



15.04

16.04

17.04

**ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
В ЛЕСОВЕДЕНИИ, ЛЕСНОМ  
ХОЗЯЙСТВЕ И ЭКОЛОГИИ**

**МОСКВА, 2025**

**УДК 630.587+502.3:679.78+681.3.069**  
**ISBN 978-5-6047075-4-8**

«Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии»: Материалы IX Всероссийской научной конференции с международным участием (15-17 апреля 2025 г.), Москва, Россия – М.: ЦЭПЛ РАН, 2025 г. 108 с.

Редакционная коллегия: к.т.н. Д. В. Ершов (отв. редактор), к.г.н. С. В. Князева, к.б.н. А. П. Гераськина, к.т.н. Н. В. Королева, к.т.н. Е. С. Подольская, Е. Н. Сочилова, А. Д. Никитина (дизайн обложки)

В сборнике представлены тезисы 59 докладов, в которых рассмотрены вопросы современного состояния научно-технических разработок в области лесоведения и лесного хозяйства, применения новых методов и технологий комплексного анализа спутниковых данных и материалов наземного обследования.

Большое внимание в материалах конференции уделено разработкам геопорталов на базе веб-приложений, информационно-аналитических систем и сервисов мониторинга состояния и динамики лесной растительности.

Представлены результаты перспективных и инновационных исследований по методам обработки и применения космических снимков среднего, высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, детальных аэрофотоснимков и воздушного лазерного сканирования с беспилотных летательных аппаратов для оценки и картографирования характеристик лесов на разных пространственных уровнях.

Сборник предназначен для работников лесного хозяйства, экологов, биологов, специалистов по ГИС и ДЗЗ, преподавателей, студентов и аспирантов высших учебных заведений.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Первая конференция «Аэрокосмические методы и информационные системы в лесоведении и лесном хозяйстве» была проведена в сентябре 1993 г. В ней приняли участие около 50 ученых и специалистов-энтузиастов преимущественно из Москвы, Нижнего Новгорода и нескольких регионов европейской части России. Первая конференция прошла успешно, поэтому её организаторы и участники пришли к мнению о целесообразности проведения конференций по данным вопросам на регулярной основе.

Спустя годы интерес к возможностям решения задач в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии с помощью аэрокосмических методов, и геоинформационных технологий продолжает неуклонно расти, совершенствуются съемочная аппаратура, научно-технические и методические подходы к дистанционным исследованиям лесных экосистем, расширяется география фундаментальных и прикладных исследований, а также практического применения полученной информации о лесах.

В сборнике материалов IX Всероссийской научной конференции с международным участием «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» представлены научные доклады ученых России, Республики Беларусь, Азербайджана, посвященные решению приоритетных задач по следующим направлениям:

- Современные и перспективные методы дистанционного зондирования лесов;
- Методы комплексной обработки данных ДЗЗ для изучения лесных экосистем;
- Использование данных ДЗЗ для задач оценки и мониторинга ресурсного потенциала, биологического разнообразия, экосистемных функций лесов и бюджета углерода в лесах;
- Информационные системы, программы и технологии для создания, хранения и представления геопространственных данных о лесах;
- Новые методы обработки данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования для оценки и мониторинга характеристик лесов.

Публикуемые тезисы докладов приведены в виде, представленном авторами, без редактирования, за исключением исправления грамматических ошибок.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	3
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b> .....	4
<b>КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ</b> <i>Агаева К.С.</i> .....	9
<b>ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВОЗИСТОСТИ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ</b> <i>Алексеев А.Б., Плотникова А.С.</i> .....	10
<b>ВЫЯВЛЕНИЕ РАННИХ СТАДИЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ КОРОЕДОМ ТИПОГРАФОМ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ И МАТЕРИАЛОВ ДЗЗ</b> <i>Алексеев А.С., Черниковский Д.М.</i> .....	11
<b>ПЛАГИН OPEN SOURCE QGIS ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПРОСЕК ПОД ЛЭП</b> <i>Бахрамхан Я.О., Ермаков Д.М., Подольская Е.С.</i> .....	12
<b>ТЕХНОЛОГИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД ПО РАЗНОСЕЗОННЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ LANDSAT</b> <i>Белова Е.И., Князева С.В., Королева Н.В., Ершов Д.В.</i> .....	14
<b>ОСОБЕННОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ НА МАТЕРИАЛАХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ</b> <i>Богданов А.П., Ильинцев А.С.</i> .....	16
<b>ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГОДОВОГО СТОКА ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РУБОК ЛЕСА НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА Р. МЕЗЕНЬ (УДОРСКИЙ РАЙОН РЕСПУБЛИКИ КОМИ)</b> <i>Боровлёв А.Ю., Мыльникова Т.А., Елсаков В.В.</i> .....	18
<b>ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СЪЁМКИ БПЛА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКЦИЙ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПО ПЛОЩАДИ И ФОРМЕ</b> <i>Браславская Т.Ю., Никитина А.Д., Князева С.В.</i> .....	20
<b>РЕАЛИЗАЦИЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ВЕБ-СЕРВИСА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ПОГОДЫ</b> <i>Вихляев Д.Р.</i> .....	22
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ И УГЛЕРОДА ДРЕВОСТОЕВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ</b> <i>Гаврилюк Е.А.</i> .....	23
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ</b> <i>Глаголев В.А., Зубарева А.М.</i> .....	25
<b>КОРРЕЛЯЦИЯ NDVI С ЗАПАСАМИ ФИТОМАССЫ В ЮЖНЫХ СУБАРКТИЧЕСКИХ ТУНДРАХ ЯМАЛА</b> <i>Горбунова А.М., Низаметдинов Н.Ф.</i> .....	27
<b>СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ПО МАТЕРИАЛАМ ДЗЗ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА</b> <i>Гофман М.Д.</i> .....	29

ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ О. КУНАШИР (КУРИЛЬСКИЕ О-ВА) <i>Грищенко М.Ю., Фурунжиева В.А.</i> .....	31
АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЗАРАСТАНИЯ ОХРАННЫХ ЗОН ТРУБОПРОВОДОВ <i>Демчук Е.В., Кулик Е.Н.</i> .....	32
РАЗРАБОТКА ГИС-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА ПРИ АНАЛИЗЕ ДОРОЖНОЙ СЕТИ <i>Добровольский Д.А., Подольская Е.С.</i> .....	34
ТЕМНОХВОЙНЫЕ ЛЕСА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ: НОВЫЕ КАРТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРЬ В XXI ВЕКЕ <i>Дудов С.В., Дзизюрова В.Д., Рябенко О.И., Грищенко М.Ю., Корзников К.А.</i> .....	35
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО ЯРУСА ДРЕВОСТОЯ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «КИВАЧ» <i>Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Тихонов Д.Н., Никитина А.Д., Белова Е.И.</i> .....	36
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРЯМЫХ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДА ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ РОССИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ПРОДУКТАМ <i>Ершов Д.В., Сочилова Е.Н., Ковганко К.А.</i> .....	39
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ И МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ: ЦЕЛИ, ТРУДНОСТИ, РЕЗУЛЬТАТЫ <i>Завьялов З.А., Манапова Д.И.</i> .....	41
СВЯЗЬ ДИСТАНЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ И НАСАЖДЕНИЯ С РАДИАЛЬНЫМ ПРИРОСТОМ ДЕРЕВЬЕВ: РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ <i>Иванова Ю.Д., Ковалев А.В., Суховольский В.Г.</i> .....	41
АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА НА СПЛОШНЫХ ВЫРУБКАХ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА <i>Ильинцев А.С., Черкасов Н.С.</i> .....	43
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ <i>Карминов В.Н., Митрофанов Е.М., Чумаченко С.И.</i> .....	45
ПРИМЕНЕНИЕ ГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ЛЕСОВ МОСКОВСКОЙ ЧАСТИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА "ЛОСИНЫЙ ОСТРОВ" <i>Киселева В.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В.</i> .....	47
ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ ПО ВЫСОКОДЕТАЛЬНЫМ ДАННЫМ РОССИЙСКОГО СПУТНИКА РЕСУРС-П1 <i>Князева С.В., Никитина А.Д., Белова Е.И.</i> .....	49
ВЫЯВЛЕНИЕ ОЧАГОВ ВСПЫШЕК ХВОЕГРЫЗУЩИХ НАСЕКОМЫХ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ <i>Ковалев А.В., Суховольский В.Г.</i> .....	51
ВЛИЯНИЕ РАЗРАБОТКИ РАЗРЕЗА «ЗАРЕЧНЫЙ» ТАЛДИНСКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЛЕСНОЙ ПОКРОВ <i>Коломеец А.К., Хамедов В.А.</i> .....	53
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕРВИСОВ YANDEX CLOUD ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ <i>Котельников Р. В.</i> .....	54

