сельскохозяйственных полей с целью повышения продуктивности культур и эффективности АПК [1]. Среди разнообразных методов количественной оценки внутриполевой неоднородности наиболее перспективным и подходящим для обнаружения и последующего выделения ее границ является подход, базирующийся на сопряженной обработке данных ДДЗ и наземной информации [2]. При этом применение спутниковых и БПЛА данных в мониторинге имеет свои преимущества и недостатки, связанные с влиянием атмосферных явлений, затратами на съемку и обработку данных, разрешение, доступность

© Степанов А. С., Бордаков А. С., Фомина Е. А., Асеева Т. А., Дубровин К. Н., 2025

данных и т. д. [3]. Для Дальнего Востока, в связи с его особенностями, обусловленными климатическими, логистическими и прочими факторами, актуальна разработка подходов к проведению комплексного мониторинга земель сельхозназначения. В настоящей работе представлены результаты мониторинга полей Хабаровского края по данным наземных, спутниковых и БПЛА наблюдений, описаны методы оценки внутриполевых неоднородностей и засоренности полей с посевами сои.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования в 2024 г. рассматривались восемь опытных полей Хабаровского района Хабаровского края (произрастающие культуры: соя, овес; два поля относились к залежным землям). Ежемесячно в период с мая по октябрь проводилась аэрофотосъемка с использованием квадрокоптера *DJI Mavic3M*. Предобработанные значения каналов использовались для расчета значений *NDVI* с пространственным разрешением 1 м. Для этих же полей в вегетационный период получены снимки спутника *Sentinel-2* (10 м). Для каждого пикселя сформированы сезонные временные ряды *NDVI* с использованием нелинейных аппроксимирующих функций [4].

Отбор почвенных образцов производился с каждого поля дважды: в мае 2024 г. (до сева и внесения удобрения в почву) и в конце октября 2024 г. (после уборки поля).

В почвенных образцах нитратный азот ($N\text{-}NO_3$), мг/кг, аммонийный азот ($N\text{-}NH_4$), мг/кг и значения pH определялся потенциометрическим методом (по методу Кьельдаля); гидролитическая кислотность ($H_г$), мг-экв/100 г – методом Каппена; подвижный фосфор (P_2O_5), мг/100 г и обменный калий (K_2O), мг/100 г – методом Кирсанова; влажность – по ГОСТ 28268–89. Для посевов сои определялись показатели, характеризующие продуктивность (высота растений, масса 1 000 семян, число бобов и др.)

Результаты исследования. Содержание $N\text{-}NO_3$, $N\text{-}NH_4$ а также подвижных форм P_2O_5 и K_2O находилось в диапазонах от 12,42 до 50,30 мг/кг (V= 4 6,6 %), от 2,52 до 7,48 мг/кг (V = 36,1 %), от 2,42 до 7,63 мг/100 г (V = 36,0 %) и 2,36 до 6,86 мг/100 г (V = 40,2 %) соответственно. Вариабельность содержания $N\text{-}NO_3$, $N\text{-}NH_4$ и P_2O_5 снизилась к октябрю до 26,6 %, 33,2 % и 20,2 %. Значения влажности на 8 полях находились в диапазоне от 15,3 % до 29,0 % для первого отбора проб и в диапазоне от 18,6 % до 29 % для второго отбора проб. Кислотность почвы соответствовала кислым и слабокислым почвам – в первом отборе *pH* принадлежало интервалу 4,32–5,42; во втором – 3,92–5,60.

Пространственное распределение *NDVI* (включая зоны с высоким содержанием *NDVI*), смоделированное по данным *Sentinel-2*, в период значительного пополнения биомассы соответствовало распределению *NDVI*, полученному по данным *DJI Mavic3M*. В то же время распределение *NDVI*, сформированное по данным аэрофотосъемки в 1-й декаде октября, не вполне соответствовало распределению по спутниковым данным в октябре 2024 г. Это объяснялось более высокой пространственной изменчивостью значений *NDVI* в осенний период. С использованием вариограммного

анализа были построены карты пространственного распределения агрохимических и физико-химических характеристик, а также показателей продуктивности сои. Установлено соответствие значений *NDVI* в зонах неоднородности для *DJI* и *Sentinel-2* (снимки в период максимума вегетации). Коэффициент корреляции превышал 0,85 для каждого из опытных полей. В октябре значение коэффициента корреляции не превышало 0,5. Выявлены достоверные корреляционные связи между показателями продуктивности сои (высота растений, масса 1 000 семян, число бобов), а также влажностью и кислотностью, и значениями *NDVI*, полученными в результате обработки спутниковых снимков и изображений, полученных с БПЛА.

В результате было установлено, что оценка неоднородности сельскохозяйственных культур в пределах поля может быть проведена с достаточной точностью с использованием данных *Sentinel-2* с разрешением 10 м, что позволяет избежать трудоемких операций, связанных с аэрофотосъемкой и обработкой изображений, полученных с БПЛА. При этом для полей небольшого размера и с небольшими неоднородными участками предпочтительнее использовать БПЛА.

Оценка засоренности посевов сои на отдельных полях также проводилась попиксельно, на основе анализа характеристик аппроксимированных временных рядов *NDVI*. Как было ранее установлено, засоренные посевы сои характеризовались более продолжительным максимумом на кривой сезонного хода *NDVI* [5]. Для каждого пикселя на графике сезонного хода *NDVI* определялись две календарные даты, соответствующие половине максимального значения и максимуму *NDVI*. Продолжительность периода между двумя датами рассматривалась в качестве показателя засоренности. На рис. 1 представлено распределение засоренных и незасоренных пикселей для одного из полей.

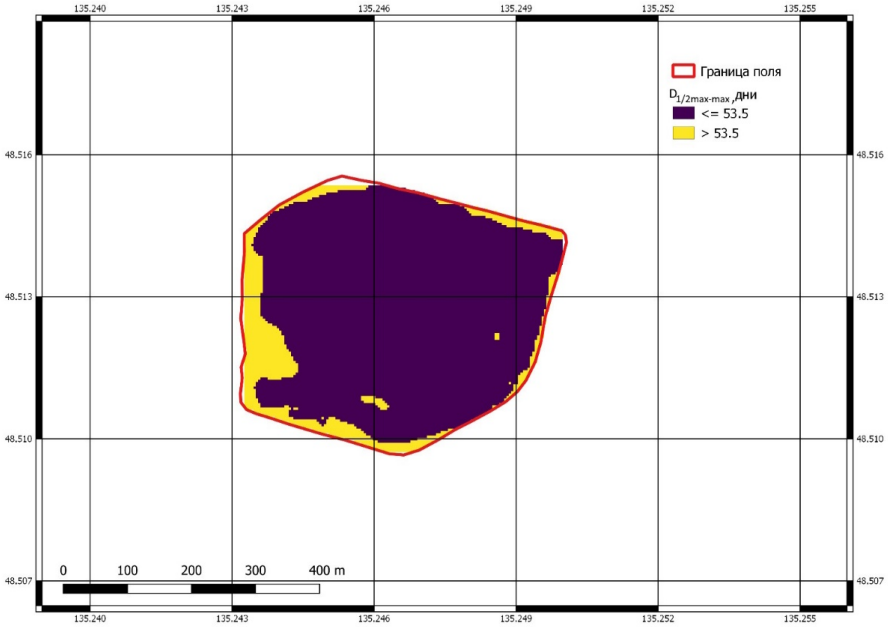


Рис. 1. Засоренность поля с соей (Хабаровский район, 2024 г). Засоренные участки (D > 53,5) выделены желтым

Для полей с соей Хабаровского района были выявлены засоренные участки и установлена общая засоренность полей – от 5 до 15 % кадастровой площади.

Заключение. Полученные результаты формируют основу для проведения дальнейших исследований, связанных с построением моделей продуктивности пахотных земель, выявления корреляционных связей между показателями пахотного горизонта и значениями вегетационных индексов, рассчитанных с помощью ДЗЗ. Определение внутриполевых неоднородностей возможно как с использованием космо-, так и аэрофотосъемки для полей небольших размеров. Для оценки засоренности полей сои и определения участков роста сорных культур на полях предложено применять аппроксимированные сезонные ряды *NDVI* для каждого пикселя. Установлено, что засоренность рассмотренных полей Хабаровского района составила 5–15 % общей площади этих полей. Дальнейшее направление исследований заключается в апробации предложенных подходов в других регионах российского Дальнего Востока, и разработке системы постоянного комплексного мониторинга с оценкой внутриполевых неоднородностей.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-11-20030) и Правительства Хабаровского края (соглашение № 106С/2024 от 31.07.2024).

Список источников

1. Гамзиков Г. П. Точное земледелие в Сибири: реальности, проблемы и перспективы // Земледелие. 2022. №. 1. С. 3–9.

2. Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23.

3. Нурмухаметов А. Л., Сидорчук Д. С., Коноваленко И. А., Никоноров А. В., Грачева М. А. Спектральная гармонизация данных БПЛА и данных спутниковой съемки для нужд точного земледелия // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 4. С. 335–346.

4. Степанов А. С., Фомина Е. А., Илларионова Л. В., Дубровин К. Н., Федосеев Д. В. Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 6. С. 1473–1498.

5. Stepanov A., Illarionova L., Aseeva T., Polyakov A. The use of satellite monitoring and aerial photography data to assess the heterogeneity of agricultural crops in the Khabarovsk Territory / // Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Fourth International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production, Singapore: Springer Nature Singapore. 2024.Vol. 397. P. 61–70.

A. S. Stepanov[1], A. S. Bordakov[2],
E. A. Fomina[3], T. A. Aseeva[4], K. N. Dubrovin[5]
[1, 3, 4] Far-Eastern Agriculture Research Institute, Vostochnoe, Russia
[1, 2, 3, 5] Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russia
[1]stepanfx@mail.ru, [2]979artem979@gmail.com,
[3]eliz37@mail.ru, [4]aseeva59@mail.ru, [5]nob_keeper_93@mail.ru

MONITORING OF AGRICULTURAL FIELDS (KHABAROVSK TERRITORY) BASED ON REMOTE SENSING AND GROUND-BASED OBSERVATIONS

Abstract. For effective management of arable lands, it is advisable to combine data from ground observations, space and aerial photography. The article discusses the application of remote sensing data to assess the productivity and heterogeneity of crop development, as well as the identification of clogged soybean crops. In 2024, images of the Sentinel-2 satellite were obtained for the experimental fields of the Khabarovsk Territory, a six-time aerial survey of the DJI Mavic 3M UAV was carried out, and soil samples were taken twice. NDVI time series approximated using nonlinear functions are formed for each pixel. Changes in the agrochemical characteristics of the arable horizon during the season have been revealed. Reliable correlations have been established between productivity indicators, humidity, acidity, and NDVI values. The spatial distribution of NDVI according to Sentinel-2 data in August 2024 corresponded to the distribution according to DJI Mavic3M data (the correlation coefficient exceeded 0.85 for each of the fields). For the studied soybean fields, crop contamination was determined using the approximated NDVI seasonal curves: from 10 to 15% of the soybean crop area was classified as polluted. The approaches described in the article will later become the basis of a comprehensive monitoring system for arable land in the Khabarovsk Territory in the development of precision agriculture.

Keywords: remote sensing, monitoring, arable lands, approximation, contamination, heterogeneity

УДК 528.94

В. П. Ступин[1], В. А. Хамедов[2]
[1] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия
[2] Сибирский государственный университете геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
[1]stupinigu@mail.ru

МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦМР *SRTM* ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

Аннотация. Представлены результаты геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) *SRTM* на территорию Южного Прибайкалья средствами *SAGA-GIS* в интересах изучения, картографирования и мониторинга опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Проанализированы состав и возможности различных модулей *SAGA-GIS* по получению морфологических, гидрологических и микроклиматических геоморфометрических параметров рельефа. Приведена интерпретация полученных параметров с точки зрения их применения для качественной и количественной оценки спектра, пораженности, интенсивности и потенциальной опасности ЭГП.

Ключевые слова: ГИС-анализ ЦМР, геоморфометрия, картографирование ЭГП

Введение. В Южном Прибайкалье отмечается наличие опасных экзогенных геологических процессов ЭГП – эрозии, паводков, селей, обвалов, осыпей, оползней, снежных лавин, образования наледей, абразии и др. [1; 2]. Особенно уязвимы прибрежные обжитые территории у подножия северного макросклона хребта Хамар-Дабан, по которым проходят Транссибирская железнодорожная магистраль, федеральная автомобильная трасса Р-258 «Байкал», линия ЛЭП-500, расположены населенные пункты, турбазы и промышленные предприятия.

Одним из основных факторов возникновения и развития опасных ЭГП является рельеф. Эффективными инструментом изучения рельефа является геоморфометрия, которая изучает теорию и практику аналитико-картографического анализа земной поверхности средствами ГИС и направлена на извлечение параметров и объектов земной поверхности с использованием входной цифровой модели рельефа (ЦМР) и программного обеспечения для его параметризации. Полученные данные используют в картографическом моделировании геолого-геоморфологических процессов, растительности, почв, землепользовании, ландшафтных исследованиях и т. п. [3].

Материалы и методы. В исследовании использовалась ЦМР *SRTM* с шагом сетки 3" (пространственное разрешение 90 м), созданная по данным

© Ступин В. П., Хамедов В. А., 2025

радарных систем *C-SIR* и *X-SAR*, полученным с борта космического челнока «Индевор» в 2000 г. В обработку были выключены тайлы ЦМР *SRTM* 57-02 и 58-02. Обработка осуществлялась с использование программы *SAGA GIS* 9.8.0, в которой была создана мозаика, обрезанная до территории северного макросклона хребта Хамар-Дабан от пос. Култук до р. Хара-Мурин (рис. 1).

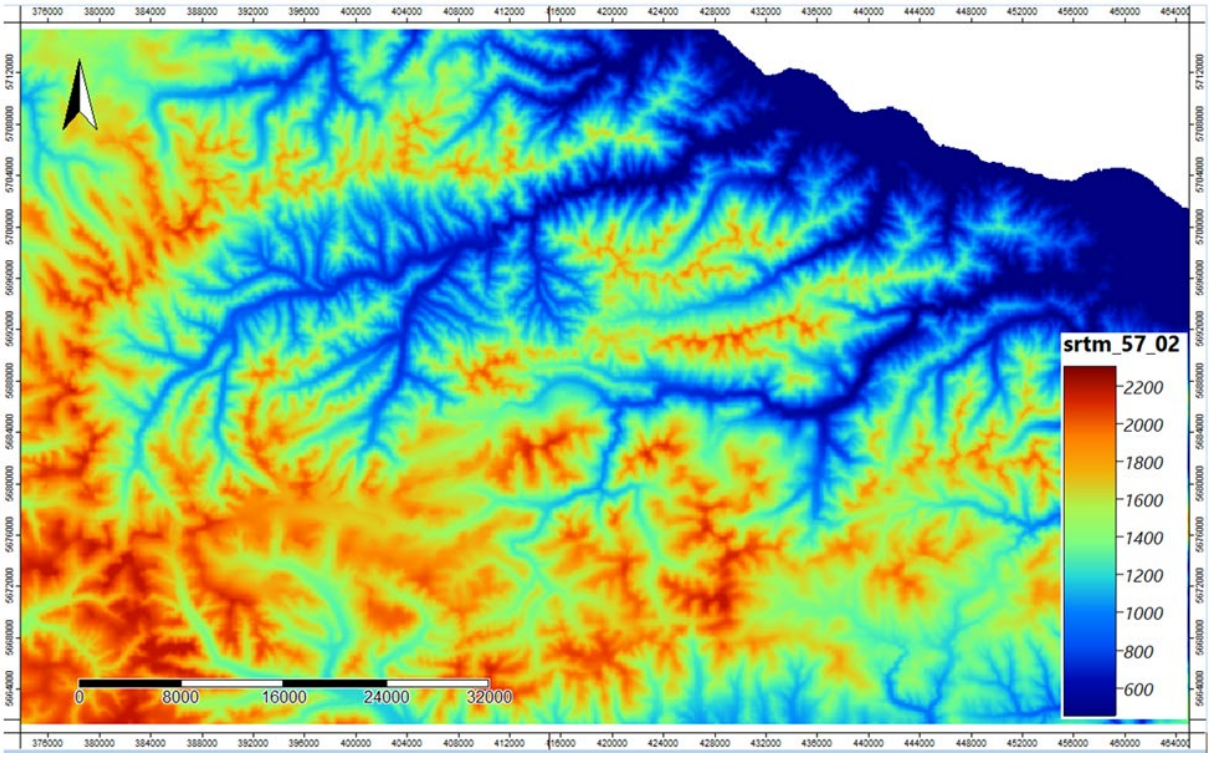


Рис. 1. Фрагмент *DEM SRTM* на территорию исследований

Выделяют три группы геоморфометрических параметров, получаемых в ГИС по ЦМР в целях анализа рельефа [4]:

– морфологические: крутизна, кривизна др., которые напрямую отображают геометрию территории, определяющую направленность, скорость и интенсивность склоновых процессов под действием силы тяжести;

– гидрологические: дренажные бассейны, сети тальвегов, различные индексы, зоны потенциального затопления и др., которые используются для оценки поверхностного стока, степени увлажнения почвы и условий перемещения обломочного материала;

– топографо-микроклиматические: экспозиция, потенциальная солнечная радиация, температура земной поверхности, воздействие ветра и др., которые определяют влияние земной поверхности на распределение солнечной радиации, характеристики температурного поля и выпадение осадков.