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ И ТЕКУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСОВ В РАЙОНАХ НЕФТЕДОБЫЧИ – ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ НА ПРИМЕРЕ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ <i>Кравцова В.И., Зимин М.В., Чалова Е.Р.</i> .....	56
ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ <i>Кудрявцев А.Ю.</i> .....	57
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИНДЕКСА NDVI В ОКРЕСТНОСТЯХ СТ. ВЁШЕНСКАЯ ШОЛОХОВСКОГО РАЙОНА РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2022-2024 ГГ. <i>Лиховидова Е.В.</i> .....	59
ОПЫТ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ ПЕРМСКОГО КРАЯ СРЕДСТВАМИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ЛЕС» <i>Макурин Д.В., Полевщикова Ю.А., Шевелев Д.А., Иванина Л.А.</i> .....	61
ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСОВ <i>Мальшиева Н.В., Золина Т.А., Филипчук А.Н., Сильнягина Г.В.</i> .....	63
ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ СТЕЛОМ МОЛОДЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ <i>Мателенок И.В., Семенов Д.А.</i> .....	64
ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ КАК СПОСОБ ЗАЩИТЫ ОТ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ <i>Медведева М.А., Иткин В.Ю.</i> .....	66
СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЛЕСОПОКРЫТЫХ ТЕРРИТОРИЙ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ БАССЕЙНОВ РЕК ПЕЧОРЫ И ВЫЧЕГДЫ <i>Мыльникова Т.А., Боровлёв А.Ю., Елсаков В.В.</i> .....	67
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ С БАЗОЙ ДАННЫХ «ПОДСТИЛКИ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ РОССИИ» <i>Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Честных О.В.</i> .....	68
ПЕРЕХОД ОТ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ К MASK R-CNN: ОЦЕНКА СОГЛАСОВАННОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОСНОВЫХ ЛЕСОВ <i>Никитина А.Д.</i> .....	70
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ КАРКАСОВ ГОРОДОВ КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ ПЯТИГОРСКА, ЕССЕНТУКОВ, КИСЛОВОДСКА, ЖЕЛЕЗНОВОДСКА И ЛЕРМОНТОВА) <i>Паташова Е.С., Скрипчинская Е.А.</i> .....	71
БИОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ <i>Петржик Н.М., Сандлерский Р.Б., Ермохина К.А., Тушигмаа Ж.</i> .....	73
СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСЕРВИСОВ В МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ <i>Плотникова А.С., Архипцева Е.А., Нарыкова А.Н., Гераськина А.П.</i> .....	75
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ НА ПРИМЕРЕ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Подольская Е.С., Еришов Д. В., Ковганко К. А.</i> .....	76
СОВРЕМЕННЫЕ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА <i>Подольская Е.С., Шайхметов А. Р.</i> .....	78

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ ПО СНИМКАМ SENTINEL-2 <i>Попова А.К.</i> .....	80
ГЕОСЕРВИС ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ХВОЙНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ПРОГНОЗА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ <i>Пушкин А.А., Коцан В.В., Ильючик М.А.</i> .....	81
ДИСТАНЦИОННАЯ ТАКСАЦИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ <i>Савенков Д.А., Лябзин А.Л., Деметьев Г.Д., Калинин И.В.</i> .....	83
ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ЛЕСОВ <i>Сидоренков В.М., Капиталинин Д.Ю., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Рябцев О.В.</i> .....	84
СБОР И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ ПО СЕЗОННЫМ ДОРОГАМ ДЛЯ ЛЕСОТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ <i>Синицина А.Н., Подольская Е.С.</i> .....	86
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОГО УЧАСТКА В ГОСУДАРСТВЕННОМ ПРИРОДНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ «КИВАЧ» (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ) <i>Смирнов Е.А., Ершов Д.В., Тихонов Д.Н.</i> .....	88
МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ И СПУТНИКОВЫХ ПРОДУКТОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Сочилова Е.Н., Ершов Д.В., Королева Н.В.</i> .....	90
ПОЧЕМУ ПОГИБЛИ СОСНЫ В КРАСНОТУРАНСКОМ БОРУ: РАССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ <i>Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Красноперова П.Е., Солдатов В.В.</i> .....	91
ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ВСПЫШЕК ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ВИД СВЕРХУ <i>Суховольский В.Г., Ковалев А.В.</i> .....	93
ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АРХИПЕЛАГА ТУЛОЛАНСАРИ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК «ЛАДОЖСКИЕ ШХЕРЫ») <i>Тарасенко В.В., Раевский Б.В.</i> .....	95
ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ДРЕВОСТОЕ ЗАРАСТАЮЩИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ ЧЕРЕПОВЕЦКОГО РАЙОНА ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Тихонов Д.Н., Белова Е.И., Ершов Д.В.</i> .....	96
ДИНАМИКА ПОРОДНОГО СОСТАВА ЛЕСОВ КИЛЕМАРСКОГО УЧАСТКА НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖЕГОРОДСКОЕ ПОВОЛЖЬЕ» ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДЗЗ <i>Тихонова Е.В., Горнов А.В., Ершов Д.В., Белова Е.И., Тихонов Д.Н., Гаврилюк Е.А., Никитина А.Д., Наумкин А.А., Титовец А.В., Кольцов Д.Б.</i> .....	98
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИСУТСТВИЯ ОСИНЫ В ТАЁЖНЫХ ЛЕСАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ SENTINEL-2 И АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ <i>Трошин Д.С., Файзулин М.С.</i> .....	100
ОЦЕНКА ЭСТЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАНДШАФТОВ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА <i>Черткова Е.П., Суховольский В.Г., Ковалев А.И., Тарасова О.В., Замолотчиков Д.Г.</i> .....	102

IX Всероссийская научная конференция с международным участием  
«Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении,  
лесном хозяйстве и экологии»  
15-17 апреля 2025 г., Москва, Россия

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВБЛИЗИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ  
ЛАНДШАФТОВ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДЗЗ И ЦМР

*Шилов В.А.*..... 104

ДЕШИФРОВочНЫЕ ПРИЗНАКИ УСЫХАНИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ НА  
ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ SENTINEL-2

*Шилонос Л.А., Иванчина Л.А., Шихов А.Н.* ..... 105



## **КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ**

*Агаева К.С.*

АГУНП, г. Баку, Азербайджан

*E-mail: kama\_azeri@mail.ru*

Использование современных географических информационных систем (ГИС) и космических снимков дают возможность охвата больших территорий, быстроту проведения исследований и решение задач картографирования. Целью работы является разработка методики обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для выделения классов растительного покрова и землепользования и картирование состояния лесных горных территорий южного склона Большого Кавказа Гахского района Азербайджана с использованием ДДЗ, ГИС технологий.

В работе собраны и обобщены данные полевых исследований, топографических карт и литературных источников, а также проведено трехмерное картографическое моделирование. Для получения классификационной карты растительного покрова и землепользования разработана функциональная схема обработки данных дистанционного зондирования, используя алгоритмы построения дерева принятия решений. Обработка и анализ космического снимка Landsat – 9 (съёмка 11.07.2022 г.) проводился в программном пакете ERDAS Imagine, ArcGIS. Для выбора обучающих классов при построении дерева решений были применены алгоритмы вычисления главных компонент, неконтролируемой классификации и вычисления индексного изображения (NDVI). Далее после окончательного выбора оптимальной совокупности обучающих классов проведена контролируемая классификация для проведения выбора распознающего алгоритма из этих трёх методов параллелепипедов, метод по ближайшему соседу и метода максимального правдоподобия, который дал более точную классификацию. Для каждого класса объектов были представлены контуры обучающей выборки к шести выбранным классам и вводилась информация соответственно их принадлежности к смешанным лесам, кустарникам, лугам, полукустарникам, открытым пространствам, поселениям и рекам.

По космическому снимку Landsat 9 (июль 2022 г.) рассчитан NDVI диапазоны показателей -0,09 до 0,67 состояния растительного покрова для исследуемой территории, а также получена классификационная карта растительного покрова и землепользования для исследуемой территории общей площадью 100,81 км<sup>2</sup>, которая разделена на шесть классов: смешанные леса 20, 81 км<sup>2</sup>, луга 49.93 км<sup>2</sup>, кустарники 11,80 км<sup>2</sup>, полукустарники и

открытые пространства 9,70 км<sup>2</sup>, реки 2,95 км<sup>2</sup>, поселения 5,62 км<sup>2</sup>. Полученные результаты и созданная электронная карта могут быть использована в целях территориального планирования, дальнейшего экологического мониторинга и анализа динамики лесного растительного покрова для исследуемой территории.

## **ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВОЗИСТОСТИ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

*Алексеев А.Б., Плотникова А.С.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: roxrox@mail.ru*

Ключевыми показателями фитолимата леса являются интенсивность светового потока, температурный режим и степень проникновения атмосферных осадков в нижние ярусы. Измерение этих параметров одновременно на больших лесных участках является весьма трудоемким процессом. В отечественном лесоведении известен комплексный показатель, который надежно отражает характеристики фитолимата леса — сквозистость древостоя. Сквозистость определяется как суммарная проекция всех просветов в древостое на: мысленную горизонтальную плоскость, расположенную над пологом леса - вертикальная сквозистость, или на мысленную полусферу, ограниченную горизонтом в любой точке под пологом леса - сквозистость на полусферу.

В результате исследования разработан метод оценки вертикальной сквозистости древостоя на основе материалов воздушного лазерного сканирования. Метод был протестирован на сосновом древостое южнотаёжных лесов Европейской части России, находящемся в Тверской области. Для исследования выбраны три группы пробных площадей (ПП) сосняков кустарничково-зеленомошных с различной долей ели в ярусах древостоя, подроста и подлеска: (I) сосняки чернично-зеленомошные - без ели в ярусе древостоя и единичным подростом ели в ярусе подроста и подлеска; (II) сосняки чернично-зеленомошные с долей ели в нижнем подъярусе древостоя 5-10% и в ярусе подроста и подлеска 20-30 % от общей сомкнутости яруса; (III) елово-сосновые чернично-зеленомошные с долей ели в верхнем подъярусе древостоя 15-20 %, в нижнем подъярусе – 20 %, в ярусе подроста и подлеска 20-30 %.

Метод оценки вертикальной сквозистости состоит из четырех этапов: (1) обработка исходного облака точек лазерного отражения (ТЛО), классификация облака точек на классы «земля» и «растительность», разделение класса «растительность» на высотные слои по 1 м;

(2) построение трехмерной модели слоя древостоя путем преобразования каждого метрового слоя в регулярную структуру с шагом 1 м и вычисления в ячейках числа (3) сборка трехмерной модели фитослоев древостоя из сформированных послойных метровых моделей для диапазонов: подрост/подлесок 1 - 10 м, древостой выше 10 м, весь древостой выше 1 м; (4) Вычисление вертикальной сквозистости фитослоев древостоя по каждому вертикальному ряду ячеек модели в зависимости от количества метровых слоев и признака заполненности ячейки ТЛО. В результате для каждого фитослоя получены двухмерные растровые модели сквозистости с пространственным разрешением 1 м.

Верификация полученных моделей выполнена в границах ПП на основе многолетнего отклика растительности на световой режим. Характеристика освещенности сообществ внутри ПП была определена как средневзвешенный балл освещенности видов по экологической шкале Э. Ландольта. Для установления корреляционной связи между средним значением вертикальной сквозистости и средним баллом освещенности флоры в пределах ПП был применен метод ранговой корреляции Спирмена. Была выявлена сильная положительная корреляционная связь вертикальной сквозистости всего древостоя ( $R^2 = 0.7$ ) и ярусов подроста и подлеска ( $R^2 = 0.74$ ) с освещенностью растений по шкале Э. Ландольта.

Благодарности. Авторы исследования выражают благодарность директору ЦЭПЛ РАН, член-корр., д.б.н. Н. В. Лукиной и к.б.н. Н.Е. Шевченко за ценные консультации по лесоведению, лесной таксации и геоботанике. Работа выполнена в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (НИОКТР 124013000750-1).

## **ВЫЯВЛЕНИЕ РАННИХ СТАДИЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ КОРЕДОМ ТИПОГРАФОМ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ И МАТЕРИАЛОВ ДЗЗ**

*Алексеев А.С., Черниковский Д.М.*  
СПбГЛТУ, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a\_s\_alekseev@mail.ru*

Исследование посвящено выявлению ранних стадий повреждения еловых насаждений кореедом-типографом. С практической точки зрения важнейшее значение представляет выявление начальной стадии повреждения кореедом, при которой колонизированные деревья еще не проявляют отчетливых симптомов повреждения, а хвоя сохраняет зеленый цвет. Задача исследования состояла в изучении методами математической статистики изменений вегетационных индексов NDVI и SWVI для еловых насаждений, которые за три года прошли путь от здоровых до сильно поврежденных.

Объектами исследования служили 12 очагов массового размножения короеда-типографа и других стволовых вредителей, выявленных в 2021 г. на территории Выборгского и Гатчинского районов Ленинградской области в спелых еловых насаждениях. При проведении наземных работ было выполнено обследование и картирование очагов. С помощью картографического сервиса EO Browser на территорию очагов были получены материалы космической съемки Sentinel-2B за июнь-сентябрь 2020 г. (отсутствие повреждения), 2021 г. (ранние стадии повреждения) и 2022 г. (поздние стадии повреждения). На основе полученных материалов ДЗЗ были рассчитаны вегетационные индексы NDVI и SWVI. С помощью дисперсионного анализа установлено достоверное и значимое снижение значений обоих индексов по годам повреждения, а также по годам и месяцам. Отмечено, что при повреждении насаждений короедом меняется сезонная динамика значений индексов. Выявлены достоверные линейные тренды снижения значений индексов по годам и месяцам. Анализ коэффициентов чувствительности и синхронности изменения вегетационных индексов по годам и месяцам показал, что снижение значений индексов происходит независимо от внешних (случайных) факторов, а также не синхронно относительно друг от друга.

В практическом отношении выявленные закономерности изменения вегетационных индексов NDVI и SWVI могут служить сигналом о начальной стадии повреждения насаждений и основанием для проведения наземных обследований с целью раннего обнаружения повреждений и своевременного предотвращения их распространения.