Обсуждение и выводы. В результате проведенного исследования была составлена серия геоморфометрических карт. Совместный анализ этих карт, космических снимков и ведомственных материалов позволил сделать рад выводов по связи геоморфометрических характеристик рельефа со спектром, пораженностью и интенсивностью ЭГП исследуемой территории.

Карты уклонов позволяют определить: локализацию и интенсивность поверхностного стока и линейной эрозий, которая заметно проявляется при уклонах 8–9°; наличие и мощность чехла рыхлых склоновых отложений; величину инсоляции, определяющей микроклиматические особенности склона (температуру и влажность рыхлых отложений, мощность деятельного слоя).

Выявлена зависимость между крутизной склонов и типом ведущих ЭГП.

Обвалы и осыпи происходят на склонах круче 40°. Лавины сходят при углах наклона между 25° и 60°, а их максимум приходится на углы 35–40°. Для возникновения селей необходима крутизна склона в верхней части 25–30°, в нижней 8–15°. При меньших уклонах движение селей затухает.

Высотная поясность обусловливает дифференциацию ЭГП по абсолютным высотам, а также спектр ЭГП, направленность, степень пораженности и интенсивность. Нами было выделено и локализовано по ЦМР шесть высотных морфодинамических поясов: прибрежно-равнинный, предгорно-равнинный, предгорный, низкогорный, подгольцовый и гольцовый.

Для прибрежно-равнинного пояса (456–550 м) характерны абразия, паводки, селевые выбросы, флювиальная аккумуляция, образование наледей, болотные процессы, а также высокая антропогенная нарушенность рельефа.

Для предгорно-равнинного пояса (550–700 м) характерны флювиальная эрозия и аккумуляция, долинные сели, активные техногенные процессы.

Для предгорного пояса (700–900 м) присущи флювиальная эрозия и аккумуляция, долинные паводки и сели, гравитационные процессы. Антропогенная нарушенность средняя.

В низкогорном поясе (700–1 200 м) господствуют эрозия, гравитационные денудационные процессы, криогенные процессы, крип, оползни, склоновые сели, осовы, сплывы. Антропогенная нарушенность низкая.

В подгольцовом поясе (1 200–1 500 м) развиты гравитационные, криогенные, флювиальные денудационные процессы, лавины, курумы. Антропогенная нарушенность отсутствует.

Наконец, в гольцовом поясе (выше 1 500 м) имеют место преимущественно элювиальные, гравитационные и криогенные процессы, курумы, крип. Антропогенная нарушенность отсутствует.

Карты горизонтальной кривизны выявляют выпуклые и вогнутые в плане поверхности, которые определяют области денудации и аккумуляции.

Карты вертикальной кривизны отображают выпуклые или вогнутые в профиле поверхности, для которых свойствена, соответственно, денудация или аккумуляция. Выпуклые склоны, покрытые чехлом рыхлых отложений, а также снегом, благоприятны для формирования оползней и схода снежных лавин.

Карты порядков водотоков, составленные в соответствии с бассейновой концепцией [5], позволили выделить сеть постоянных водотоков, сеть временных водотоков, территории с преобладающим плоскостным смывом,

тальвеги, по которым сходят склоновые сели, тальвеги, потенциально опасные с точки зрения прохождения паводков. Карты водосборов позволяют рассчитать запасы дождевых и талых вод, а также эрозионный потенциал паводков.

Карты экспозиции отражают инсоляцию склонов, а также положение относительно господствующих ветров, т. е. их микроклимат, температуру, влажность, испарение, мощность деятельного слоя, растительность, лавиноопасность.

Индексные карты позволяют выявить распределение влаги по водосборам, селеопасные русла и бассейны, оценить эрозионный потенциал рельефа и защитный потенциал растительного покрова, а также области, имеющие разный температурный режим земной поверхности, что определяет тип и интенсивность выветривания и характеристики мерзлых грунтов.

Заключение. Геоморфометрический анализ ЦМР средствами ГИС позволяет получить параметры рельефа в интересах создания картографической основы в целях изучения, анализа и картографирования ЭГП обширных и труднодоступных территорий.

Достоверность и информационные возможности такой основы возрастают, если полученные данные дополнены гидрологическими и топографомикроклиматическими параметрами рельефа, которые также могут быть получены по ЦМР средствами ГИС.

Список источников

1. Макаров С. А. Склоновые рельефообразующие процессы в таежной зоне хребта Хамар-Дабан // Генезис рельефа. Иркутск, 1995. С. 131–133.

2. Ступин В. П., Пластинин Л. А., Олзоев Б. Н. Возможности материалов дистанционного зондирования как информационной основы картографирования селевой опасности Байкальской горной области // ГеоРиск. 2020. Т. 14, № 2. С. 78–87. DOI 10.25296/1997-8669-2020-14-2-78-87.

3. Флоринский И. В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11, № 1. С. 18.

4. Evans I. S. Statistical Characterization of Altitude Matrices by Computer. An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. The Final Report on Grant DA-ERO-591-73-G0040. Durham: University of Durham, 1979. 192 p.

5. Корытный Л. М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН. 2001.

V. P. Stupin[1], V. A. Khamedov[2]
[1] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
[2] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
[2] Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
[1]stupinigu@mail.ru

MORPHODYNAMIC ANALYSIS OF DEM SRTM FOR MAPPING EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES OF SOUTHERN BAIKAL REGION

Abstract. The results of the geomorphometric analysis of the digital relief model (DEM) SRTM on the territory of the Southern Baikal region using SAGA-GIS tools in the interests of studying, mapping and monitoring dangerous exogenous geological processes (EGP) are presented. The composition and capabilities of various SAGA-GIS modules for obtaining morphological, hydrological, and microclimatic geomorphometric terrain parameters are analyzed. The interpretation of the obtained parameters from the point of view of their application for qualitative and quantitative assessment of the spectrum, severity, intensity and danger of EGP area is given.

Keywords: GIS analysis of DEM, geomorphometry, mapping of exogenous processes

УДК 630*621

С. К. Фарбер[1], Н. С. Кузьмик[2]
[1, 2]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[1]sfarber@ksc.krasn.ru, [2]kuzmik@ksc.krasn.ru

ПОДБОР ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ ДЛЯ ЗАКЛАДКИ ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОГЕННЫХ ЛИСТВЕННИЧНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Аннотация. Для определения таксационной характеристики пирогенных лиственничных насаждений разного возраста требуется подобрать места для закладки пробных площадей, для этого необходимо выполнить подбор лесотаксационных выделов на тестовом участке в Эвенкийском лесничестве Кислоканского участкового лесничества. Для выполнения этой работы в дистанционном режиме использовались данные массовой таксации насаждений, космические снимки разного времени, цифровая модель рельефа растра *SRTM*. Выявлялись дешифровочные признаки: конфигурация выдела, форма рельефа местности, следы хозяйственной деятельности, транспортная доступность. В результате работы были выявлены участки леса, на которых расположены пирогенные лиственничные насаждения в возрасте от 5 до 7 (лет), от 40 до 60 (лет) и около 100 лет.

Ключевые слова: пирогенные лиственничные насаждения, дешифровочные признаки, местоположение пробных площадей

В тестовый участок включены кварталы, расположенные около поселка Тура и стационара ИЛ СО РАН. Из пространственного анализа растра *SRMT* следует, что рельеф здесь холмистый, с наличием крутых уклонов, зачастую более 30 градусов (рис. 1).

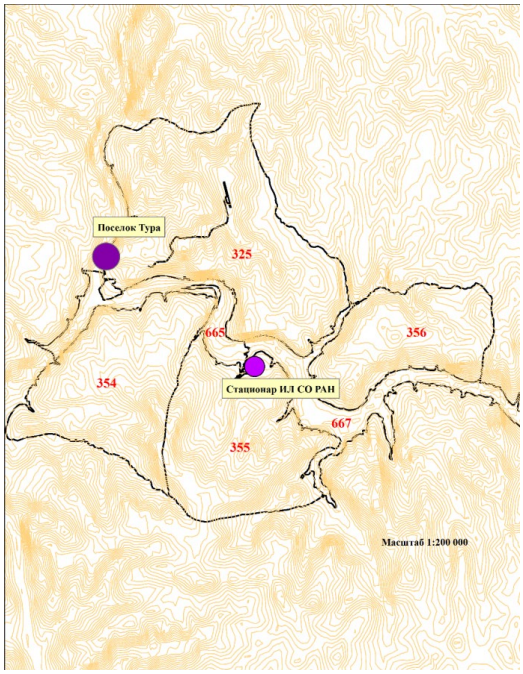


Рис. 1. Тестовый участок (кварталы, рельеф). Превышение между изолиниями 20 м

Лесоустройство обследуемого района проводилось в 1991–1992 гг. На тестовом участке произрастают насаждения хвойных и лиственных пород пирогенного и послерубочного происхождения. Кроме того, присутствуют другие категории земель – крутые склоны, каменистые россыпи и др. Исходные для выбора местоположений пробных площадей (ПП) данные: таксационные описания выделов, планшеты (доступны только в «бумажном» варианте); космические снимки *Landsat-5* 2010 г. и *Landsat-8* 2023 г.; интернет-ресурс *Google Earth Pro*.

Методика. Критерии поиска мест для закладки ПП - возраст древостоя и доступность участка. Это должны быть лиственничные насаждения пирогенного происхождения в возрасте от 5 до 7 лет, от 40 до 60 лет и около 100 лет. Поскольку склоны к реке Нижняя Тунгуска зачастую превышают 15–20 градусов, то закладка ПП здесь трудоемка. При выборе принимается во внимание наличие дорог. Потенциально доступными следует считать выделы, расположенные в пределах 3 км от дорог, места для ПП поэтому следует искать в выделах, примыкающих к дорогам и в непосредственной близости от п. Тура и стационара ИЛ СО РАН. Все другие местоположения тестового участка для закладки ПП не подходят.

Таким образом, поиск производится вдоль дороги из п. Тура в аэропорт и вдоль дороги от стационара ИЛ СО РАН в южном направлении (в кварталах 325, 355). Отсутствие цифрового варианта таксационных описаний насаждений означает невозможность сортировки выделов, поэтому выбор местоположений для ПП может быть основан только на визуальном сличении ситуации на планшетах, космических снимках с таксационными описаниями насаждений. Дешифровочные признаки – конфигурация выдела, форма рельефа местности, следы хозяйственной деятельности. Поскольку лесоустройство производилось в 1991–1992 гг. то следует учесть, что к 2024 г. возраст древостоев увеличился на 32 года. Насаждения полученного списка выделов далее распределяются по происхождению (направлению сукцессии). Насаждения пирогенного происхождения принимаются в качестве потенциально возможных для закладки в них ПП.

Результаты. Условиям поиска потенциально возможных мест для закладки ПП пирогенных лиственничных насаждений в возрасте от 40 до 60 лет и около 100 лет отвечают выделы 36, 52, 54 квартала 325; 9, 18, 25, 31, 37 квартала 355 (табл. 1).

Выделы лиственничных насаждений в возрасте 5–7 лет. Календарная дата (1991–1992 гг.) проведения лесоустройства исключает возможность поиска лиственничников, которые к настоящему времени достигли возраста 5–7 лет. Единственно возможный вариант – обнаружение следов лесных пожаров, которые образовались на тестовом участке с 1992 по 2023 г. Поиск мест пожара проведен посредством сличения снимков *Landsat* 1973, 2013, 2023 гг. [1; 2]. Композит разновременных снимков создан посредством объединения каналов: красный из снимка 2023 г. – красный из старого снимка – красный из снимка 2023 г. – красный из старого

снимка – ближний ИК из снимка 2023 г. Комбинация каналов разновременных снимков 2013 и 2023 гг. (рис. 2).

Таблица 1

Таксационные показатели насаждений
потенциально пригодных для закладки ПП

Квартал	Выдел	Тип леса	Древостой			
			состав	полнота	возраст в 1992 г.	возраст в 2024 г.
325	36	кустарниковый	10Л	0,4	80	112
	52	кустарниковый	10Л	0,3	80	112
	54	кустарниковый	10Л	0,4	20	52
355	9	кустарниковый	10Л	0,4	80	112
	18	лишайниковый	10Л	0,3	80	112
	25	лишайниковый	10Л	0,3	80	112
	31	лишайниковый	10Л	0,4	80	112
	37	лишайниковый	10Л	0,4	20	52

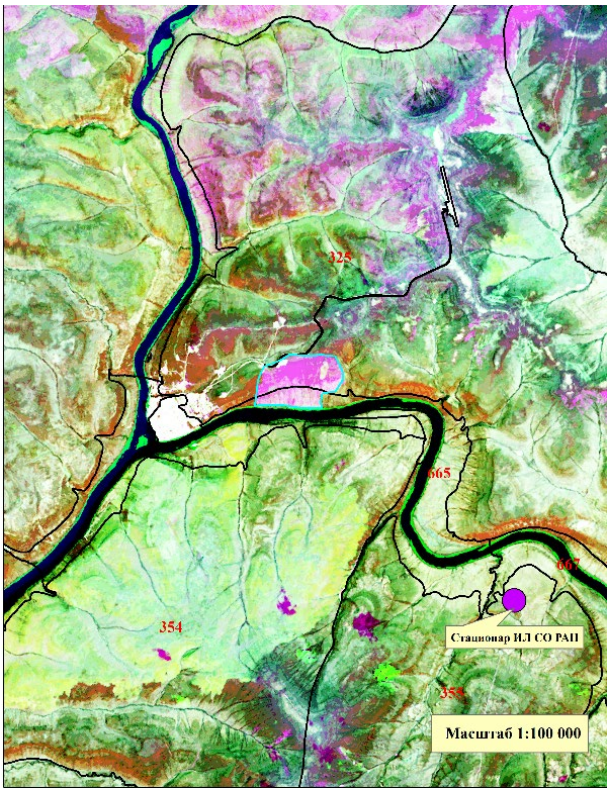


Рис. 2. Комбинация каналов *Landsat*, 2013 и 2023 гг. (гарь оконтурена голубым цветом)

Изменения на композитном снимке проявились в красных цветовых тонах. Причины изменений разные. В пределах тестового участка обособляется участок гари, расположенный справа от поселка Тура (рис. 2). На снимке 2013 г. гари еще нет (рис. 3). На снимке 2017 г. (*Google Earth Pro*) гарь уже есть (рис. 4). Предположительно пожар был в 2014 или 2015 г.

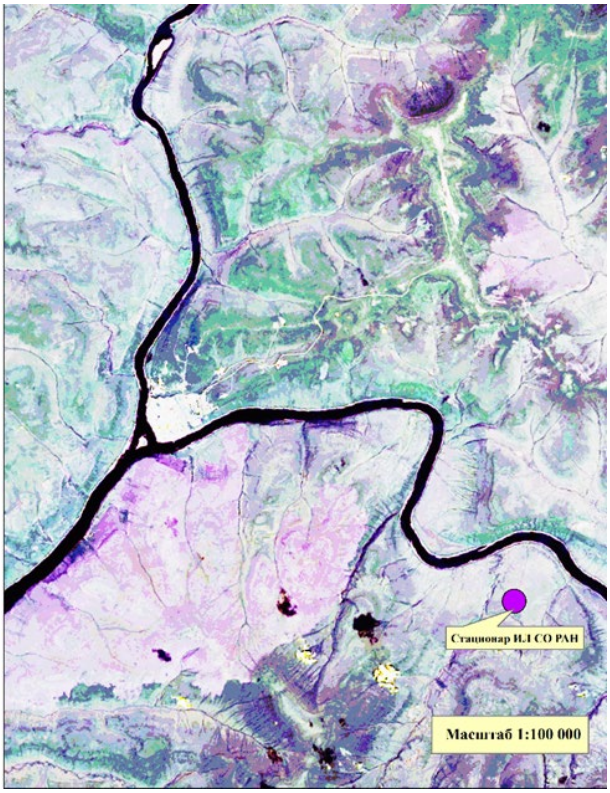


Рис. 3. Снимок *Landsat*, 2013 г.