## **ПЛАГИН OPEN SOURCE QGIS ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПРОСЕК ПОД ЛЭП**

*Бахрамхан Я.О.<sup>1</sup>, Ермаков Д.М.<sup>2,3</sup>, Подольская Е.С.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> НИУ ВШЭ, Москва, Россия

<sup>2</sup> ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

<sup>4</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: yaobakhramkhan@edu.hse.ru*

Мониторинг объектов энергетической инфраструктуры в лесных ландшафтах необходим для предотвращения аварий на линиях электропередач (ЛЭП) и обеспечения их бесперебойной работы. Ввиду труднодоступности расположения лесных просек ЛЭП из-за низкой плотности дорожной сети и высокой лесистости регионов России, расположенных в

Восточной Сибири, для задачи мониторинга просек под ЛЭП целесообразно применять дистанционные методы.

Ранее авторами был разработан алгоритм автоматического выделения лесных просек под ЛЭП на основе методов машинного обучения и компьютерного зрения на космических снимках Sentinel-2. Для создания полноценной системы дистанционного мониторинга необходим прототип геоинформационной системы, включающий в себя информацию о степени зарастания просек под ЛЭП и о состоянии линий электропередач вместе с их пилонами. В такой ГИС автоматическая опция получения результатов выделения лесных просек под ЛЭП позволяет создать маску лесных просек непосредственно в картографическом виде проекта QGIS.

Для интеграции результатов выполнения указанного алгоритма с Open Source QGIS разработан QGIS-плагин «Power line clearings extractor». На вход плагина загружаются летний и зимний снимки, полученные на одну и ту же территорию. Летний снимок должен иметь пять каналов: синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный, зимний снимок – три: синий, зеленый и красный. Снимки собираются в единый массив данных, предварительно обрабатываются с помощью нормализации и контрастирования с насыщением. На основе полученного набора данных летних и зимних каналов рассчитываются спектральные индексы SAVI, NDWI и NDBI. Плагин включает предобученную на космических снимках территории таежной зоны Восточной Сибири модель логистической регрессии для получения карты классификации наземного покрова, детектор границ Канни для извлечения краев маски низкорослой растительности из карты классификации и алгоритм вероятностного преобразования Хафа для получения растровых масок линейных объектов - лесных просек под ЛЭП. Результат автоматически добавляется в QGIS, сохраняется в директории сохранения результатов, указанной пользователем. Плагин обладает такими дополнительными функциями, как добавление на карту использованных для выделения лесных просек космических изображений, что позволяет визуально сравнить качество выделения просек под ЛЭП.

На основе данного плагина создана модификация плагина, которая использует несколько пар снимков. Летние и зимние снимки разделены по разным директориям, при этом летний и зимний снимок, полученные на один и тот же участок, должны иметь одинаковые имена файлов. Алгоритм завершает свою работу, когда все пары снимков обработаны. Результаты последовательно добавляются на карту.

Таким образом, плагин «Power line clearings extractor» позволяет автоматически провести границы лесных просек под ЛЭП и исследовать их на зарастание путем, например,

расчета индекса растительности NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) и формировать летное задание для беспилотных летательных аппаратов, снимающих участок лесной просеки под ЛЭП.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКИ РАН (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) в части разработки алгоритмов обработки дистанционных данных и государственного задания ЦЭПЛ РАН по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1) в части интеграции результатов с Open Source QGIS.

## **ТЕХНОЛОГИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД ПО РАЗНОСЕЗОННЫМ СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ LANDSAT**

*Белова Е.И., Князева С.В., Королева Н.В., Ершов Д.В.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*Email: belova@ifi.rssi.ru*

Для устойчивого управления лесами, разработки стратегий развития лесной отрасли, решения экологических задач и принятия управленческих решений необходимо иметь актуальную объективную информацию о лесах: их динамика и состав в региональном масштабе. Для решения данной задачи была разработана технология картографирования лесных экосистем и основных древесных пород.

Технология предусматривает обработку территории Российской Федерации по ячейкам размером 1x1 градус. Для каждой ячейки формируется архив с данными ДЗЗ, вспомогательными тематическими и наземными данными. Дистанционные данные – это набор безоблачных композитных изображений Landsat для шести различных фенологических периодов, границы которых для каждой ячейки рассчитывались индивидуально по данным MODIS (MCD12Q2 v.6) (Гаврилюк Е.А., 2021). Композиты строятся с буферной зоной 0,5 градуса, чтобы в последствии можно было создать бесшовное картографическое покрытие. Каждый композит включает в себя каналы видимого диапазона, ближний ИК и два средних ИК канала. Пространственное разрешение композитов – 30м. Так же для каждого композита вычисляются спектральные индексы: FCI, NDVI, NDVISI, NDWI и NDSI. К вспомогательным данным относятся: цифровая основа лесных и других наземных экосистем (вектор, в атрибутивной таблице указаны возраст и порода), которая формируется в рамках проекта ВИП ГЗ (<https://ritm-c.ru/>), а также тематические продукты, построенные по данным ДЗЗ: глобальный продукт по мониторингу изменений лесного покрова университета

Мерилленда (<https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2022-v1.10/download.html>), карта с/х земель (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15481603.2019.1690780>), карта урбанизированных территорий (<https://www.nature.com/articles/s41597-020-00580-5>) и глобальная карта экосистем Европейского космического агентства (<https://esa-worldcover.org/en>).

Технология включает в себя последовательное картографирование каждой ячейки 1x1 градус для региона интереса. Первоначально строится карта основных наземных экосистем, после чего территории, покрытые лесами по полученной карте, классифицируются по основным древесным породам.

Карта основных наземных экосистем включает в себя следующие классы: лесные территории, урбанизированные территории и открытая почва, луговая растительность, с/х культуры, водные объекты, болота, кустарниковая растительность.

Перечень классов карты основных древесных пород зависит от региона картографирования и произрастающих в нем лесов.

Картографирование состоит из трех основных этапов:

- Подготовка опорной выборки:

Для картографирования основных экосистем для создания обучающей выборки за основу берется карта экосистем ESA, из которой удаляются все изменения. Так же проводится ряд морфологических операций для удаления шумов и краевых эффектов. Далее извлекается зональная статистика из набора композитных изображений и проводится фильтрация выбросов.

Для создания карты основных древесных пород обучающая выборка формируется путем обработки данных из цифровой основы лесных экосистем: удаляются изменения, а также полигоны с площадью менее 1га, видовой состав группируется по родам, исключается из анализа внутренняя буферная зона размером 30м (1 пиксел Landsat). Далее также извлекается зональная статистика и проводится фильтрация.

- Обучение моделей классификации Random Forest, их оценка точности и классификация композитных изображений:

Для каждой ячейки сети строится своя модель классификации с использованием опорных данных как целевой ячейки, так и соседних восьми, чтобы создать сбалансированную по классам, а также представительную для региона выборку. Для каждого квадрата создается отчет с оценкой точности классификационной модели для экспертного контроля. После проводится классификация.

- Создание карты региона из ячеек 1х1 градус:

Карты экосистем/основных пород, построенные по ячейкам 1х1 градус собираются в единое бесшовное покрытие. В местах перекрытий пикселям присваивается класс по мажоритарному признаку: какой класс встречается чаще, тот и войдет в результирующую карту; либо используются суммарные значения вероятностей появления того или иного класса на перекрывающейся территории.

Технология реализована через автоматические пайплайны на языке программирования Python в системе контроля исходного программного кода gitea (<https://about.gitea.com/>). ПО разворачивается локально на серверах лаборатории. Данная система имеет пользовательский web-интерфейс, что позволяет параметризовать этапы создания карт, в следствие чего нет необходимости править исходный программный код, а также это позволяет пользователям без специальных навыков использовать данную технологию. Так же данное ПО дает возможность распараллеливать процессы выполнения всех этапов картографирования по разным вычислительным узлам.