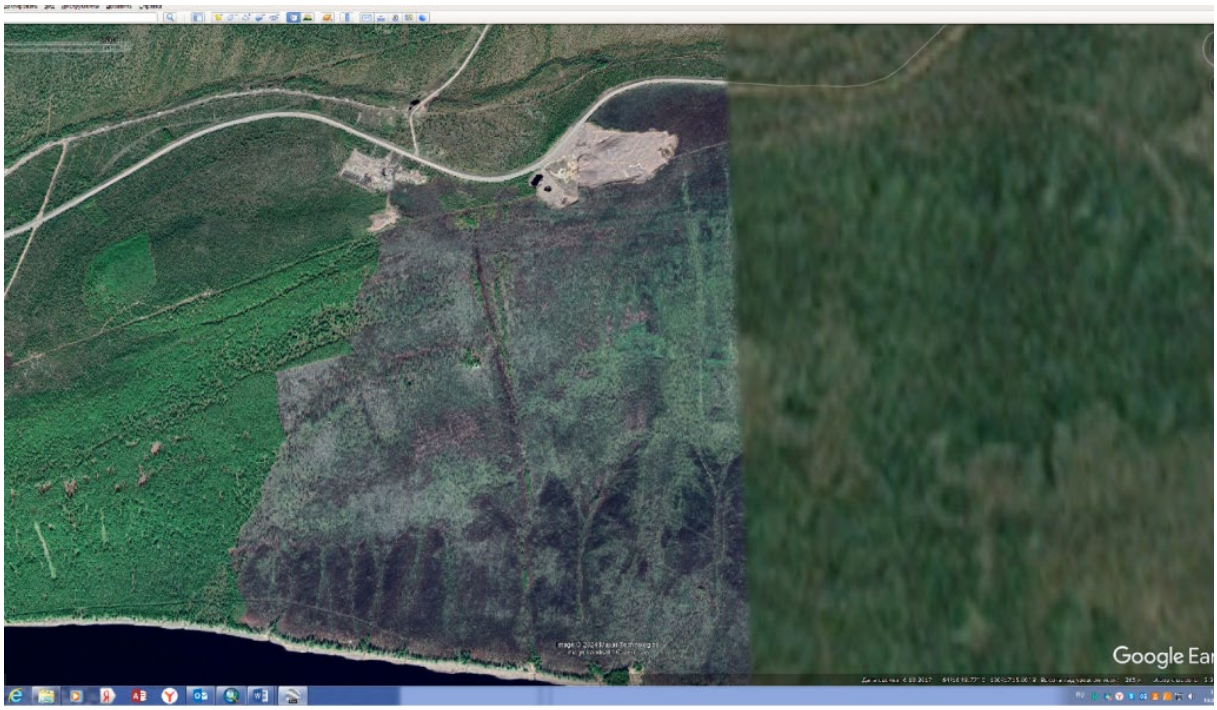


Рис. 4. Гарь на снимке 2017 г. (*Google Earth Pro*)

В случае успешного лесовосстановления здесь к настоящему времени уже может произрастать молодой лес в возрасте около 5 лет с участием в породном составе лиственницы. Местоположение гари доступное для транспорта и со стороны дороги подходит для закладки ПП.

Вывод. Лесотаксационный анализ насаждений с привлечением материалов космических съемок позволяет эффективно выявлять потенциально возможные местоположения для закладки пробных площадей, отвечающих заданным условиям. Применительно к насаждениям от 40 и более лет исчерпывающие исходные данные содержатся в таксационных описаниях выделов. Для поиска сосняков от 5 до 7 лет дополнительно потребовался анализ разновременных космических снимков.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания «Роль природных и антропогенных факторов в системе устойчивого управления лесами Сибири» (рег. № 124012900559-4).

Список источников

1. Плотникова М. А., Хлебникова Е. П. Исследование методов выявления изменений территорий по разновременным космическим изображениям // Интерэкспо ГеоСибирь. 2020. Т. 6, № 2. С. 48–58.

2. Йехиа Мики. Выявление изменений по разновременным многоспектральным космическим снимкам при мониторинге территорий // Геодезия и картография. 2010. № 2. С. 15–19.

S. K. Farber[1], N. S. Kuzmik[2]

[1, 2]Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

[1]sfarber@ksc.krasn.ru, [2]kuzmik@ksc.krasn.ru

SELECTION OF FOREST TAXATION AREAS FOR PLANTING TEST AREAS FOR THE STUDY OF PYROGENIC LARCH PLANTATIONS

Abstract. To determine the taxation characteristics of pyrogenic larch plantations of different ages, it is necessary to select places for laying trial areas (PP). For this, it is necessary to select forest taxa allotments at the test site in the Evenki forestry of the Kislokan district forestry. To perform this work remotely, data from mass taxation of plantings, satellite images of different times, and a digital terrain model of the SRMT raster were used. Decoding features were identified: the configuration of the allotment, the shape of the terrain, traces of economic activity, and transport accessibility. As a result of the work, areas of forest were identified, which are located pyrogenic larch plantations aged from 5 to 7 (years), from 40 to 60 (years) and about 100 years.

Keywords: pyrogenic larch plantations, deciphering signs, location of test areas

УДК 631.459:528.9

Г. Ф. Хасанова
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
galimakhasanova@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС ПРИ ОЦЕНКЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УФЫ)

Аннотация. В статье рассматривается применение геоинформационных систем (ГИС) для оценки эрозионных процессов на территории г. Уфы. На основе цифровых моделей рельефа, данных дистанционного зондирования и гидрометеорологических показателей проведен анализ факторов эрозии. Особое внимание уделено влиянию ливневых осадков (*R*-фактор 40–60 МДж·мм/(га·ч·год)) на развитие овражной сети в условиях урбанизированной территории. Полученные результаты позволяют определить приоритетные участки для проведения противоэрозионных мероприятий. Исследование демонстрирует эффективность ГИС-технологий для пространственного анализа и прогнозирования эрозионных процессов в условиях сложного рельефа г. Уфы.

Ключевые слова: геоинформационные системы, *USLE*, овражная эрозия, цифровая модель рельефа, г. Уфа

Введение. Город Уфа входит в десятку крупнейших городов России по численности и занимает пятое место по площади и протяженности. Высокая концентрация населения, промышленных и гражданских объектов, развитость инфраструктуры порождает ряд экологических проблем, таких как ухудшение среды обитания (воздуха, почв, воды, геологической среды).

Эрозионные процессы представляют серьезную угрозу для устойчивого развития урбанизированных территорий. Город Уфа, расположенный на холмистой местности с развитой гидрографической сетью, подвержен активному проявлению эрозии. Традиционные методы оценки эрозионных процессов трудоемки и не всегда обеспечивают достаточную точность, в связи с чем применение геоинформационных систем (ГИС) становится актуальным инструментом для пространственного анализа и прогнозирования.

Цель исследования – оценить интенсивность склоново-эрозионных процессов на территории Уфы с использованием ГИС-технологий.

Развитию эрозионных процессов в Уфе предшествуют несколько факторов: 1) геологический – в геолого-тектоническом отношении территория города расположена на восточной окраине Русской платформы, где кристаллический фундамент перекрыт мощной (до 8 км) толщей осадочных пород палеозойского возраста. В верхней части осадочного чехла развиты пермские, неогеновые и четвертичные осадки [1]. Толща рыхлых неоген-четвертичных осадочных пород весьма неустойчива к размыву во время интенсивных осадков и снеготаяния; 2) геоморфологический – рельеф города имеет холмисто-увалистый характер с амплитудой высот от 80 до 220 м, переходящий в виде крутых склонов в сторону рек Белая, Уфа и Сутолока, повышающие скорости течения поверхностных вод; 3) гидролого-климатические

условия – поверхностный сток формируется за счет осадков, причем важно не количество осадков за определенный период, а их интенсивность или скорость снеготаяния. Для оценки фактора эрозионной активности дождевых осадков и их интенсивности учитывается показатель *R*, который отражает кинетическую энергию дождевых осадков и их интенсивность. *R*-фактор (*USLE*) для г. Уфы составляет 40–60 МДж·мм/(га·ч·год) [2], что характеризуется как *средневысокий* показатель, указывающий на *умеренную, но значительную эрозионную угрозу*, особенно в сочетании с крутыми склонами, с рыхлыми грунтами и высокой антропогенной нагрузкой .

Материалы и методы исследования. Методами исследования являются полевые маршрутные наблюдения районов распространения, геоморфологическое картирование, дистанционного зондирования, прогнозирования. Маршрутные наблюдения проводились с целью выявления признаков эрозии, таких как овраги, промоины, обнажения грунта, изменения характеристик рельефа. Геоморфологическое картирование – создание карт эрозионных процессов, определяющих масштабы и типы эрозии, а также выявление ключевых факторов, влияющих на ее развитие. Методы дистанционного наблюдения – определение потенциально опасных склонов в программе *SAGA GIS* – морфометрический анализ, сравнительный анализ космоснимков (*STRM*) на данную территорию за определенный промежуток времени, также наложение карт вышеперечисленных факторов.

Результаты и обсуждения. На исследуемой территории преобладает овражная эрозия, которая подразделяется на эрозионную, карстовую и карстово-эрозионную. Прослеживается прямая взаимосвязь между индексом пересеченности рельефа и развитием овражной эрозии (рис. 1, 2): фактическое распространение овражной сети совпадает с наиболее крутыми склонами (территория Уфимского карстового косогора). Развитию оврагов способствует значительная приподнятость холмов (Уфимский карстовый косогор) над долинами рек и аккумулятивными террасами; средневысокие показатели интенсивности осадков; наличие рыхлых неоген-четвертичных отложений и выходы подземных вод.

Антропогенный фактор играет также важную роль в образовании эрозионных процессов в городе. Выражается формированием искусственных склонов большой крутизны, например, при образовании насыпей, подрезке пологих склонов, формировании выемок.

Рекомендации по улучшению геоэкологического состояния Уфы: 1) организация постоянного мониторинга склоновых процессов посредством маршрутных исследований и БПЛА, отражение их в интерактивных картах общего доступа, в Государственном докладе о состоянии окружающей среды; 2) укрепление искусственно созданных склонов путем посадки древесных растений; 3) уменьшение антропогенной нагрузки на потенциально опасных участках; 4) принятие архитектурных решений в согласии с геолого-геоморфологическими условиями территории.

Индексы пересеченности рельефа (TRI) г. Уфы

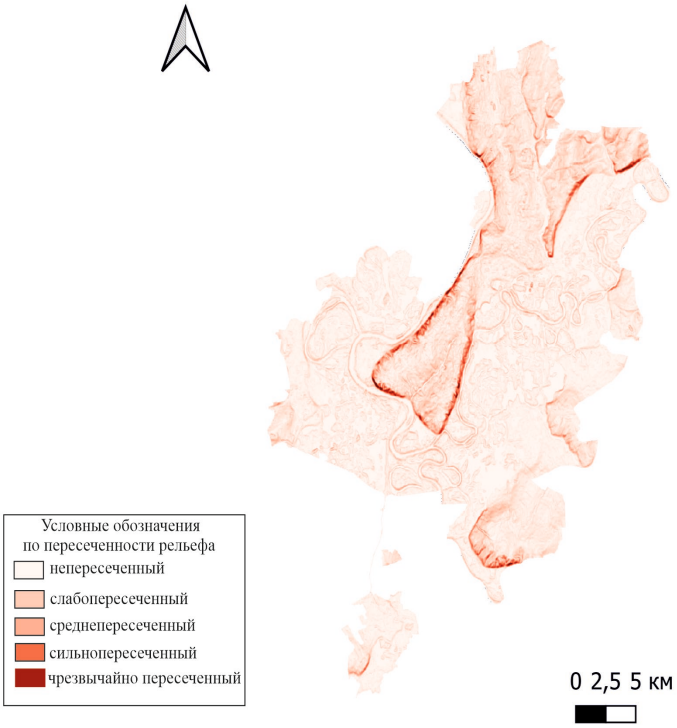


Рис. 1. Карта индекса пересеченности рельефа

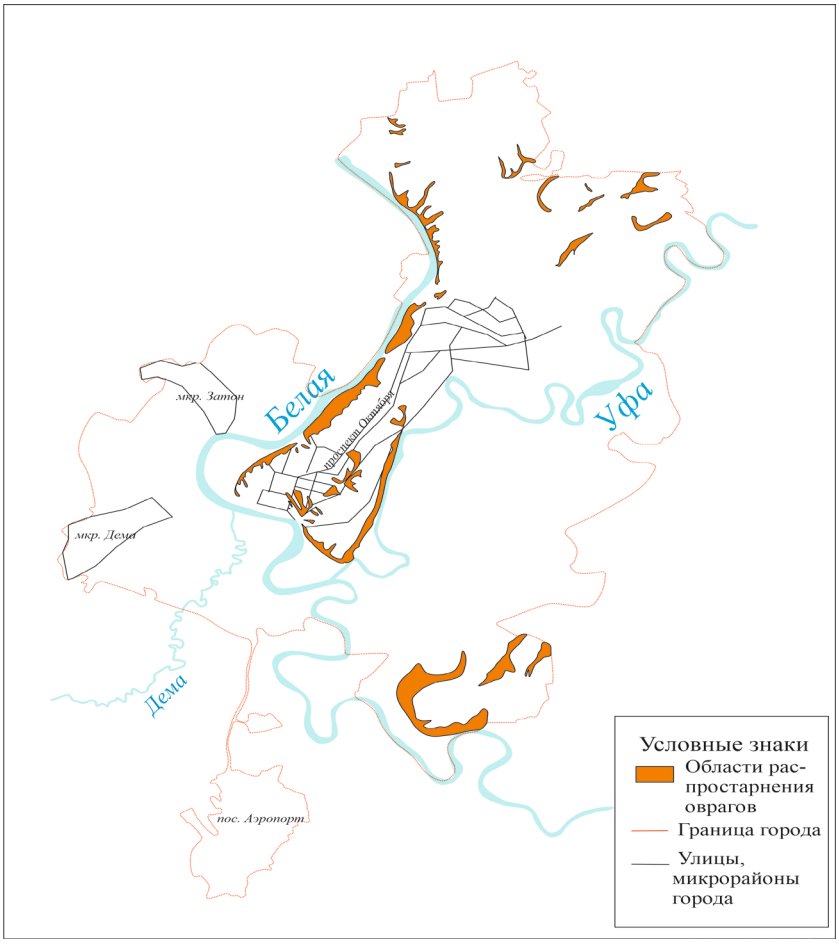


Рис. 2. Области распространения оврагов в Уфе

Список источников

1. Ожиганова О. И. О стратиграфии района г.Уфы // Очерки по стратиграфии Южного Урала. Уфа: Башгосиздат, 1940. С. 69–80.

2. Хабиров И. К., Хабирова Ф. И. Оценка эрозионных процессов в Республике Башкортостан с использованием USLE // Почвоведение, № 4, 2015. С. 45–52.

G. F. Khasanova
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
galimakhasanova@gmail.com

APPLICATION OF LOGGING IN THE ASSESSMENT OF EROSION PROCESSES (ON THE EXAMPLE OF UFA)

Abstract. The article discusses the use of geoinformation systems (GIS) to assess erosion processes in Ufa. Erosion factors were analyzed on the basis of digital terrain models, remote sensing data and hydrometeorological indicators. Particular attention is paid to the effect of rainfall (R-factor 40-60 MJ • mm/(ha • h • year)) on the development of the ravine network in an urbanized area. The results obtained make it possible to determine priority areas for anti-erosion measures. The study demonstrates the effectiveness of GIS technologies for spatial analysis and forecasting of erosion processes in the complex terrain of Ufa.

Keywords: geographic information systems, USLE, ravine erosion, digital relief model, Ufa

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 528.837:629.78:621-83:517.938

С. А. Бронов[1], М. А. Вайман[2],
А. А. Бисов[3], А. А. Чумаченко[4], П. В. Авласко[5]
[1, 2] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[3, 4] АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Россия
[5] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
nul-sapr@mail.ru

СИСТЕМА МНОГОКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Рассмотрены перспективы одновременного использования нескольких способов управления электроприводом с индукторным двигателем двойного питания для исполнительных устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, например, для систем поворота антенн, солнечных батарей, измерительных устройств и т. п. Показано, что использование индукторных двигателей двойного питания в сочетании с многоканальным микропроцессорным управлением позволяет существенно повысить функциональные возможности исполнительных устройств, снабженных электроприводами с такими двигателями.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, исполнительные устройства, системы автоматического управления

Введение. Исполнительные устройства являются важной частью космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли. Они обеспечивают перемещение рабочих механизмов, предназначенных для исследования поверхности Земли, а также работают в составе других установок – систем поворота антенн, солнечных батарей и др. К электроприводам таких исполнительных устройств предъявляются различные требования, в том числе по массогабаритным показателям и функциональным характеристикам [1; 2]. Традиционные технические решения в данном случае не всегда могут обеспечить выполнение этих требований. В данной работе рассматриваются электроприводы на основе индукторных двигателей двойного питания (ИДДП), которые в ряде случаев имеют преимущества перед традиционными двигателями.

© Бронов С. А., Вайман М. А., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В., 2025

У ИДДП на статоре с явно выраженными зубцами в соответствующих пазах располагаются две многофазные обмотки, которые запитываются от отдельных многофазных источников напряжения. На зубчатом роторе обмотки отсутствуют. Работа ИДДП осуществляется с использованием зубчатых гармоник поля, образующегося в воздушном зазоре между статором и ротором.

Управление ИДДП осуществляется изменением частот, амплитуд и регулируемых фазовых сдвигов питающих напряжений. Всего имеется 6 управляющих воздействий (рис. 1).

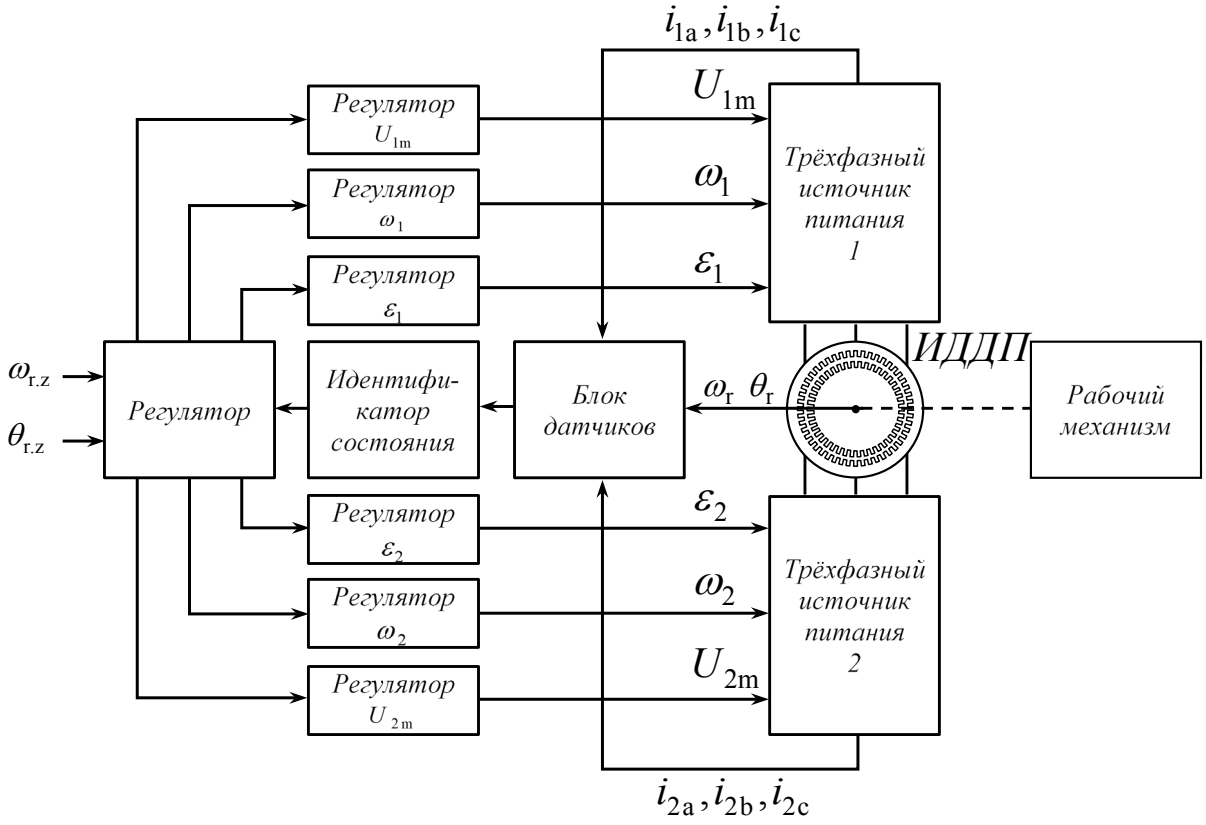


Рис. 1. Обобщенная структурная схема электропривода с ИДДП с многоканальным регулятором

На схеме (рис. 1) показаны индукторный двигатель двойного питания ИДДП, к валу которого подсоединен *Рабочий механизм*, *Трехфазные источники питания 1* и *2*, от которых запитаны первая и вторая статорные обмотки ИДДП. На входы *Блока датчиков* поступают сигналы обратной связи от источников питания (токи i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}), а также текущие значения скорости ω_r и угла поворота θ_r. Все эти сигналы с выхода *Блока датчиков* поступают на вход *Идентификатора состояния*, который определяет режим работы ИДДП. На вход *Регулятора* поступают сигналы задания скорости $\omega_{r.z}$ и угла поворота $\theta_{r.z}$ вала двигателя. Ещё на один вход регулятора поступает информация о режиме работы от *Идентификатора состояния*. *Регулятор* анализирует эту информацию, а также заданные значения скоро-

сти и угла поворота и вырабатывает сигналы задания по амплитудам, частотам и регулируемым фазовым сдвигам питающих напряжений. Эти сигналы поступают на соответствующие *Регуляторы*, а через них – на соответствующие входы *Трехфазных источников напряжения*.

Рассматриваемые электроприводы с ИДДП могут быть скоростными или позиционными. В позиционных электроприводах регулируемой величиной является угол поворота. В скоростных электроприводах регулируемой величиной является угловая скорость вала. В связи с этим на входе регулятора показаны два сигнала – задание угла и задание скорости. При этом скорость и угол поворота взаимосвязаны: скорость является производной угла поворота, а угол является интегралом от скорости.

Поэтому в позиционных электроприводах задается функция изменения угла поворота от времени:

$$\theta_{r.z} = f_{\theta}(t).$$

При этом скорость будет определяться как производная функции задания угла поворота:

$$\omega_{r.z} = f_{\omega}(t) = \frac{d}{dt} f_{\theta}(t),$$

т. е. при задании функции изменения угла поворота функция изменения скорости не задается.

Аналогично для скоростных электроприводов задается функция скорости:

$$\omega_{r.z} = f_{\omega}(t).$$

А функция изменения угла поворота определяется как интеграл от нее:

$$\theta_{r.z} = f_{\theta}(t) = \int f_{\omega}(t)dt,$$

поэтому функция изменения угла поворота в этом случае не задается.

Системы управления, отрабатывающие произвольные изменения входного сигнала, называются следящими системами, т. е. выходная величина должна отслеживать все изменения заданного сигнала.

Но бывают ситуации, когда необходимо задавать обе функции, при этом одна из них является основной, а вторая – вспомогательной. С точки зрения теории автоматического управления можно построить системы с внешним и внутренним контурами управления. Система будет иметь внешний контур управления по углу поворота и внутренний контур управления по скорости. Это может повысить точность работы всей системы.

Режимы работы ИДДП можно разделить на статические (работа при постоянной, при нулевой, скорости, т. е. при удержании вала двигателя

в неподвижном состоянии) и динамические (при изменении угловой скорости вала).

В статическом (установившемся) режиме работы может стоять задача обеспечения заданной скорости (в скоростных электроприводах) или заданного угла поворота (в позиционных электроприводах). Для этого следует выбрать соответствующие значения частот и амплитуд питающих напряжений.

В динамическом (переходном) режиме работы обеспечивается изменение скорости или угла поворота в соответствии с заданными значениями. Это может быть переход из одного состояния в новое, а также непрерывное изменение скорости и угла поворота вала двигателя в следящем режиме.

Применительно к космическим аппаратам такие режимы работы обычно связаны с изменением положения регистрирующих приборов (видеокамер и др.), направленных в определенные точки на земной поверхности, а также с отработкой направления антенны в заданную точку земной поверхности или солнечной батареи на Солнце.

Идентификатор состояния на схеме (рис. 1) определяет режим работы электропривода и на основании этого формирует задающие сигналы для трехфазных источников питания по управляющим величинам – амплитудам, частотам и регулируемым фазовым сдвигам.

Многообразие возможных сочетаний управляющих величин – двух амплитуд, двух частот, двух регулируемых фазовых сдвигов – обеспечивает дополнительные возможности для получения требуемых показателей качества регулирования, но одновременно создает некоторую неопределенность их выбора, так как одни и те же значения регулируемых величин можно реализовать различными сочетаниями управляющих величин. Таким образом, можно говорить об избыточности управления в электроприводах с индукторными двигателями двойного питания.

Предлагается использовать избыточность управления для обеспечения дополнительных качеств электропривода, например, для минимизации электрических потерь в обмотках, уменьшения времени переходного процесса, повышения плавности вращения и т. д.

Заключение. Наличие нескольких каналов управления индукторными двигателями двойного питания позволяет расширить функциональные возможности электроприводов на их основе, что особенно важно для космических аппаратов различного назначения, в том числе для дистанционного зондирования Земли. Дальнейшее развитие этого подхода предоставляет новые возможности проектирования систем управления электроприводами для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

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. Амбросенко Н. Д., Миндалев И. В., Титовская Н. В., Шевцова Л. Н. Цифровые образовательные модели и технологии: анализ возможностей и опыт применения //

Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ». Красноярск, 2022. С. 12–15.

S. A. Bronov[1], M. A. Vajman[2],
A. A. Bisov[3], A. A. Chumachenko[4], P. V. Avlasko[5]
[1, 2] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
[3, 4] AO «NPP «Radiosvyaz», Krasnoyarsk, Russian Federation
[5] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
nul-sapr@mail.ru

MULTI-CHANNEL CONTROL SYSTEM FOR EXECUTIVE ELECTRIC DRIVES OF SPACECRAFT FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

Abstract. The prospects of simultaneous use of several methods of controlling an electric drive with a dual-power inductor motor for actuators of remote sensing spacecraft, for example, for antenna rotation systems, solar panels, measuring devices, etc., are considered. It is shown that the use of dual-power inductor motors in combination with multi-channel microprocessor control can significantly increase the functionality of actuators equipped with electric drives with such motors.

Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, actuators, automatic control systems

УДК 528.837:629.78:621-83:517.938

С. А. Бронов[1], М. А. Вайман[2],
А. А. Бисов[3], А. А. Чумаченко[4], П. В. Авласко[5]
[1,2] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
[3,4] АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Россия
[5] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
nul-sapr@mail.ru

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С НАСТРАИВАЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Представлен новый подход к построению систем автоматического управления электроприводами космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, основанный на использовании электроприводов с избыточным управлением на примере индукторного двигателя двойного питания. Показано, что при синтезе регуляторов с использованием методов линейной теории автоматического управления получаемые законы управления содержат параметры, зависящие от значений управляющих переменных и переменных состояния. Поэтому рассчитанные ранее показатели качества регулирования не всегда сохраняются при изменении управляющих переменных в широком диапазоне значений. Для обеспечения постоянства показателей качества регулирования предложено использовать возможности избыточных управляющих переменных, выбирая такие их сочетания, при которых параметры модели двигателя остаются постоянными.

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

Введение. В исполнительных электроприводах космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли применяются электродвигатели различного типа [1; 2]. Перспективными для этих целей являются индукторные двигатели двойного питания (ИДДП). Статор и ротор этих двигателей собираются из пластин электротехнической стали с явно выраженными зубцами, в результате чего создается зубчатый воздушный зазор. В пазы статора укладывается две трехфазные обмотки, которые питаются трехфазными напряжениями переменного тока. Угловая скорость ротора равна разности частот питающих напряжений, деленной на число зубцов ротора. При этом электромагнитный момент двигателя пропорционален числу зубцов ротора. Таким образом в двигателе реализуется частотно-разностное управление, при котором можно обеспечить очень низкие скорости вращения ротора при близости значений двух частот. Двигатель управляется изменением частот, амплитуд и регулируемых фазовых сдвигов двух питающих напряжений, т. е. имеется шесть управляющих переменных. На базе индукторного двигателя двойного питания можно создавать скоростные

© Бронов С. А., Вайман М. А., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В., 2025

и позиционные электроприводы с разнообразными функциональными свойствами. Системы автоматического управления разрабатываются на основе математических моделей двигателя и других устройств, составляющих электропривод.

Математическая модель ИДДП содержит систему обыкновенных дифференциальных уравнений электрического равновесия, которая в матричной форме имеет вид:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{d}{dt}\begin{bmatrix}\overline{\psi}_1\\ \overline{\psi}_2\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\mathbf{R}_1 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{i}_1\\ \overline{i}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\overline{u}_1\\ \overline{u}_2\end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix}\overline{\psi}_1\\ \overline{\psi}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_{1,2}\\ \mathbf{L}_{2,1} & \mathbf{L}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{i}_1\\ \overline{i}_2\end{bmatrix}; \\ M = 0{,}5\dfrac{\partial}{\partial\theta_{\mathrm{r}}}\begin{bmatrix}\overline{\psi}_1\\ \overline{\psi}_2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\overline{i}_1\\ \overline{i}_2\end{bmatrix}; \end{array}\right\} \quad \left.\begin{array}{l} \dfrac{d\omega_r}{dt} = \dfrac{1}{J}(M + M_s); \\ \dfrac{d\theta_r}{dt} = \omega_r; \end{array}\right\}$$

$$\left.\begin{array}{l} u_{1k}(t) = U_{1m}(t)\cdot\cos\left[\gamma_{1k} + \theta_1 + \varepsilon_1(t)\right]; \\ u_{2k}(t) = U_{2m}(t)\cdot\cos\left[\gamma_{2k} + \theta_2 + \varepsilon_2(t)\right]; \end{array}\right\} \quad \left.\begin{array}{l} \dfrac{d\theta_1}{dt} = \omega_1(t); \\ \dfrac{d\theta_2}{dt} = \omega_2(t), \end{array}\right\},$$

где $\overline{\psi}$ – векторы потокосцеплений соответствующих обмоток; $\overline{i}$ – векторы токов соответствующих обмоток; $\overline{u}$ – векторы питающих напряжений соответствующих обмоток; $\mathbf{R}$ – матрицы сопротивлений обмоток; $\mathbf{L}$ – собственные и взаимные индуктивности обмоток; M – электромагнитный момент; M_{s} – статический момент нагрузки; ω_r – угловая скорость ротора; θ_r – угол поворота ротора; u_{1k}, u_{2k} – фазные напряжения первой обмотки ($k = a,b,c$ – обозначение фазы); U_{1m}, U_{2m} – амплитуды первого и второго питающих напряжений; γ_{1k}, γ_{2k} – постоянные фазовые сдвиги питающих напряжений, соответствующие числу фаз обмоток; θ_1, θ_2 – текущие фазовые сдвиги; ε_1, ε_2 – регулируемые фазовые сдвиги; ω_1, ω_2 – частоты питающих напряжений.

При проектировании систем автоматического управления обычно используются методы линейной теории. Для этого модели всех устройств должны быть линейными. При этом применяется линеаризация в приращениях, в соответствии с которой все переменные и функции от них разлагаются в ряд Тейлора. В этом случае приведенная выше модель преобразуется следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\overline{x}}{dt} &= \mathbf{A}\overline{x} + \mathbf{B}\overline{u}; \\ \overline{y} &= \mathbf{C}\overline{x} + \mathbf{D}\overline{u}\ , \end{aligned}\right\}$$

где $\overline{x}$ – вектор приращений переменных состояния (потокосцеплений); $\overline{u}$ – вектор приращений управляющих переменных (амплитуд, частот, регулируемых фазовых сдвигов); $\overline{y}$ – вектор выходных переменных (скорость, угол поворота, угол нагрузки, токи и др.).