Работа выполнена за счет средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ НА МАТЕРИАЛАХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ**

Богданов А.П.<sup>1,2</sup>, Ильинцев А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФБУ «СевНИИЛХ», Архангельск, Россия

<sup>2</sup> САФУ имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

E-mail: [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru)

Лиственница (*Larix sp. Mill.*) является одной из ключевых лесообразующих пород в бореальных лесах, играя важную роль в сохранении биологического и ресурсного потенциала как на глобальном, так и на региональном уровнях. В России лиственница занимает первое место по площади распространения и запасу древесины. Эта древесная порода формирует разнообразные растительные сообщества, способные занимать широкий спектр местообитаний, обогащая видовой состав территорий благодаря сопутствующим видам растений. Лиственничный лес - важный, но плохо изученный тип экосистемы. На территории Европейского Севера России лиственница находится в состоянии регрессии. Например, в Архангельской области лиственница Сукачева (*Larix Sukaczewii Dylis.*) занимает лишь 0,2 % лесопокрытой площади. В Республике Коми её доля составляет 0,7 %, а в



Республике Карелия лиственница встречается крайне редко, преимущественно в виде незначительной примеси. В Вологодской области естественные насаждения с преобладанием лиственницы занимают небольшие площади и охраняются на региональном уровне. На территории Мурманской области зафиксированы единичные экземпляры лиственницы. По данным лесного учета площадь лиственничников на Европейском Севере постоянно сокращается, что подтверждают наблюдения на стационарных объектах демонстрируя постепенную смену лиственницы из-за отсутствия благонадежного подроста и других факторов. Лиственница, если этому не способствуют внешние факторы в лесах северной тайги слабо возобновляется под собственным пологом и постепенно сменяется елью не выдерживая с ней конкуренции.

Сохранение генетического разнообразия является актуальной задачей. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет собой эффективный способ изучения зонального распределения и типологической структуры лиственничников на территории Европейского Севера России. Адаптация лиственницы к широкому диапазону местообитаний подчеркивает её высокую экологическую пластичность, что делает необходимым изучение её распространения в зависимости от широтного градиента, высотной приуроченности и особенностей рельефа.

Целью исследования является изучение особенностей дешифрирования лиственницы на основе материалов космической съемки высокого пространственного разрешения и фенологических особенностей лиственницы. Для достижения цели исследования на территории Архангельского лесничества проведены полевые работы для получения лесоводственно-таксационной характеристики спелого елово-лиственничного древостоя. С помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) получена детальная съемка для изучения дешифровочных показателей. С помощью детальной съемки рассмотрены особенности распределения лиственницы на объекте исследования. В работе использованы космические снимки, полученные с космического летательного аппарата Sentinel-2, а также аэрофотоснимки, сделанные с помощью БПЛА DJI Mini 2. Съемка выполнялась на высоте 100 метров с использованием камеры с матрицей 12 мегапикселей, что обеспечило детализацию до 5 см/пиксель. Применение сверхдетальной съемки позволило провести точное картирование крон лиственницы и оценить их долю покрытия на каждой пробной площади.

Использование фенологических особенностей лиственницы и выбор оптимального периода съемки с космического летательного аппарата высокого пространственного разрешения позволяют эффективно выделять древостои с участием и преобладанием этой

породы. Проведенный однофакторный анализ подтвердил статистически значимую связь между спектральной яркостью и горизонтальной проекцией крон на пробных площадях. Полученные результаты исследования открывают новые возможности для мониторинга и изучения лиственных лесов с использованием современных технологий дистанционного зондирования.

## **ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГОДОВОГО СТОКА ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РУБОК ЛЕСА НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА Р. МЕЗЕНЬ (УДОРСКИЙ РАЙОН РЕСПУБЛИКИ КОМИ)**

*Боровлёв А.Ю., Мыльникова Т.А., Елсаков В.В.*

Институт биологии ФИЦ КомиНЦ РАН, Сыктывкар, Россия

*E-mail: cyber.borum@gmail.com*

Лесозаготовительная деятельность является ключевым фактором воздействия на важнейшие функции лесных экосистем, такие как средообразующую, водорегулирующую, почвозащитную. Оценка влияния леса на гидрологический цикл и речной сток – это классическая задача экспериментальной и теоретической гидрологии. Существует широкий спектр свойств, которые лесные экосистемы оказывают на общий характер гидрологического цикла на Земле. Проведение сплошных промышленных рубок приводит к нарушению гидрологического режима территории. В соответствии с рядом научных исследований (Мухамедшин и др., 2003) можно утверждать, что лесозаготовительная деятельность влияет на характер изменения колебаний годового стока. Использование бассейнового подхода позволяет осуществить пространственную оценку территории, а также реализовать методики экологического мониторинга. Водосборный бассейн представляет собой сложную взаимосвязанную структуру, взаимодействующих природных и антропогенных факторов.

В качестве объекта исследования выступает водосборный бассейн реки Мезень на территории Удорского района Республики Коми. Территория выбрана из-за значительных площадей сплошных рубок, выполненных с 1967 года до начала 1990-х годов в рамках советско-болгарского соглашения о совместных лесозаготовках от 3.12.1967. К 1980 году суммарная интенсивность сплошных вырубок достигала 30 тыс. га в год, объем лесозаготовок – 6 млн. м<sup>3</sup>/год. Такой характер освоения должен был сказаться на гидрологических параметрах рек, в частности в объеме годового стока. Данные гидрологических наблюдений получены от Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Коми (Коми ЦГМС).

В ходе исследования были реализованы следующие подходы пространственного анализа в ГИС. Во-первых, на основе цифровых моделей рельефа SRTM 90 была построена граница исследуемого водосборного бассейна, разделенного на модельные участки, согласно расположенным на реке Мезень гидрологическим постам: Мака́р-Ыб (верхнее течение,  $63.6353^\circ$  с.ш.,  $49.4507^\circ$  в.д.) и Большая Пысса (среднее течение  $64.1736^\circ$  с.ш.,  $48.8167^\circ$  в.д.). Во-вторых, осуществлен расчёт и анализ долговременной динамики площадных характеристик на основе данных дистанционного зондирования Земли. Использовались как архивные космоснимки Corona KH-1 (1969–1975 гг.), так и мультиспектральные снимки Landsat 4-5 (1980-2012 гг.) и Landsat 8 (с 2013 г. по настоящее время). Количественный анализ площадей рубок был получен в результате использования метода мультिवременных композитов.

Статистические расчеты гидрологических колебаний объемов годового стока по постам Мака́р-Ыб и Большая Пысса реализовывались на основе многолетних рядов наблюдений с 1960 по 2022 гг. Пространственный анализ сплошных рубок осуществлен на территории модельного водосбора между двумя рассматриваемыми гидрологическими постами. Максимальные площади рубок были зафиксированы в периоды с 1970 по 1974 года ( $1170.1 \text{ км}^2$ , 12.1% от площади водосборного бассейна), с 1975 по 1979 годы ( $807.4 \text{ км}^2$ , 8.3 % от площади водосбора), с 1980 по 1984 годы ( $351.2 \text{ км}^2$ , 3.6% от площади водосбора). В последующие периоды динамика лесозаготовок составляла в среднем  $100 \text{ км}^2$  за каждые пять лет.