Матрицы коэффициентов $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ содержат комбинацию параметров двигателя (сопротивлений и индуктивностей обмоток), переменных состояния (потокосцеплений) и управляющих переменных:

$\mathbf{A} =$

$-\alpha_1$	$\omega_{1.0}$	$\alpha_1 k_2$	0	0	0	0	0
$-\omega_{1.0}$	$-\alpha_1$	0	$\alpha_1 k_2$	0	0	0	0
$\alpha_2 k_1$	0	$-\alpha_2$	$\omega_{2.0}$	$-\Psi_{2y0}$	$-U_{2m0}\cdot\sin\beta_{2.0}$	$U_{2m0}\cdot\sin\beta_{2.0}$	$-U_{2m0}\cdot\sin\beta_{2.0}$
0	$\alpha_2\cdot k_1$	$-\omega_{2.0}$	$-\alpha_2$	Ψ_{2x0}	$U_{2m0}\cdot\cos\beta_{2.0}$	$-U_{2m0}\cdot\cos\beta_{2.0}$	$U_{2m0}\cdot\cos\beta_{2.0}$
$-\frac{L_m\Psi_{2y0}}{J\sigma L_1 L_2}$	$\frac{L_m\Psi_{2x0}}{J\sigma L_1 L_2}$	$\frac{L_m\Psi_{1y0}}{J\sigma L_1 L_2}$	$-\frac{L_m\Psi_{1x0}}{J\sigma L_1 L_2}$	$-\frac{k_{v.m}}{J}$	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

$\mathbf{B} =$

Ψ_{1y0}	0	$\cos\beta_{1.0}$	0	$-U_{1m0}\cdot\sin\beta_{1.0}$	0
$-\Psi_{1x0}$	0	$\sin\beta_{1.0}$	0	$U_{1m0}\cdot\sin\beta_{1.0}$	0
Ψ_{2y0}	0	0	$\cos\beta_{2.0}$	0	$-U_{2m0}\cdot\sin\beta_{2.0}$
$-\Psi_{2x0}$	0	0	$\sin\beta_{2.0}$	0	$U_{2m0}\cdot\cos\beta_{2.0}$
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0

$\mathbf{C} =$

0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	–1	1
$\frac{1}{\sigma L_1}$	0	$-\frac{k_2}{\sigma L_1}$	0	0	0	0	0
0	$\frac{1}{\sigma L_1}$	0	$-\frac{k_2}{\sigma L_1}$	0	0	0	0
$-\frac{k_1}{\sigma L_2}$	0	$\frac{1}{\sigma L_2}$	0	0	0	0	0
0	$-\frac{k_1}{\sigma L_2}$	0	$\frac{1}{\sigma L_2}$	0	0	0	0
$-\frac{L_m\Psi_{2y0}}{\sigma L_1 L_2}$	$\frac{L_m\Psi_{2x0}}{\sigma L_1 L_2}$	$\frac{L_m\Psi_{1y0}}{\sigma L_1 L_2}$	$-\frac{L_m\Psi_{1x0}}{\sigma L_1 L_2}$	0	0	0	0

Линеаризованные выражения используются затем при синтезе регуляторов и оказываются в соответствующих формулах для законов управления. Особенность синтеза заключается в том, что все коэффициенты матриц определяются для некоторой исходной точки установившегося режима. В общем виде законы управления можно представить следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
\omega_1(t) &= f_{\omega 1}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{1m},U_{2m},\omega_2,\varepsilon_1,\varepsilon_2,P);\\
\omega_2(t) &= f_{\omega 2}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{1m},U_{2m},\omega_1,\varepsilon_1,\varepsilon_2,P);\\
U_{1m}(t) &= f_{u1}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{2m},\omega_1,\omega_2,\varepsilon_1,\varepsilon_2,P);\\
U_{2m}(t) &= f_{u2}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{1m},\omega_1,\omega_2,\varepsilon_1,\varepsilon_2,P);\\
\varepsilon_1(t) &= f_{\varepsilon 1}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{1m},U_{2m},\omega_1,\omega_2,\varepsilon_2,P);\\
\varepsilon_2(t) &= f_{\varepsilon 2}(t,\omega_r,\theta_r,\overline{i_1},\overline{i_2},U_{1m},U_{2m},\omega_1,\omega_2,\varepsilon_1,P).
\end{aligned}\right\}$$

Здесь управляющие переменные (частоты, амплитуды и регулируемые фазовые сдвиги питающих напряжений) зависят от скорости, угла поворота, текущих значений токов в обмотках и других управляющих величин (в формулах среди переменных отсутствуют те переменные, для которых соответствующие функции предназначены). Во всех формулах присутствует массив параметров P, зависящих от параметров двигателя и значений всех переменных в установившемся режиме, из которого начинается регулирование:

$$P = F(t_0,\omega_{r0},\theta_{r0},\overline{i}_{1.0},\overline{i}_{2.0},U_{1m0},U_{2m0},\omega_{1.0},\omega_{2.0},\varepsilon_{1.0},\varepsilon_{2.0}),$$

где значком 0 помечены переменные со значениями в точке линеаризации (исходной точке регулирования).

Массив параметров P содержит коэффициенты из матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$, которые зависят от показанных переменных в точке линеаризации. При синтезе законов управления используют те или иные методы, которые позволяют определить функции и их параметры, обеспечивающие требуемое качество регулирования – время переходного процесса, наличие (отсутствие) колебательности, величина (отсутствие) перерегулирования и т. п. Предполагается, что в процессе регулирования эти параметры остаются неизменными. Но в данном случае при использовании линеаризованных моделей возникает противоречие между постоянными (заранее рассчитанными) параметрами функций управления и теми их значениями, которые присущи самому двигателю и меняются в зависимости от управляющих переменных и переменных состояния. Это будет приводить к тому, что в таких объектах управления как индукторный двигатель двойного питания, качество регулирования в той или иной степени не будет соответствовать рассчитанному. Качество регулирования будет сохраняться при условии, что изменения управляющих переменных происходят в небольшом диапазоне – единицы процентов от исходной величины.

Для сохранения показателей качества регулирования в любом диапазоне изменения управляющих переменных желательно обеспечить соответствие параметров в модели двигателя параметрам в законах управления. Возможны два варианта:

1) непрерывный пересчет параметров в законах управления с учетом изменяющихся значений управляющих переменных и переменных состояния, информацию о чем можно получать с помощью разнообразных датчиков;

2) выполнять такое изменение управляющих переменных, чтобы параметры в законах управления оставались неизменными.

В качестве примера можно рассмотреть один из параметров в матрицах:

$$\psi_{1x0} = \frac{\left[c \cdot \cos(\beta_{1.0}) + d \cdot \sin(\beta_{1.0})\right] \cdot U_{1m0} + \alpha_1 k_2 \cdot \left[a \cdot \cos(\beta_{2.0}) + b \cdot \sin(\beta_{2.0})\right] \cdot U_{2m0}}{a^2 + b^2},$$

где $a = \omega_{1.0}\omega_{2.0} - \alpha_1\alpha_2\sigma$, $b = \alpha_1\omega_{2.0} + \alpha_2\omega_{1.0}$, $c = \alpha_1 \cdot \left(\alpha_2^2\sigma + \omega_{2.0}^2\right)$,

$d = \omega_{2.0} \cdot \left[\omega_{1.0}\omega_{2.0} + \alpha_1\alpha_2 \cdot (1-\sigma)\right] + \alpha_2^2\omega_{1.0}$, $f = \alpha_1\alpha_2\omega_{1.0} \cdot (1-\sigma) + \omega_{2.0} \cdot \left(\alpha_1^2 + \omega_{1.0}^2\right)$

$e = \alpha_2 \cdot \left(\alpha_1^2\sigma + \omega_{1.0}^2\right)$, $k_1 = L_{\text{m}}/L_2$, $k_2 = L_m/L_2$, $\sigma = 1 - k_1k_2$, $\alpha_1 = r_1/L_1\sigma$,

$\alpha_2 = r_2/L_2\sigma$.

Видно, что некоторые параметры зависят от частот питающих напряжений $\omega_{1.0}$ и $\omega_{2.0}$, некоторые – от амплитуд U_{1m0} и U_{2m0}. Можно выбирать такие сочетания частот, чтобы их разность соответствовала требуемой скорости, а абсолютные значения обеспечивали неизменность соответствующих параметров. Дополнительно к изменению частот можно использовать изменение амплитуд напряжений.

Чтобы решить задачу сохранения постоянства параметров модели (и, соответственно, параметров реального двигателя) в переходных процессах необходимо на стадии синтеза регулятора решать соответствующую систему уравнений для всех параметров формул, отражающих законы управления.

Заключение. Предложенный способ построения систем автоматического управления нелинейными объектами с избыточным управлением, подобными индукторному двигателю двойного питания, позволяет обеспечить стабильность показателей качества регулирования во всех режимах и использовать для синтеза многочисленные методы линейной теории управления. В частности, это может быть полезно для исполнительных электроприводов космических аппаратов с инструментальными средствами наблюдения за Землей.

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. Амбросенко Н. Д., Миндалев И. В., Титовская Н. В., Шевцова Л. Н. Цифровые образовательные модели и технологии: анализ возможностей и опыт применения //

Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. Красноярск, 2022. С. 12–15.

S. A. Bronov[1], M. A. Vajman[1],
A. A. Bisov[2], A. A. Chumachenko[2], P. V. Avlasko[3]
[1,2] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
[3,4] AO «NPP «Radiosvyaz», Krasnoyarsk, Russia
[5] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
nul-sapr@mail.ru

A CONTROL SYSTEM WITH CONFIGURABLE PARAMETERS FOR THE ELECTRIC DRIVE OF EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT

Abstract. A new approach to the construction of automatic control systems for electric drives of spacecraft for remote sensing of the Earth is presented, based on the use of electric drives with redundant control using the example of a dual-power inductor motor. It is shown that in the synthesis of regulators using methods of linear theory of automatic control, the resulting control laws contain parameters that depend on the values of control variables and state variables. Therefore, the previously calculated control quality indicators are not always preserved when the control variables change over a wide range of values. To ensure the consistency of control quality indicators, it is proposed to use the possibilities of redundant control variables, choosing such combinations of them that the parameters of the engine model remain constant.

Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, actuators, modeling, automatic control systems

УДК 528.837:629.78:621-83:517.938

М. А. Вайман[1], С. А. Бронов[2], С. В. Рогкустов[3], Д. А. Никонов[4], А. А. Бисов[5], А. А. Чумаченко[6], П. В. Авласко[7]
[1,2,3,4] Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия;
[5,6] АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Россия;
[7] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;
nul-sapr@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Предложено использовать элементы интеллектуальных систем управления при построении регуляторов для различных исполнительных устройств космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Рассматривается возможность построения их на основе индукторных двигателей двойного питания, обладающих избыточностью по управлению, когда одну и ту же скорость, угол поворота и электромагнитного момента можно получить различным сочетанием шести управляющих величин – параметрами двух многофазных питающих напряжений. Для этого методами компьютерного моделирования производится формирования множества возможных законов изменения управляющих величин в зависимости от режима работы, целевой функции управления и действующих ограничений. Эти законы управления аппроксимируются и параметризируются, помещаются в память микроконтроллера. С помощью идентификатора режима работы на основании датчиков обратной связи идентифицируется режим работы и выбирается соответствующий закон управления.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, исполнительные устройства, системы автоматического управления

Введение. Исполнительные устройства в космических аппаратах дистанционного зондирования Земли выполняют много различных функций. В данном случае наиболее важными являются функции разнообразных рабочих механизмов, связанных с перемещением измерительной аппаратуры, в том числе различных датчиков, фото- и видеоаппаратуры и т. п. К этим устройствам предъявляются повышенные требования по точности в статике (в установившемся режиме работы) и в динамике (при отработке перемещений с различной скоростью). В частности, необходимо обеспечить плавность движения рабочих механизмов при невысоких значениях скорости, а также быстроту их перемещения с высокой точностью позиционирования.

Основой исполнительных устройств являются электроприводы на базе различных электродвигателей. В настоящее время широко используются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронные двигатели с электромагнитной редукцией (СДЭР). СДПМ являются классическими универсальными двигателями, широко применяемыми

© Вайман М. А., Бронов С. А., Рогкустов С. В., Бисов А. А., Чумаченко А. А., Авласко П. В., 2025

также в различных устройствах на Земле. Они обладают хорошим электромагнитным моментом, но являются сравнительно высокоскоростными. В то же время исполнительные устройства космических аппаратов являются низкоскоростными, поэтому применение СДПМ предполагает использование механического редуктора со сравнительно большим передаточным отношением. Механический редуктор с таким передаточным отношением обладает двумя важными недостатками: во-первых, он снижает надежность соответствующих исполнительных устройств и всего космического аппарата, а во-вторых, вносит дополнительную погрешность по скорости и углу поворота.

СДЭР имеют статор, на котором располагается многофазная (часто трехфазная) обмотка, запитывающаяся трехфазным напряжением. На роторе обмотки нет, но он выполняется с открытыми зубцами, как и статор. Наличие зубчатого воздушного зазора обеспечивает создание электромагнитного момента и скорости, которая прямо пропорциональна частоте питающего напряжения и обратно пропорциональна числу зубцов ротора. Это позволяет уменьшить передаточное число механического редуктора и тем самым повысить надежность и снизить погрешность отработки скорости и угла поворота.

В данной работе рассматривается возможность применения в космических аппаратах дистанционного зондирования Земли индукторных двигателей двойного питания (ИДДП), которые являются усовершенствованным вариантом СДЭР. Конструкция ИДДП напоминает СДЭР, но на статоре ИДДП располагаются две многофазные (обычно трехфазные) обмотки, питаемые от двух независимых трехфазных источников напряжения (инверторов). Обмотки запитываются таким образом, чтобы в них образовывались два электромагнитных поля, вращающихся навстречу друг другу. В результате угловая скорость ротора ИДДП пропорциональна не частоте питания, а разности двух частот питания – первого и второго многофазных питающих напряжений.

Использование в рассматриваемых исполнительных устройствах специальных электродвигателей типа ИДДП позволяет обеспечить выполнение повышенных требований, связанных с перемещением измерительной аппаратуры, и получать более высокие показатели качества регулирования во всех режимах работы.

Управляющими величинами у ИДДП являются параметры двух питающих напряжений: две амплитуды, две частоты и два фазовых сдвига. При этом имеется избыточность управляющих величин – одно и то же значение скорости, угла поворота, электромагнитного момента (основных регулируемых величин) можно получить с помощью различных комбинаций управляющих величин. Их абсолютные значения не играют существенной роли, но позволяют обеспечить дополнительные функциональные возможности исполнительных устройств.

Реализация систем управления электроприводов с ИДДП может выполняться с использованием всех известных способов управления: частотно-независимого, частотно-токового, частотно-векторного и др. Также

и принципы построения систем автоматического регулирования могут заимствоваться из теории и практики электроприводов с другими типами двигателей – подчиненное регулирование параметров, модальное управление и др. Регуляторы могут быть последовательными, параллельными, комбинированными. Могут использоваться различные датчики обратных связей – по току, скорости, углу поворота. Но уникальные функциональные возможности ИДДП позволяют использовать также другие способы управления и принципы построения систем автоматического регулирования.

Особенность рассматриваемых устройств для космических аппаратов заключается, в частности, в том, что не всегда возможно предусмотреть все ситуации с изменением управляющих и поведением регулируемых величин. Возможен износ материалов механических соединений и т. п. отклонения параметров электропривода от номинальных. К тому же возможны ситуации, в которых по каким-то причинам необходимо перевести электроприводы в непредусмотренные заранее режимы работы, например, при необходимости экономить дополнительно электроэнергию. Это может быть связано, в частности, с отказом части элементов солнечных батарей или старением аккумуляторов. В таких случаях невозможно заранее предусмотреть все законы управления и соответствующие настройки регуляторов. Решение этой проблемы заключается в создании адаптивных систем, способных анализировать режим работы и выбирать соответствующие этому законы управления. Т. е. система управления должна обладать свойствами интеллектуальной системы. Это возможно в случае применения микроконтроллерного управления.

В данном случае предлагается воспользоваться избыточностью по управлению, что, с одной стороны, предоставляет дополнительные возможности по обеспечению желаемых показателей качества регулирования, а с другой создает неопределенность в выборе конкретных законов изменения управляющих величин (частот, амплитуд, фазовых сдвигов).

Предлагается применить процесс обучения системы управления электроприводом с ИДДП на модели и стенде. На модели можно путем поиска наилучшего управления осуществлять предварительный выбор управляющих воздействий, а на стенде проверять некоторые из найденных решений (в рамках функциональных возможностей стенда).

В модели удобно произвольным образом менять условия работы электропривода, задавать различные неисправности и отклонения от нормальных условий работы. При этом найденные законы управления необходимо аппроксимировать соответствующими функциями, выполняя структурную и параметрическую идентификацию. А затем закладывать эти функции в память микроконтроллера. Система управления снабжается датчиками обратной связи, с помощью которых контролируется текущее состояние всего электропривода (ИДДП, источников напряжения и самих датчиков) и обеспечивается идентификация режима работы. Для каждого электропривода в зависимости от его назначения определяется некоторый спектр возмож-

ных режимов работы, включая нормальные и аварийные. Для каждого режима отрабатывается на моделях сочетание законов изменения управляющих величин. Некоторые из них затем проверяются на стенде.

Поиск наилучшего управления для каждого режима работы осуществляется в соответствии со сформулированной целевой функцией и заданными ограничениями. В некоторых случаях режим зависит от ограничений, при этом целевая функция остается неизменной. В некоторых случаях при изменении режима работы необходимо изменять целевую функцию.

Интеллектуальные свойства системы управления проявляются в оценке ситуации и принятии адекватных этому решений по использованию соответствующих законов управления. Система управления обучается на примерах различных ситуаций и запоминает, какие сочетания сигналов от датчиков соответствуют конкретному режиму работы. При этом невозможно задать все возможные ситуации, следовательно, система управления должна осуществлять интерполяцию между соседними ситуациями и выявлять промежуточные ситуации, относя их все же к одному из известных режимов работы. Это поручается специальному блоку идентификации режима работы.

Заключение. Таким образом, возможно создание систем управления, обладающих свойствами интеллектуальных систем для решения задач в нормальных и нестандартных режимах работы. С учетом предполагаемого использования электроприводов с ИДДП на космических аппаратах дистанционного зондирования Земли это дает возможность отправлять по телеметрии базовые указания для системы управления, которая с учетом полученных ранее знаний будет реализовывать необходимое в данном конкретном случае управление.

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. Красноярск : КГАУ, 2019. С. 200–204.

2. Амбросенко Н. Д., Миндалев И. В., Титовская Н. В., Шевцова Л. Н. Цифровые образовательные модели и технологии: анализ возможностей и опыт применения // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. Красноярск, 2022. С. 12–15.

S. A. Bronov[1], M. A. Vajman[2], S. V. Rogkustov[3], D. A. Nikonov[4],
A. A. Bisov[5], A. A. Chumachenko[6], P. V. Avlasko[7]
[1, 2, 3, 4]Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
[5, 6]AO «NPP «Radiosvyaz», Krasnoyarsk, Russia
[7] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
nul-sapr@mail.ru

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR SPACECRAFT ACTUATORS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

Abstract. It is proposed to use elements of intelligent control systems in the construction of regulators for various actuators of Earth remote sensing spacecraft. The possibility of constructing them on the basis of dual–power inductor motors with redundancy in control is being considered, when the same speed, angle of rotation and electromagnetic moment can be obtained by a different combination of six control values - the parameters of two multiphase supply voltages. For this purpose, computer modeling methods are used to generate a variety of possible laws for changing control quantities depending on the operating mode, the target control function and the current restrictions. These control laws are approximated and parameterized, and stored in the microcontroller's memory. Using the operating mode identifier based on feedback sensors, the operating mode is identified and the corresponding control law is selected.

Keywords: spacecraft, remote sensing of the Earth, actuators, automatic control systems

УДК 528.88

И. Д. Мухамеджанов[1], М. В. Врублевский[2], Е. А. Лупян[3]
[1] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[2, 3]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[1]ildarmsu@gmail.com, [2]vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

ВОЗМОЖНОСТИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА РЕК С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ АЛЬТИМЕТРИИ И КОСМИЧЕСКИХ ГИДРОПОСТОВ НА ПРИМЕРЕ РЕКИ АМУДАРЬИ

Аннотация. Работа описывает возможности контроля состояния русла рек с помощью данных альтиметрии в совокупности с наблюдениями, полученными с космических гидропостов (КГП) на примере реки Амударьи. В настоящем исследовании была оценена разница временных рядов уровня водной поверхности, полученных из двух сервисов, «*Вега-Science*» (*http://sci-vega.ru*) и системы хранения сенсорных данных *SDSS* (*https://sdss.caiag.kg*). Данные альтиметрии «*Вега-Science*» были рассчитаны по двум алгоритмам ретрекинга, затем вычислена величина средней абсолютной ошибки (*MAE*) по отношению к данным *SDSS*. Результаты анализа показали, что между данными из двух источников наблюдается устойчивое среднее смещение. Данные о площади водной поверхности, рассчитанные по индексу *MNDWI* на КГП, также могут быть использованы в совокупности с измерениями альтиметрии, поскольку коэффициент корреляции Пирсона (*R*) на соответствующих выбранных 8 парах временных рядов находится в отрезке 0,7–0,9. Высокий *R* не только указывает на линейную связь площади и уровня воды, но позволяет сочетать данные альтиметрических и космических гидропостов при оценке состояния русла рек и построении гидрологических моделей.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, спутниковая альтиметрия, алгоритмы ретрекинга, космические гидропосты, Амударья, ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Актуальность исследования. Регулярная информация о состоянии водных объектов, в особенности аридных территорий, имеет большое значение при оценке водного потенциала, прогнозировании водообеспеченности и водного дефицита таких регионов. Большинство традиционных гидрологических моделей используют временные ряды суточного стока или уровня воды, полученных контактными методами. Однако проведение таких наблюдений зачастую представляет сложность, что связано с установкой и обслуживанием дорогостоящего оборудования. Альтернативой выступают методы спутникового мониторинга, позволяющие оперативно, свободно и своевременно получать непрерывные временные ряды наблюдений о состоянии водных объектов.

В работе предлагается методика организации спутникового мониторинга участков русел рек на примере реки Амударьи, одной из главных водных артерий и самой полноводной в Центральной Азии. В связи с расположением реки на территории сразу 4 государств, а также сложной морфоло-

© Мухамеджанов И. Д., Врублевский М. В., Лупян Е. А., 2025

гией русла, организация регулярной сети наземных станций не всегда возможна. Решить проблему получения регулярных данных об уровне воды может метод спутниковой альтиметрии [1; 2].

Использование альтиметрии. На основе накопленных в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [3] измерений альтиметрии с пространственным разрешением около 300 м космических аппаратов (КА) *Sentinel-3A*/*-3B* и *Sentinel-6A*, запущенных в 2016, 2018 и 2020 гг. соответственно, а также разработанного программного модуля обработки данных радиолокационной альтиметрии [1], в рамках текущей работы были созданы на р. Амударья сети альтиметрических гидропостов (АГП), виртуальных объектов, в границах которых с помощью данных альтиметрии проводятся вычисления средних уровней воды (рис. 1). На АГП вычислены временные ряды измеряемого параметра. Полученная система интегрирована в систему «*Вега-Science*» [4].

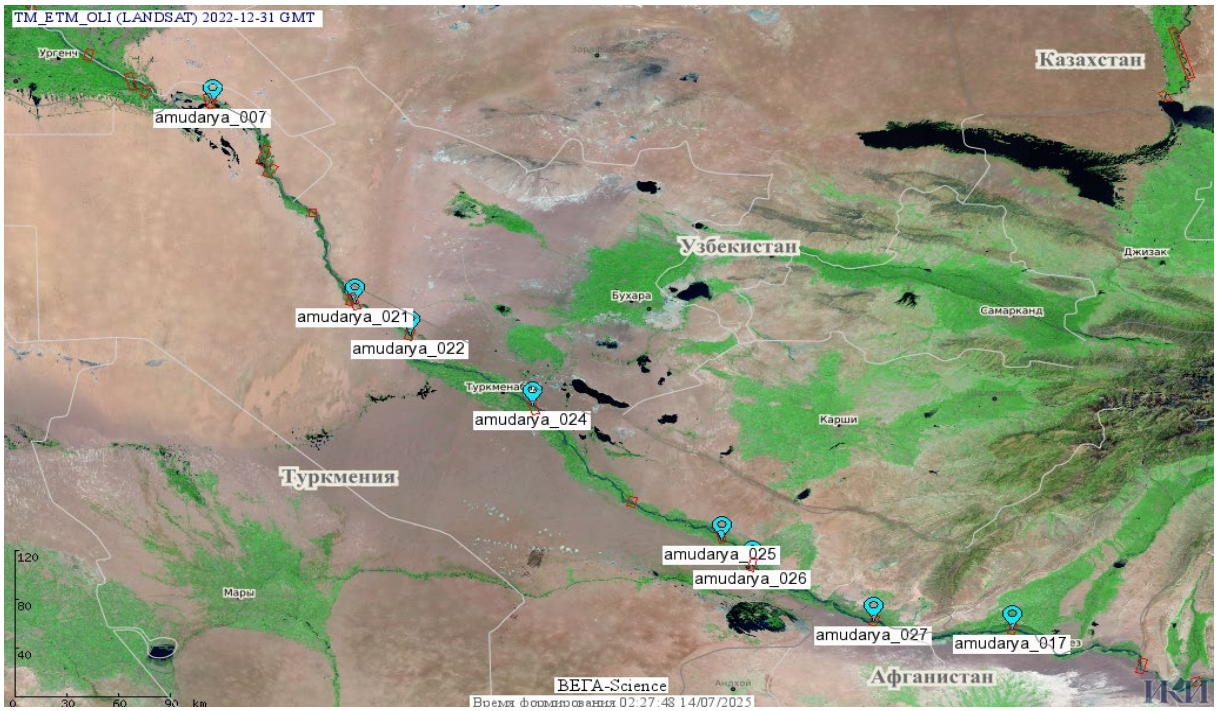


Рис. 1. Сеть АГП на русле Амударьи, выбранных для анализа, показана красными полигонами, АГП *SDSS* – голубыми маркерами (подложка – композитное изображение спутниковых снимков *Landsat* от 31.12.2022)

В рамках текущей работы уровни воды были вычислены на основе двух различных алгоритмов ретрекинга (методов обработки регистрируемого сигнала альтиметром) – *SAMOSA* [6] и *OCOG* [8], а также двух методов фильтрации выбросов за пролет – метод трех сигм (3*S*) и выбор измерений в пределах 5 % от медианы (5*P*). Также в работе привлечены данные сервиса *SDSS*, *Sensor Data Storage System* [9], предоставляющего свободный доступ к временным рядам о высоте водной поверхности для объектов гидрологии суши в Центральной Азии, полученным на основе данных альтиметрии на АГП *SDSS* (рис. 1). Результаты сравнительного анализа рядов уровня по сервисам «*Вега-Science*» и *SDSS* позволяют заключить, что минимальная

величина метрики *MAE* (*mean absolute error*) для попарных показателей за период 2016–2024 гг. наблюдается при использовании алгоритма ретрекинга *SAMOSA* и фильтрации 5*p*: $MAE_{samosa_{5p}}\left(VEGA, SDSS\right) \le 0{,}53$, значения двух рядов интегрально отличаются в среднем на константу.

Использование космических гидропостов. Известно, что площадь водного зеркала и уровень воды взаимосвязаны. Чтобы оценить взаимосвязь и выбрать наиболее подходящий источник данных альтиметрии для совместного анализа с данными оптических спутниковых сенсоров, в рамках работы была подготовлена сеть космических гидропостов (КГП) (см. рис. 1). КГП представляет собой полигон некоторой формы и расположения, заданный на участке русла реки. В пределах границ полигона на основе имеющихся спутниковых наблюдений проводится оценка площади водного зеркала (ПВЗ) в конкретные моменты времени [5]. В настоящей работе космические гидропосты были построены вблизи АГП. Геометрия полигонов КГП такова, что учитываются максимально возможные непрерывные участки русла реки, удовлетворяющие правилам установки таких виртуальных объектов [5]. На основе спутниковых снимков высокого разрешения КА *Sentinel-2* и *Landsat-8, 9* долговременных архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для каждого КГП получены временные ряды измерения ПВЗ путем вычисления водного индекса *MNDWI* [10].

Диаграмма на рис. 2 отражает значения коэффициентов корреляции Пирсона временных рядов за период май – октябрь (для разных фаз половодья) 2020–2021 гг.: *R*(*agp*, *sdss*), *R*(*agp*, *kgp*), *R*(*sdss*, *kgp*) , где *agp* – временной ряд по альтиметрии из системы «*Вега-Science*», *kgp* – временной ряд ПВЗ, *sdss* – временной ряд по альтиметрии из системы *SDSS*. Выбор периода для анализа основан на результатах экспериментов по установке КГП, которые показали устойчивость русла в пределах одного года (максимум двух лет). Полигон должен включать максимальное количество водных пикселей, меняющихся динамически. После установки полигонов их необходимо корректировать каждый год, чтобы учитывать естественное смещение русла и размытие береговой линии реки.

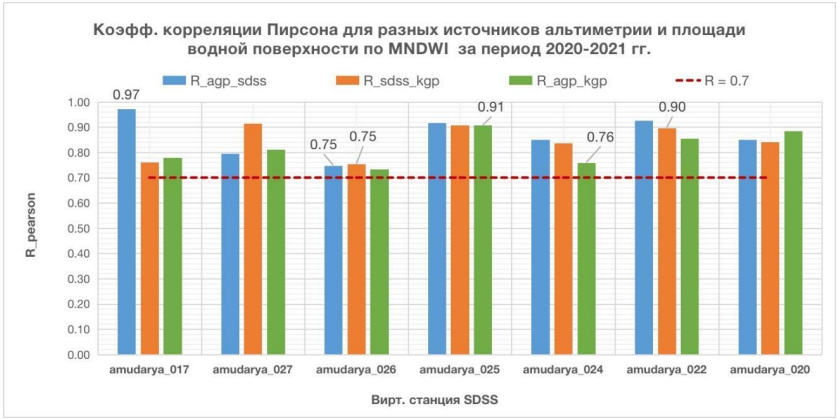


Рис. 2. Коэффициенты корреляции Пирсона временных рядов уровня воды (по разным источникам альтиметрии) и ПВЗ, рассчитанных в пределах КГП по оптическим спутниковым данным

Коэффициенты корреляции площади на КГП и уровня воды на АГП превышают 0,7, что говорит не только о линейной связи площади водного зеркала и уровня воды, но и о том, что данные альтиметрии и площади воды можно использовать комплексно для решения задач мониторинга рек Центральной Азии. Сравнение коэффициентов корреляции между временными рядами измерений площади и уровней воды из разных источников указывает на то, что источник данных об уровне воды по альтиметрии несущественно влияет на результат, а значит, можно применять любой либо оба для устранения пробелов измерений, имеющихся в рядах каждой из систем.

Выводы. Использование временных рядов уровня воды, полученных по данным альтиметрии на основе алгоритма ретрекинга *SAMOSA* и фильтра измерений за пролет в пределах 5 % от медианы, дает лучшие результаты, сопоставимые с данными *SDSS*. Также в работе продемонстрирована возможность использования данных о площади водной поверхности, рассчитанной по индексу *MNDWI*, в совокупности с измерениями альтиметрии. Такой комплексный подход оправдан высокими значениями коэффициента корреляции Пирсона (0,7–0,9) на соответствующих 8 парах временных рядов, что говорит не только о линейной связи площади и уровня воды, но позволяет сочетать данные альтиметрических и космических гидропостов при оценке состояния русла рек и гидрологическом моделировании. При этом в комплексном анализе состояния рек по данным, полученным с помощью сетей АГП и КГП, источник данных временных рядов уровня воды не играет существенной роли, так как значения корреляций площади и уровней от разных сервисов дают близкие значения *R*. Результаты исследования показывают, что перспектива объединения АГП и КГП в системе «*Вега-Science*» расширяет возможности спутникового мониторинга внутренних водоемов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Список источников

1. Врублевский М. В., Константинова А. М., Бурцев М. А. Интерфейс для работы с данными альтиметрии для мониторинга внутренних водоемов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 76. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.

2. Захарова Е. А., Крыленко И. Н., Сазонов А. А., Семенова Н. К., Лисина А. А. Уровенный режим арктических рек по данным моделирования и спутниковых измерений // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 115–124.

3. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/rs14010077.

4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.

5. Мухамеджанов И. Д., Константинова А. М., Лупян Е. А., Умирзаков Г. У. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87–103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.