Показатели годового стока для участка реки модельного водосбора считались как разница значений между данными с постов Мака́р-Ыб (верхнее течение, «исток» модельного бассейна) и Большая Пысса (среднее течение, «устье» модельного водосбора). Для рассмотренного периода наблюдений и модельного участка показатель варьировал в пределах от  $2,05 \text{ км}^3\text{год}^{-1}$  в 1995 г. до  $5,33 \text{ км}^3\text{год}^{-1}$  в 2019 г. С 1960 по 1981 гг. наблюдается снижение величин стока, период 1982 - 1987 характеризуется фазой роста. Последующие года наблюдали нестабильный характер изменений. При анализе колебаний наиболее удачным является метод построения диаграмм размаха. Выборка значений годового стока была сгруппирована по пятилетиям (также, как и данные по площадям рубок). Диаграмма размаха для каждого пятилетия показала, что с момента начала активного промышленного освоения территории модельного водосбора (1980–1985 гг.) для годового стока характерен рост разброса межгодовых показателей, фиксируемы в течение последующих 25 лет. Для периода с 1960 по 1979 гг. среднее значение дисперсий годового стока составила 0.27, а в последующие 20 лет промышленного освоения выросла в два раза ( $0.52 \text{ км}^3\text{год}^{-1}$ ). Наиболее

значимый разброс данных годового стока приходится на период последних лет «болгарских рубок» - 1995–1999 гг. ( $0.89 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$ ).

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР (№125021902460-2).

## **ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СЪЁМКИ БПЛА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКЦИЙ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПО ПЛОЩАДИ И ФОРМЕ**

*Браславская Т.Ю., Никитина А.Д., Князева С.В.*

ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: t-braslavskaya@yandex.ru*

Построение плана древостоя с нанесением на него оснований стволов деревьев и проекций их крон – традиционный вид работ при закладке в лесах постоянных пробных площадей для многолетних исследований. На основе таких планов можно делать заключения об условиях роста и развития деревьев и взаимоотношениях между ними, об общей пространственной структуре древостоев, что дает важную информацию для понимания причин их динамики и ее прогнозирования (Абатуров А.В., Галицкий В.В. О машинной обработке планов древостоев. Экология. 1995. № 3; доступно по ссылке [https://disk.yandex.ru/i/S\\_E74-En1aHZAQ](https://disk.yandex.ru/i/S_E74-En1aHZAQ)). В цитируемой работе на примере одновозрастных (70-100 лет) хвойных лесов Подмосквы обсуждались способы количественного анализа проекций крон, нанесенных на планы древостоев. Один из способов заключается в том, что для оценки состояния древостоя информативны коэффициент вариации параметров проекций крон и тип распределения у этих параметров. Особенно информативны такие параметры как площадь и индекс формы (который вычисляется как отношение квадрата периметра проекции кроны к произведению площади проекции на  $4\pi$ ; для круга значение этого отношения минимально и равно 1, а для различных многоугольников, особенно неправильных – больше 1). На пробной площади большого размера, включающей несколько сотен деревьев близкого возраста, при свободном росте этих деревьев распределение проекций их крон сходно с нормальным, а отклонение от этого типа распределения (например, более высокая вариация или выраженная асимметрия) указывает на неслучайную дифференциацию деревьев по параметрам крон (и по другим размерам) в результате воздействия на их рост каких-то факторов – например, загущенности древостоя, в составе которого одни деревья подавляются другими, более конкурентоспособными. Поэтому высокий коэффициент вариации у проекций крон деревьев и отклонение их распределения от нормального – это индикаторы предстоящей или недавно закончившейся динамики древостоя под влиянием регулирующих его факторов.

Проведение такого анализа долгое время было сильно ограничено, поскольку работы по наземной съемке плана древостоя на большой пробной площади и его последующей камеральной обработке (измерению проекций крон планиметром или даже их ручной оцифровке) – очень трудоемки, из-за чего невозможно было анализировать много пробных площадей. В настоящее время применение методов крупномасштабной аэросъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в сочетании с автоматизированной технологией обработки снимков позволяет во много раз увеличить как объем исходных данных, так и эффективность их анализа.

Один из примеров такой технологии – автоматическая сегментация ортофотопланов, снятых с БПЛА, путем их обработки алгоритмами нейросетей, в частности – Mask R-CNN (Никитина, 2024). В ходе сбора наземных данных для этого исследования были заложены пробные площади в сосновых насаждениях кустарничково-зеленомошного и мелкотравно-зеленомошного типов в национальных парках (НП) «Куршская коса» и «Смоленское Поозерье». На пробных площадях была получена информация о составе, возрасте, полноте древостоев, истории формирования насаждений. В НП «Куршская коса» древостои были созданы путем посадки и выращивались с соблюдением технологий ухода, тогда как в НП «Смоленское Поозерье» они формировались путем естественного возобновления и без проведения мероприятий ухода на местах вырубок, гарей или заброшенных сельскохозяйственных угодий. Снятые с БПЛА RGB-ортофотопланы древостоев были автоматически сегментированы и векторизованы при помощи алгоритма на основе нейронной сети архитектуры Mask R-CNN, переведены в формат пространственных данных для дальнейшей работы в ГИС. Затем для каждого полигона, соответствующего горизонтальной проекции кроны одного дерева, были рассчитаны периметр и площадь, что позволило определить индекс формы. Далее для всех пробных площадей были рассчитаны средние значения площади и индекса формы проекций крон, а также коэффициенты вариации этих показателей и асимметрии их распределений. Эти метрики сравнили в выборках разных возрастных групп древостоев в двух НП, чтобы выявить связь параметров крон с условиями формирования древостоев. В проанализированном материале наиболее показательны результаты, полученные для индекса формы в средневозрастных (50-70 лет) сосновых древостоях. В 50-летних посадках сосны НП «Куршская коса», за которыми проводился плановый уход, у проекций крон значения индексов формы менее вариабельны и меньше выражена правая асимметрия в распределении этих значений (то есть меньше деревьев с кронами резко неправильной формы, «сжатыми» из-за близкого соседства других деревьев), чем в формировавшихся из самосева и выросших без ухода 60-70-летних древостоях НП «Смоленское Поозерье». Деформация кроны – признак угнетенного

состояния дерева, поэтому повышенное число деревьев с индексом формы 1,5 и более указывает, что в древостое вероятен массовый отпад с накоплением горючего материала и повышением пожароопасности.

Работа выполнена за счет средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

## **РЕАЛИЗАЦИЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ВЕБ-СЕРВИСА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ПОГОДЫ**

*Вихляев Д.Р.*

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Биробиджан, Россия

*E-mail: tigrstrip@yandex.ru*

Ландшафтные пожары являются одним из опасных природных, а в последнее время природно-антропогенных, катастрофических процессов, влияющих на эколого-экономическое состояние значительных территорий. Мониторинг и своевременное тушение пожаров возможно при своевременной оценке и эффективном прогнозировании показателей пожарной опасности по условиям погоды.

Целью работы является реализация картографического веб-сервиса визуализации показателей пожарной опасности по условиям погоды на территории Еврейской автономной области (ЕАО), которая позволит создавать тематические карты распределения природно-антропогенных показателей с заданной заблаговременностью на основе данных метеорологических сервисов погоды.

В работе веб-сервис создается на микросервисной архитектуре, основными инструментами, способствующими организации системы на Nodejs, являются контейнеризация Docker и балансировка нагрузки и очередью межсервисных сообщений Nats.

Основными критериями оценки ежедневной пожарной опасности являются три взаимосвязанных показателя индекса В. Г. Нестерова и его модификаций: лесопожарный показатель засухи; показатель засухи; класс засухи. Для расчета распределения показателей пожарной опасности в данной работе использованы фактические данные пяти метеостанций ЕАО. Прогнозные метеоданные получены с глобальной климатической модели GFS. Класс засухи на текущий день определялся по региональной шкале В. А. Глаголева, разработанной для южных районов Дальнего Востока России.