6. C. Ray et al., "SAR altimeter backscattered waveform model," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 53, no. 2, pp. 911-919, Feb. 2015. DOI:10.1109/TGRS.2014.2330423.

7. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A. The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020): E3S Web Conf. 2020. V. 223. 03008. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.

8. Wingham, D. J.; Rapley, C. G.; Griffiths, H. New techniques in satellite altimeter tracking systems. In Proceedings of the IGARSS, Zürich, Switzerland, 8-11 September 1986.

9. Zech, C., Schöne, T., Illigner, J., Stolarczuk, N., Queißer, T., Köppl, M., Thoss, H., Zubovich, A., Sharshebaev, A., Zakhidov, K., Toshpulatov, K., Tillayev, Y., Olimov, S., Paiman, Z., Unger-Shayesteh, K., Gafurov, A., and Moldobekov, B.: Hydrometeorological data from a Remotely Operated Multi-Parameter Station network in Central Asia, Earth Syst. Sci. Data, 13, 1289–1306, https://doi.org/10.5194/essd-13-1289-2021, 2021.

10. Xu, H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. International Journal of Remote Sensing. 27. 3025–3033. 10.1080/01431160600589179, 2006.

I. D. Mukhamedjanov[1], M. V. Vrublebsky[2], E. A. Loupian[3]
[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[2, 3]Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
[1]ildarmsu@gmail.com, [2]vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

CAPABILITIES FOR RIVERS SATELLITE MONITORING USING ALTIMETRIC DATA AND VIRTUAL GAUGING STATIONSON THE CASE OF THE AMU DARYA RIVER

Abstract. The paper describes the capabilities of the river course state using altimetric data combined with observations retrieved from virtual gauging stations (VGS) using the case of the Amu Darya River. In this study, the difference in the time series of the water level for the period 2016–2024 was estimated, obtained from two services, Vega-Science ((http://sci-vega.ru) and SDSS (https://sdss.caiag.kg). The altimetry data from Vega-Science using two retracking algorithms, then the mean absolute error (MAE) relative to the SDSS data was calculated. The analysis revealed an average offset up to 60 cm between the data from both sources. Water surface area data calculated using the MNDWI index within VGS can be combined with altimetric data, as the Pearson correlation coefficient (R) for eight selected pairs of time series ranges from 0.7 to 0.9. A high Pearson correlation coefficient (R) demonstrates a strong linear relationship between water surface area (WSA) and water level, enabling the integration of altimetry and VGS data to assess river course state and develop hydrological models.

Keywords: stellite monitoring, satellite altimetry, retracking algorithms, virtual gauging stations, Amu Darya, CCU «IKI-Monitoring»

УДК 004.9:614.841.42

Ю. В. Пестова
Институт динамики систем и теории управления
им. В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
yupest@icc.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. В работе рассматривается автоматизация информационного процесса прогнозирования риска лесных пожаров территории с использованием данных ДЗЗ и методов машинного обучения, таких как *Case-based reasoning*, *Random Forest*, *AutoML* и метода голосования, позволяющего агрегировать результаты перечисленных методов, на основе технологии структурного проектирования информационных систем *IDEF*0. Описаны компоненты архитектуры разработанной автоматизированной информационной системы. Предложенное решение может быть использовано природоохранными и лесохозяйственными организациями для оперативного принятия решений, планирования мероприятий по предупреждению пожаров и минимизации ущерба.

Ключевые слова: риск лесных пожаров, машинное обучение, автоматизированная информационная система, данные ДЗЗ, *IDEF*0

Введение. Государство играет ключевую роль в обеспечении пожарной безопасности в лесах, что требует системного подхода к организации и реализации соответствующих мероприятий, в том числе мониторинга и оценки уровня пожарной опасности. Эти задачи решаются посредством внедрения и использования специализированных информационных систем, включая геоинформационные технологии, что позволяет автоматизировать процесс наблюдения и оперативно реагировать на изменения ситуации. Целью исследования является автоматизация информационного процесса прогнозирования рисков лесных пожаров на основе анализа индивидуальных физико-географических характеристик территории Иркутской области, данных ДЗЗ и методов машинного обучения.

Источники данных. Прогнозирование риска лесных пожаров основано на пространственных данных о пожарах за 2004–2024 гг. на территории Иркутской области [0] и их физико-географических факторах: метеорологических, топографических, растительности и социальных, таких как удаленность от объектов инфраструктуры.

Описание информационного процесса. Предлагаемый информационный процесс прогнозирования риска лесных пожаров территории на основе методов машинного обучения описан с использованием технологии структурного проектирования информационных систем *IDEF*0. Основными этапами информационного процесса являются (рис. 1):

© Пестова Ю. В., 2025

1. Предобработка данных о пожарах и физико-географических факторах территории, которая включает очистку данных, формирование событий «отсутствие пожаров», определение границ гарей, агрегирование данных о событиях и факторах, определение независимых факторов и нормализация данных.

2. Применение методов машинного обучения для обучения модели прогнозирования рисков лесных пожаров территорий, в частности, методов *Case-based reasoning*, *Random Forest*, *AutoML* и метода голосования, позволяющего агрегировать результаты перечисленных методов.

3. Статистический анализ и визуализация данных о риске лесных пожаров территории: визуализации данных о пожарах в виде гистограмм и тепловых карт, диаграммы для отражения важности факторов для различных территорий, отображение карт рисков лесных пожаров на требуемые периоды.

4. Прогнозирование риска лесных пожаров территории на основе предложенных методов и информационной технологии.

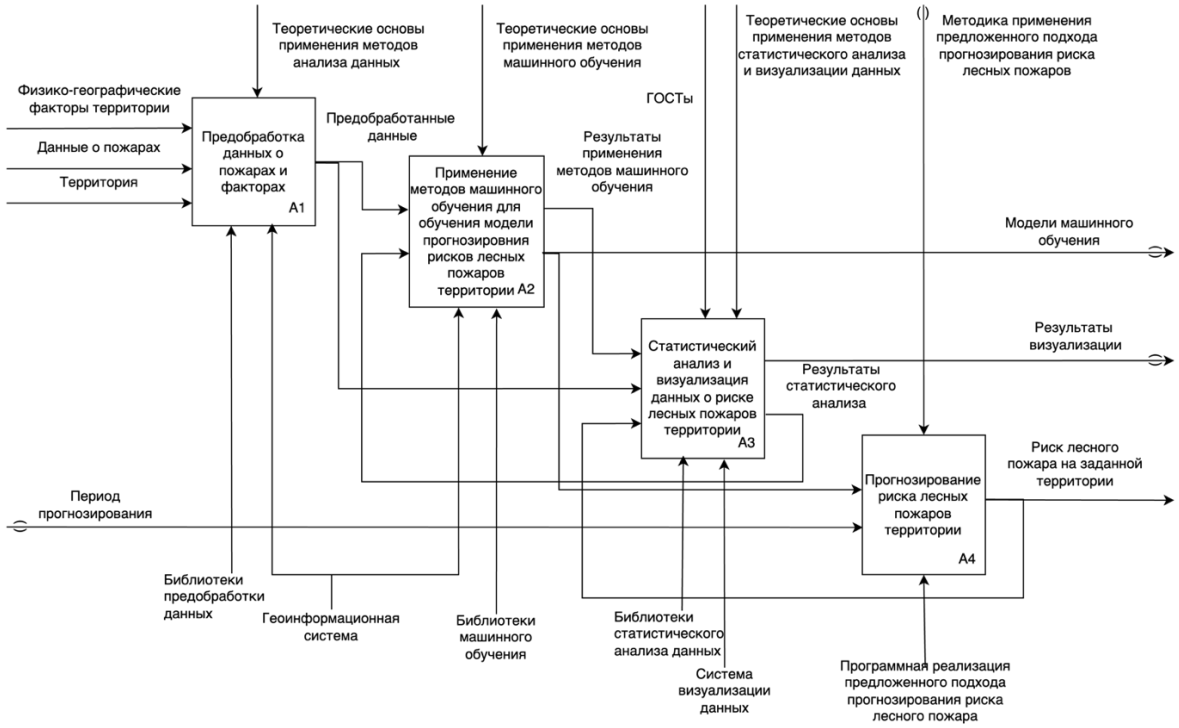


Рис. 1. Основные этапы информационного процесса

Новизной процесса являются использование подпроцесса анализа спектральных индексов для определения уточненных полигонов гарей, сочетания подпроцессов машинного обучения для анализа риска лесных пожаров, а также предложенные способы визуализации результатов анализа. Описанный процесс прогнозирования рисков лесных пожаров территории автоматизирован в виде автоматизированной информационной системы (АИС).

Архитектура АИС. Архитектура предлагаемой автоматизированной информационной системы представлена на рис. 2.

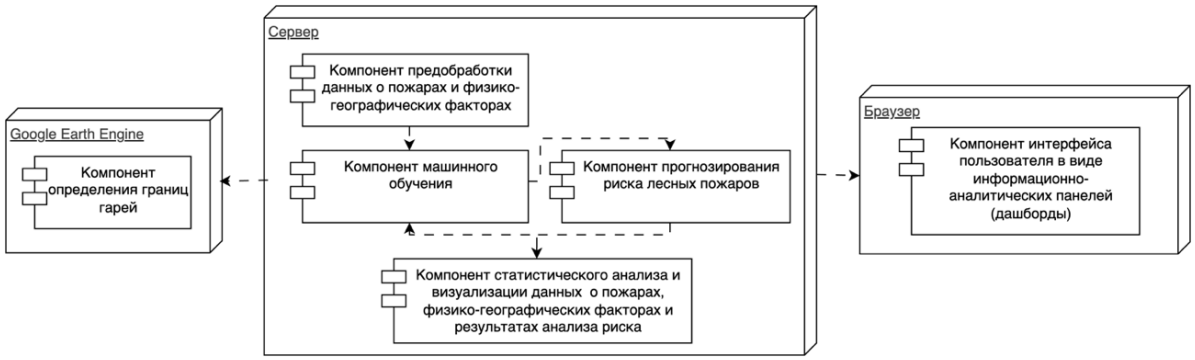


Рис. 2. Архитектура автоматизированной информационной системы прогнозирования риска лесных пожаров территории

Компонент определения границ гарей выполняет: расчет вегетационных индексов на заданные пользователем год и территорию лесничества Иркутской области на основе коллекций спутниковых снимков *Sentinel-2*; разработку и последующее применение созданной модели оценки площадей возгорания лесных пожаров и получение растрового бинарного слоя с границами гарей; формирование полигонального слоя границ гарей на основе векторизации результатов классификации, исключения шумов и заполнения пустот внутри геометрий.

Компонент предобработки данных реализует пространственную обработку и очистку исходного набора данных о пожарах на лесной территории, генерацию точечных событий «отсутствие пожара», агрегирование метеорологических факторов, пространственно-временное агрегирование физико-географических факторов территории с точечными данными о пожарах и «не пожарных» событиях.

Компонент машинного обучения реализует создание и хранение моделей прогнозирования риска лесных пожаров территории на основе методов машинного обучения *Case-based reasoning* [0], *Random Forest* [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], *AutoML* с использованием разработанных программных модулей и существующих библиотек анализа данных на *Python*.

Компонент прогнозирования риска лесных пожаров территории запускает процесс сбора и подготовки данных о территории на заданную пользователем дату и применение разработанных моделей для получения результатов прогноза в виде бинарного значения и вероятности класса «пожар» с агрегированием результатов по медиане для получения результатов «голосования» моделей с учетом минимизации ошибок.

Компонент визуализации результатов данных о пожарах обеспечивает подключение к исходным данным о пожарах и площадях возгорания,

и к данным с результатами прогнозирования, их хранение, обработку и построение на их основе интерактивных дашбордов, состоящих из элементов управления и компонентов визуализации данных.

Компонент интерфейса пользователя представляет веб-страницу с отображением компонента визуализации данных и элементами управления, инициирующие запуск остальных компонентов серверной части.

Апробация. Апробация АИС проводилась для периода 2024 г. на территории Иркутской области. Эффективность предложенного решения на основе метрики точности *f*1-*score* составила 0,84.

Заключение. Разработанная система может быть использована природоохранными и лесохозяйственными организациями для оперативного принятия решений, планирования мероприятий по предупреждению пожаров и минимизации ущерба.

Список источников

1. Лупян Е. А. и др. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2024. Т. 21, № 6. С. 233–249.

2. Дородных Н. О., Николайчук О. А., Пестова Ю. В., Юрин А. Ю. Использование прецедентного подхода для прогнозирования риска лесных пожаров // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 5. С. 43–54.

3. Nikolaychuk O. A., Pestova Yu. V., Yurin A. Yu. Wildfire Susceptibility Mapping in Baikal Natural Territory Using Random Forest // Forests. 2024. Vol. 15, №1. P. 170. URL: https://doi.org/10.3390/f15010170.

Yu. V. Pestova
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia
yupest@icc.ru

AUTOMATION OF THE INFORMATION PROCESS OF FOREST FIRE RISK FORECASTING BASED ON REMOTE SENSING DATA AND MACHINE LEARNING METHODS

Abstract. The paper discusses the automation of the information process of forecasting the risk of forest fires in the territory using remote sensing data and machine learning methods, such as: Case-based reasoning, Random Forest, AutoML and the voting method that allows aggregating the results of the listed methods, based on the technology of structural design of information systems IDEF0. The components of the architecture of the developed automated information system are described. The proposed solution can be used by environmental and forestry organizations for prompt decision-making, planning measures to prevent fires and minimize damage.

Keywords: forest fire risk, machine learning, automated information system, remote sensing, IDEF0

УДК 528.88

А. В. Трофимова
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия
trofimova.anna@phystech.edu

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОСЕРВИСА АНАЛИЗА ДАННЫХ С МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Аннотация. Современные геосервисы предоставляют данные среднего и высокого разрешения в основном платно или в режиме демодоступа. Кроме того, в открытых источниках содержится мало информации о проектировании веб-ГИС для обработки таких данных с МСА и ГСА. В связи с этим на сегодняшний день выявлена необходимость в создании таких цифровых продуктов, а также в их открытой публикации и составлении документации по ним. Целью данного исследования является создание геосервиса, который был бы способен обеспечить доступ пользователей к разновременным данным с различных типов съемочных систем бесплатно (*Landsat-8*, *EO-1*, *Sentinel-2*, НА «Гиперспектрометр МФТИ»). Особенностью разработанного сервиса является наличие функций для проведения сегментации, а также расчета различных индексов: *NDVI*, *NDWI*, *NDSI*, *LST*.

Ключевые слова: веб-картография, архитектура геосервисов, гиперспектральная съемка, мультиспектральная съемка, машинное обучение, индексы

Современные пользовательские геосервисы предоставляют информацию потребителям в большей степени путем заказа платно необходимых данных или в режиме демодоступа. При этом список группировок космических аппаратов и индексов доступных для расчета чаще всего имеет ограниченный размер в связи с техническими сложностями реализации масштабных сервисов, а также с юридическими условиями проектов [1; 2]. Кроме того, на сегодняшний день в открытых источниках не содержится информации о реализации проектирования и обработки данных геоинформационных систем на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС для данных гиперспектральной съемки. Научная новизна исследования заключается в создании такого гепортала, который был бы способен обеспечить доступ пользователей к данным различных типов съемочных систем и устранить недостатки, отмеченные выше. В разработанном геопортале представлены следующие индексы: *NDVI*, *NDWI*, *NDBI*, *NDSI*, а также *LST* (индекса температуры земной поверхности), автоматический расчет которого ранее не был представлен в отечественных сервисах. Преимуществом разработанного продукта является представление и оперативная обработка данных НА «Гиперспектрометр МФТИ», а также:

1) использование отечественных технологий при развертывании сервиса: *Selectel* и «Яндекс Диск» (REST API);

2) маленькое время на загрузку результатов обработки за счет системы кеширования;

3) представление классификации не только для данных с МСА, но и для данных с ГСА.

При разработке геопортала нами были использованы следующие технологии: база данных – *PostgreSQL*, основные языки программирования – *Python 3.10* и *Javascript*, бекенд-фреймворк – *Django*, хранение снимков – *Yandex Disk*, обработка снимков – *numpy*. В качестве источника данных были выбраны КА с МСА и ГСА: *Landsat-8*, *EO-1 Hyperion*, НА «Гиперспектрометр МФТИ», *Sentinel-2* через *API*.

Сам сервис расположен по адресу *https://geosmipt.ru*. На гепортал получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690723 от 17.12.2024 [3]. Внешний интерфейс портала и пример расчета индексов для КА с МСА и ГСА представлен на рис. 1.

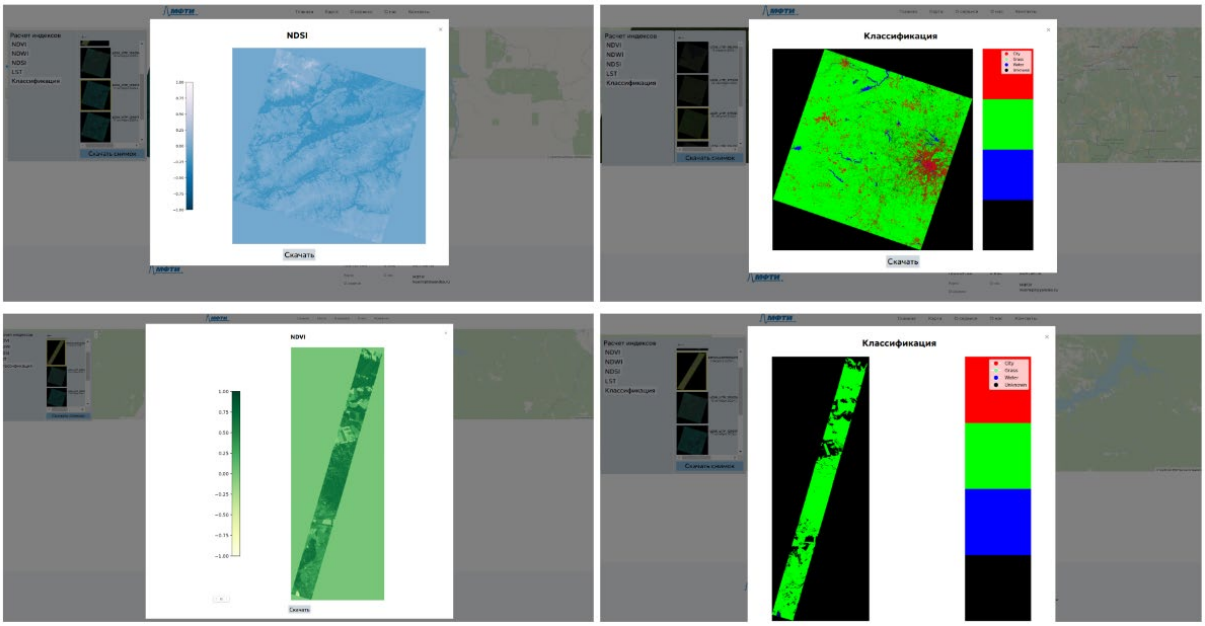


Рис. 1. Пример расчета индексов для *Landsat-8* и НА «Гиперспектрометр МФТИ»

Данный сервис позволяет оперативно предоставлять готовые тематические продукты потребителю, а именно карты распределения индексов, которые широко используются в научной среде, и результаты проведенной на сервере геопортала алгоритмической сегментации космических снимков по основным типам подстилающей поверхности.

Список источников

1. Зеленцов В. А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. № 6. С. 86–113.

2. Емельянов А. А., Ерешко М. В., Сизова О. С., Борисов А. В. Обзор современных облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе // Исследование Земли из космоса. 2022. № 2. С. 72–87.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690723 Российская Федерация. Пользовательский сервис предоставления данных ДЗЗ «Геосервис МФТИ» / А. В. Жаркова, И. С. Трофимов, Н. С. Филон [и др.]; № 2024690566; заявл. 05.12.2024; опубл. 17.12.2024.

A. V. Trofimova
Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, Russia
trofimova.anna@phystech.edu

ARCHITECTURE DEVELOPMENT AND SOFTWARE RELEASE OF A ЪGEOSERVICE FOR DATA ANALYSIS FROM MULTISPECTRAL AND HYPERSPECTRAL OPTICAL SENSORS (MIPT HYPERSPECTROMETER)

Abstract. Modern geoservices provide medium and high resolution data mainly for a fee or in demo access mode. In addition, there is little information in open sources about the design of web GIS for processing such data from multispectral and hyperspectral equipment. In this regard, to date, the need has been identified for the creation of such digital products, as well as for their open release and documentation on them. The aim of this study is to create a geoservice that would be able to provide users with access to up-to-date data from various types of systems for free (Landsat 8, EO-1, Sentinel 2, MIPT Hyperspectrometer). A special feature of the service developed by the authors is the availability of functions for segmentation, calculation of various indexes: NDVI, NDWI, NDSI, LST.

Keywords: web cartography, geoservices architecture, hyperspectral surveying, multispectral surveying, machine learning, indexes

УДК 629.735.336:631.3

Н. И. Филиппов[1], Е. В. Павлова[2]
[1, 2]Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия
[1]nikita.f27@mail.ru, [2]eve21@yandex.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА САМОЛЕТНОГО ТИПА И *RGB*-СЪЕМКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Аннотация. Целью данной работы является всестороннее изучение возможностей практического применения недорогих беспилотных летательных аппаратов самолетного типа собственной сборки, оборудованных камерами оптико-электронного наблюдения, для повышения эффективности ведения сельскохозяйственных работ и решения прикладных задач агропромышленного комплекса. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ финансовой недоступности коммерческих решений, таких как мультиспектральные беспилотные летательные аппараты и спутниковые сервисы для мелких и средних хозяйств; обоснование преимущества беспилотных летательных аппаратов самолетного типа и камеры видимого диапазона; детализация спектра использования данной конструкции с камерой видимого диапазона. В работе показаны преимущества и ограничения подобных разработок, а также рассмотрены перспективы подхода для создания экономичных инструментов оперативного мониторинга.

Ключевые слова: сельскохозяйственный БПЛА, Республика Хакасия, сельское хозяйство, оперативный мониторинг

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время стали необходимыми для оперативного анализа сельскохозяйственных посевов и качества почвы, планирования и отслеживания контуров полей [1]. В связи со сложившейся экономической обстановкой мелкие (до 15 работников) и средние (от 16 до 60 работников) сельхозпредприятия, особенно в небольших регионах, не могут позволить коммерческие решения прецизионного земледелия, такие как БПЛА и спутниковые сервисы. Однако потребность в экономичных инструментах оперативного мониторинга с высокой детализацией остается неизменной [2]. Использование общедоступных спутниковых данных затруднительно в связи с недостаточно высоким разрешением и зависимостью от облачности. В свою очередь коммерческие данные на сегодняшний момент труднодоступны и имеют высокую стоимость.

Доступность коммерческих БПЛА весьма ограничена в связи с их высокой стоимостью – 2,4 млн руб., а также необходимостью последующего ремонта и обслуживания [3]. Стоит отметить, что в Республике Хакасия и на юге Красноярского края проводятся научные исследования вегетационных индексов (*NDVI*, *ClGreen*, *NDRE*) посевов с помощью *DJI Matrice 210* (*Zenmuse XT2*) и Геоскан-201 (мультиспектральной камерой *MicaSense*

© Филиппов Н. И., Павлова Е. В., 2025

RedEdge-MX) на различных интервалах вегетационного периода для ОПХ «Курагинское» и ОПХ «Минино» [4, 5].

Целью данной работы является всестороннее изучение возможностей практического применения самолетных беспилотных систем (*fixed-wing*) любительской сборки (*DIY*), оборудованных камерами оптико-электронного наблюдения, для повышения эффективности ведения сельскохозяйственных работ и решения прикладных задач агропромышленного комплекса.

Материалы и методы. В работе был проведен сравнительный анализ конструктивных, эксплуатационных и взлетно-посадочных характеристик БПЛА. Также проанализировано возможное оснащение спектральными датчиками для сбора изображений, доступных для расчета спектральных индексов.

Результаты. Преимуществом БПЛА самолетного типа является его аэродинамическая схема (крыло, фюзеляж, хвостовое оперение). Конструкция с фиксированным крылом принципиально проще, надежнее и эффективнее при сопоставлении ее с мультироторной системой с множеством двигателей, пропеллеров, электронных регуляторов скорости (*ESC – Electronic Speed Controller*) и сложной системой стабилизации. Данные особенности значительно снижают количество потенциальных источников сбоя в работе конструкции [6]. Конструктивные особенности БПЛА самолетного типа позволяют достичь максимального времени полета от 60 до 120 минут и площади покрытия за один вылет от 200 до 500 га с разрешением 5–10 см на пиксель на одном заряде батареи. В сравнении с мультикоптерами, для данных задач БПЛА самолетного типа требуется аккумулятор меньшей емкости. Таким образом, снижаются как стартовые затраты, так и стоимость эксплуатации.

Комбинация самодельного самолетного БПЛА и стандартной *RGB*-камеры открывает уникальные возможности для оперативного и экономически эффективного мониторинга сельскохозяйственных угодий, особенно крупных по площади. Несмотря на спектральные ограничения, высокая детализация изображений (3–10 см/пиксель) и возможность быстрого покрытия всего хозяйства от 200 до 500+ га за вылет позволяют решать широкий спектр критически важных задач.

Конструкция самолетного БПЛА, особенно с вместительным фюзеляжем, позволяет легко устанавливать различные камеры, датчики или другое оборудование в качестве подвесной системы.

При оснащении БПЛА оптико-электронными камерами (*RGB*-сенсорами) обычно достаточно использовать либо специальное виброизолирующее крепление, либо простой одноосевой стабилизатор. Это обусловлено тем, что полет самолета характеризуется более плавным движением по сравнению с полетом мультикоптера, что приводит к меньшему уровню вибраций.

Такой подход позволяет существенно сократить расходы, поскольку отпадает необходимость в дорогостоящих трехосевых карданных подвесах

(*Gimbal*), которые, хотя и обеспечивают максимальную стабилизацию, являются избыточными для данного типа полётов.

Использование *RGB*-данных имеет технологическое преимущество, которое заключается в их экономичности относительно вычислительных ресурсов компьютера по сравнению с мультиспектральными и гиперспектральными аналогами, что делает их более практичными при работе с доступным программным обеспечением и оборудованием. Существует широкий спектр камер, возможных для использования: *GoPro* серии *Hero*, *Insta360*, *RunCam*, *Sony RX0*, *Sony A6000*. При их подключении видеотрансляции к источникам собственного или бортового БПЛА питания в большинстве случаев необходимы разъемы типов: *USB*, *HDMI*.

Данные дистанционного зондирования высокой точности, получаемые с самодельного самолетного БПЛА, имеют широкое применение в сельскохозяйственных работах и решении прикладных задач агропромышленного комплекса. Одними из наиболее частых проблем в данной области являются оценка всхожести посевов и их состояния. В дальнейшем наблюдения фокусируются на обнаружении сорняков и по возможности их обработке. На протяжении посевного периода возможен мониторинг влияния абиотических и антропогенных факторов на посевы. В перспективе для развития агропромышленности одной из важнейших задач является актуализация контуров полей и севооборотов.

Основным методом для обработки получаемых данных является применение: спектральных индексов (псевдо-*VIs*, *ExG*, *VARI*, *TGI*), различных типов алгоритмов компьютерного зрения (*YOLO*, *Faster R-CNN*) и сегментации изображений (*U-Net*), анализа текстур (*GLCM – Gray-Level Co-occurrence Matrix*, фильтры Габора), *3D*-реконструкции и морфометрии (*DSM*, *CHM*) [7; 8].

Заключение. Проверенное исследование показало, что использование *DIY fixed-wing* БПЛА совместно с *RGB*-съемкой представляет собой экономически эффективное решение для оперативного мониторинга в сельском хозяйстве, особенно для малых и средних хозяйств. Главное преимущество такого подхода – радикальное снижение стоимости в 5–10 раз, по сравнению с серийными аналогами, при сохранении ключевых функциональных возможностей. Данное утверждение подтверждается сравнительным расчетом затрат. В качестве референсного коммерческого решения рассмотрен мультироторный сельскохозяйственный БПЛА DJI *Agras T*40 стоимостью 2,4 млн руб. [3]. Ориентировочная себестоимость комплектующих для предлагаемого *DIY* БПЛА самолетного типа по данным мониторинга цен открытых интернет-магазинов (*Ozon*) на август 2025 г., составляет 101 тыс. руб. (полетный контроллер *H743-WING V3*: 29 160 руб., радиоуправление НЕВОД-2 *BLACK* – 27 023 руб., сервоприводы *Mochuo Micro Servo* (5 шт.) – 1 726 руб., АКБ *Li-Pol* 10 000 *mAh* – 83 руб. зарядное устройство 12В автоматическое – 1 000 руб., материалы – 10 000 руб., двигатель + *ESC* – 8 000 руб. (комплект для БПЛА 2–3 кг), *RGB* камера *Gopro hero* 12 –

27 000 руб.). Таким образом, соотношение стоимости коммерческого решения к себестоимости *DIY*-комплекта составляет 23,6. Анализ показал, что предложенное решение подходит для базовых задач мониторинга – визуального контроля состояния посевов, оценки всхожести и густоты стояния, выявления крупных очагов сорняков, документирования повреждений. К основным ограничениям относятся спектральная бедность *RGB*-данных, невозможность расчета *NDVI* и ранней диагностики некоторых видов стресса, зависимость от погодных условий и необходимость определенных технических навыков для сборки и эксплуатации оборудования.

Несмотря на эти ограничения, для многих сельхозпроизводителей такое решение становится единственной доступной возможностью получить детальные и актуальные данные о своих угодьях. Оно заполняет важную рыночную нишу, обеспечивая оптимальный баланс между стоимостью и функциональностью.

Список источников

1. Абдыкадыров С. К., Исаева А. Э. Об экономической эффективности применения БПЛА в сельском хозяйстве // ВОГУЭ. 2024. № 2 (5). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-ekonomicheskoy-effektivnosti-primeneniya-bpla-v-selskom-hozyaystve (дата обращения: 08.04.2025).

2. Abdykadyrov S. K., Ermekbaeva A. T., Paiysbekova K. T. Use of drones in the agricultural sector of the Kyrgyz Republic: experience of some countries // ISJ Theoretical & Applied Science. 04 (132). 2024, 154-158. URL: https://www.researchgate.net/publication/380305015_use_of_drones_in_the_agricultural_sector_of_the_kyrgyz_republic_experience_of_some_countries (дата обращения: 6.03.2024).

3. Интернет-магазин дронов и квадрокоптеров DJI. URL: https://djistor.ru/product/bpla-agrodron-dji-agras-t40 (дата обращения: 12 мая 2025 г.)

4. Картушинский А. В., Ботвич И. Ю., Картушинский С. А., Емельянов Д. В. О пространственно-временных масштабах изменчивости термодинамических и биологических параметров в тонком приземном слое сельскохозяйственного поля контактным и дистанционным методом измерения // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2024. С. 208–212.

5. Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В., Шевырногов А. П. Мониторинг сельскохозяйственных угодий ОПХ ФИЦ КНЦ СО РАН дистанционными методами // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2024. С. 257–260.

6. Горелов П. Д., Денисеня Д. И. Лысов Д. А. О применении беспилотных летательных аппаратов в производстве сельскохозяйственных культур // Моя профессиональная карьера. № 61. Т. 1 (июнь, 2024). 2024. С. 168–179.

7. Meyer G. E., Neto J. C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications // Computers and electronics in agriculture. 10.1016/j.compag.2008.03.009.

8. Woebbecke D. M. et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions // Transactions of the ASAE. 38 (1). 1995. pp. 259–269, 10.13031/2013.27838.

N. I. Filippov[1], E. V. Pavlova[2]
[1, 2]Katanov Khakass State University, Abakan, Russia
[1]nikita.f27@mail.ru, [2]eve21@yandex.ru

POSSIBILITIES OF USING AIRCRAFT-TYPE UAVS AND RGB CAMERA IN AGRICULTURE

Abstract. Abstract. The purpose of this work is to comprehensively study the possibilities of practical application of low-cost aircraft-type unmanned aerial vehicles of self-assembly, equipped with optoelectronic surveillance cameras, to increase the efficiency of agricultural work and solve applied problems of the agro-industrial complex. To achieve this goal, the following tasks were solved: analyzing the financial inaccessibility of commercial solutions, such as multispectral unmanned aerial vehicles and satellite services for small and medium-sized farms; substantiating the advantages of aircraft-type unmanned aerial vehicles and visible-range cameras; and detailing the range of applications for this design with a visible-range camera. The paper shows the advantages and limitations of such developments, as well as the prospects for creating cost-effective tools for operational monitoring.

Keywords: agricultural UAV, Republic of Khakassia, agriculture, operational monitoring