Построение тематических электронных веб-карт распределения показателей пожарной опасности по условиям погоды и условной вероятности возникновения пожаров растительности осуществлялось на основе значений модифицированного индекса В. Г. Нестерова для территории Дальнего Востока России.

Таким образом, веб-сервис позволяет оперативно пространственно оценить ежедневную пожарную опасность растительности по погодным условиям, выявлять территориальную динамику показателей пожарной опасности в различные периоды пожароопасного сезона, определять районы максимальной и минимальной горимости, разрабатывать оптимальные схемы противопожарного мониторинга на территориях с регулярными метеонаблюдениями.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ И УГЛЕРОДА ДРЕВОСТОЕВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

*Гаврилюк Е.А.*

ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: egor@ifi.rssi.ru*

В докладе представлены результаты сравнения эффективности статистических геопространственных моделей запасов стволовой древесины и углерода древостоев, обученных на основе двух различных типов данных ДЗЗ: 1) радарной и мультиспектральной спутниковой съемке высокого пространственного разрешения (10-20 м/пиксель) с аппаратов Sentinel-1 и 2, и 2) материалах воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с беспилотных летательных аппаратов (с плотностью 40-100 точек/м<sup>2</sup>).

В качестве опорных данных для обучения моделей использовались наземные измерения структурных и биометрических характеристик древостоев (сплошная перечислительная таксация), собранные при закладке 119 постоянных пробных площадей (ППП) размером 0.25 га в 2023 и 2024 годах на территории четырех лесных тестовых полигонов (ТП) интенсивного уровня I типа, входящих в формирующуюся в настоящее время сеть мониторинга климатически активных веществ России (РИТМ углерода, 2025).

Геопространственные переменные для моделирования, основанные на оптических спутниковых данных, представляли собой значения коэффициентов спектральной яркости в каналах разносезонных изображений, а также их попарные нормализованные отношения. Для радарных спутниковых данных рассматривались разносезонные значения коэффициентов обратного рассеяния в двух режимах поляризации, их нормализованное

отношение, а также производные от них основные текстурные признаки Харалика. Переменные, основанные на материалах ВЛС, представляли собой различные статистические метрики (перцентили, разбросы, энтропия и т.п.) распределения значений высот в лазерном облаке точек.

Модели обучались как на полной выборке ППП, так и на подвыборках по отдельным ТП. Состав переменных для каждой выборки/подвыборки предварительно оптимизировался на основе корреляционного анализа и метода FOCI (Azadkia, Chatterjee, 2019). Эффективность обученных моделей оценивалась методами вложенной пространственной кросс-валидации по исходной обучающей выборке. В качестве метрик эффективности использовались стандартные статистические показатели – коэффициент детерминации ( $R^2$ ), корень из средней квадратической ошибки (RMSE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE).

При построении моделей использовалось несколько базовых методов машинного обучения, включая стандартную линейную регрессию, экстремально рандомизованные деревья (Guerts et al., 2006), метод опорных векторов (Cortes, Vapnik, 1995) и градиентный бустинг (Dorogush et al., 2018). По результатам оценок эффективности определялся наилучший вариант модели, который затем использовался для сравнительного анализа.

В результате, для запасов стволовой древесины лучшие модели на основе спутниковых данных по отдельным ТП имели  $R^2$  в диапазоне 0.3-0.74 при RMSE от 47 до 93 м<sup>3</sup>/га и MAPE от 14 до 19%, а по полной выборке –  $R^2 = 0.31$  при RMSE = 121 м<sup>3</sup>/га и MAPE = 25%. При этом, модели на основе данных ВЛС по отдельным ТП имели  $R^2$  в диапазоне 0.57-0.87 при RMSE от 33 до 78 м<sup>3</sup>/га и MAPE от 9 до 12%, а по полной выборке –  $R^2 = 0.58$  при RMSE = 95 м<sup>3</sup>/га и MAPE = 16%. Аналогично, для запасов древесного углерода лучшие модели на основе спутниковых данных по отдельным ТП имели  $R^2$  в диапазоне 0.5-0.64 при RMSE от 15 до 22 т/га и MAPE от 11 до 18%, а по полной выборке –  $R^2 = 0.33$  при RMSE = 32 т/га и MAPE = 22%. При этом, модели на основе данных ВЛС по отдельным ТП имели  $R^2$  в диапазоне 0.74-0.84 при RMSE от 11 до 16 т/га и MAPE от 8 до 11%, а по полной выборке –  $R^2 = 0.69$  при RMSE = 22 т/га и MAPE = 15%.

Таким образом, геопространственные модели, основанные на материалах ВЛС, продемонстрировали стабильно более высокие и стабильные результаты в контексте метрик эффективности и, как следствие, потенциальной предсказательной способности, чем модели, основанные на спутниковых данных. В среднем, использование переменных на основе материалов ВЛС при статистическом моделировании запасов стволовой древесины и углерода древостоев позволило повысить объем вариации, описываемой моделями, в два



раза, и снизить величину ошибок на 30%, по сравнению с аналогичными моделями, основанными на спутниковых переменных.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ**

*Глаголев В.А., Зубарева А.М.*

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия

*E-mail: glagolev-jar@yandex.ru*

На Дальнем Востоке России (ДВР) ежегодно наблюдается повышенная пожарная опасность территории, труднодоступность кварталов лесничеств и ограниченность метеостанций, накладывает условие на своевременное обнаружение и тушение пожаров растительности. Одним из вариантов решения данной проблемы, является определение мест пожароопасной антропогенной деятельности вблизи населенных пунктов, автомобильных и железнодорожных дорог, баз отдыха.

Целью исследования является разработка алгоритма определения антропогенной нагрузки в авторской детерминированно-вероятностной модели пожарной опасности растительности по данным спутникового мониторинга индивидуальных пожаров растительности, возникших вблизи автомобильных дорог и населенных пунктов.

Материалами исследования послужили тематические карты ресурса OpenStreetMap (<http://openstreetmap.com>). Открытые данные электронных карт структурированы тегами OpenStreetMap и разделены по округам Российской Федерации (РФ) в проекции WSG 84.

Индивидуальные пожары растительности зафиксированы по данным спутникового мониторинга MODIS и получены с сайтов агентства NASA (<https://daac.ornl.gov>) и ИКИ РАН (<https://aviales.ru>) с 2013 по 2023 гг. Атрибутивные данные индивидуальных пожаров содержат глобальный идентификатор, координаты центра, область возгорания, дату обнаружения и ликвидации, лесную и не лесную площадь.

Для декомпозиции антропогенных источников, представленных в виде полилинейных источников, построена электронная карта операционно-территориальных единиц (ОТЕ) на территории субъектов ДВР с разрешением  $0,025^\circ$  градусной сети (2,75 км на 1,5 км). При определении пожароопасных участков растительности применяются участки квартальной сети субъектов ДВР из открытых источников федеральных организаций субъектов РФ.

Алгоритм определения антропогенной нагрузки вблизи участков автомобильных дорог состоит из следующих этапов: построение базы данных индивидуальных пожаров растительности по данным спутниковых снимков; расчет расстояния от пожаров растительности до населенных пунктов и автомобильных дорог; определение наиболее пожароопасных кварталов лесничеств вблизи населенных пунктов и автомобильных дорог; расчет частоты появления антропогенных источников на участках автомобильных дорог от пожароопасных кварталов лесничеств на расстоянии до 9 км в весенний и осенний периоды; выделение населенных пунктов и участков дорог для регламентации лесоохранных мероприятий.

Построение буферных зоны вокруг пожаров растительности радиусом 12 км позволило в ОТЕ зафиксировать пересечение с каждым пожаром и провести частотный анализ появления пожаров вблизи конкретного населенного пункта или участка автомобильной дороги.

Для регламентации лесоохранных мероприятий особое внимание уделено предотвращению доступа населения к кварталам участков лесничеств, расположенных на расстоянии  $3 \div 9$  км от населенных пунктов и в пределах  $0 \div 3$  км от ближайшей к кварталу автомобильной дороги, а также в ОТЕ антропогенных источников.

Верификация алгоритма выполнена на территории субъектов юга ДВР: Амурская область, Хабаровский край, Приморский край и Еврейской автономной области. В данных субъектах расположено 1830 населённых пунктов, а общая протяженность автомобильных дорог составляет 29557,9 км.

В работе проведен анализ пространственно-временного распределения 10 568 пожаров растительности; в зависимости от расстояния от очага пожара до ближайшего участка дороги были выделены 3 км (58 %), 6 км (21 %), 9 км (11 %), 12 км (6 %), 50 (4 %) км. В ходе декомпозиции дорог в Еврейской автономной области было получено 356 оперативно-территориальных единиц, при этом территория населенных пунктов не учитывалась. Наибольшая пожароопасность растительность вблизи автомобильных дорог наблюдалась в апреле и октябре. Высокая частота антропогенных источников вблизи зарегистрированных участков дорожной сети составила 115 км и 25 км. В южной части региона участки дорог

подвержены постоянному воздействию, но в течение 20-25 апреля и 19-25 октября между населенными пунктами Столбовое - Унгун и Ленинское - Биджан определенно наблюдаются временные изменения.

Таким образом, предложенный алгоритм определения антропогенной нагрузки вблизи участков растительности актуален для южных субъектов ДВР при моделировании возникновения пожаров растительности по природно-антропогенным условиям и формирования противопожарных рекомендаций на особо удаленных и труднодоступных территориях.

## **КОРРЕЛЯЦИЯ NDVI С ЗАПАСАМИ ФИТОМАССЫ В ЮЖНЫХ СУБАРКТИЧЕСКИХ ТУНДРАХ ЯМАЛА**

*Горбунова А.М., Низаметдинов Н.Ф.*  
ИЭРиЖ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: anastasiya\_psu1991@mail.ru*

Дистанционное зондирование – важный инструмент мониторинга и оценки изменений экосистем. Особенно востребованы методы, основанные на использовании дистанционного зондирования при исследовании труднодоступных территорий, таких как большая часть Арктики. Для идентификации типов растительности и их состояния используют вегетационные индексы. Однако они дают относительные оценки свойств растительного покрова, которые можно более или менее надежно интерпретировать только с привлечением наземных (полевых) данных. Большую часть характеристик состояния и биоразнообразия растительного покрова при современных уровнях технологий ДЗЗ отследить из космоса невозможно. Для количественной оценки изменений фитомассы в арктических экосистемах важны наземные измерения. Целью работы было оценить сопряженность оценок фитомассы, полученных при наземных обследованиях растительных сообществ на Ямале, и значений индекса NDVI, чтобы понять, в какой степени можно использовать результаты ДЗЗ для оценки состояния тундр.

Запасы надземной фитомассы южных субарктических тундр оценили методом укосов в 2017–2019 гг. в нижнем течении р. Еркатыаха. Всего выполнили 99 стандартных геоботанических описаний тундровых сообществ (10\*10 м); из них на 80 пробных площадях собрали 240 проб надземной фитомассы (по три укоса 0.25\*0.25 м с каждой площади). Значения индекса NDVI получены на основании из данных 5 и 4 каналов спутниковых снимков Landsat 8 с использованием среды <https://earthengine.google.com>. Для каждой

пробной площади рассчитывали медианные значения NDVI за период, охватывающий 15 дней до закладки пробной площади и 15 дней после.

Данные по 99 пробным площадям были проанализированы для оценки связи между значениями индекса NDVI и значениями общего проективного покрытия растений. В объединенном за 2017–2019 гг. массиве оценок выявлена положительная корреляция между общим проективным покрытием растений и значениями NDVI: коэффициент Спирмена  $r_s = 0.43$  ( $P < 0.0001$ ). При этом динамика среднегодовых значений проективного покрытия (2017 г. –  $74 \pm 7\%$ ; 2018 г. –  $85 \pm 4\%$ ; 2019 г. –  $83 \pm 3\%$ ) соответствовала среднегодовым значениям NDVI (2017 г. –  $0.22 \pm 0.01$ ; 2018 г. –  $0.31 \pm 0.01$ ; 2019 г. –  $0.28 \pm 0.01$ ). Т.е. в годы с хорошим развитием растительности наблюдался высокий NDVI и наоборот.

Данные по 80 пробным площадям были проанализированы для обнаружения связи между индексом NDVI и запасами надземной фитомассы. В объединенном за 2017–2019 гг. массиве оценок корреляция между запасами фитомассы и значениями была положительной:  $r_s = 0.56$  ( $P < 0.0001$ ). В разные годы запасы фитомассы (2017 г. –  $11.0 \pm 2.1$  ц/га; 2018 г. –  $48.6 \pm 4.4$  ц/га; 2019 г. –  $23.9 \pm 1.4$  ц/га) и NDVI также изменялись согласовано (2017 г. –  $0.23 \pm 0.01$ ; 2018 г. –  $0.35 \pm 0.004$ ; 2019 г. –  $0.28 \pm 0.01$ ): в годы, когда значения фитомассы были высокими, NDVI также были высокими.

Результаты позволяют считать, что NDVI является определенным качественным индикатором таких характеристик тундровых сообществ как общее проективное покрытие растений и запасы надземной фитомассы. Поскольку полевые данные представляют объединенный массив за три года, различающихся, в том числе, по степени деградации растительных сообществ, сопряженность оценок фитомассы и NDVI следует обсуждать с некоторой осторожностью. Для понимания степени применимости методов ДЗЗ для оценки состояния тундровых сообществ на Ямале необходим дальнейший анализ сопряженности между разными свойствами сообществ и разными вегетационными индексами.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН № 122021000092-9.

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ПО МАТЕРИАЛАМ ДЗЗ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА**

Гофман М.Д.

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Россия

E-mail: mark\_gof@mail.ru

Цель землеустройства в лесном хозяйстве — рациональное использование и охрана земельных ресурсов. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) играют ключевую роль, предоставляя актуальную информацию о состоянии поверхности. Современные методы классификации на основе ДЗЗ позволяют автоматизировать анализ, повысить точность картографирования и прогнозировать изменения.

Основные методы классификации земель

### 1. Спектральная классификация

- Этапы: сбор спутниковых данных → предобработка → классификация по спектральным характеристикам → интерпретация.

- Применение: картографирование угодий, мониторинг вырубки лесов, оценка экологического состояния.

- Преимущества: высокая точность, экономичность.

### 2. Объектно-ориентированная классификация

- Особенность: анализ сегментов изображения, а не отдельных пикселей.

- Этапы: сегментация → вычисление признаков (форма, текстура) → классификация.

- Применение: картографирование сложных объектов (здания, дороги), экологическое планирование.

- Преимущества: учёт контекста, работа с высокодетальными снимками.

### 3. Классификация на основе временных рядов

- Суть: анализ динамики изменений (вегетационные индексы, влажность почвы).

- Этапы: сбор данных → выявление трендов → прогнозирование.

- Применение: мониторинг деградации почв, управление водными ресурсами, агроклиматическое моделирование.

- Преимущества: долгосрочный анализ, адаптивность.

### 4. Методы машинного (ML) и глубокого обучения (DL)

- ML: классификация почв, прогнозирование урожайности, кластеризация территорий.

- DL: распознавание объектов на снимках, моделирование временных рядов.

- Примеры: автоматический мониторинг лесов, создание цифровых двойников.

- Преимущества: скорость, обработка больших данных, минимизация ошибок.

#### 5. Гиперспектральная классификация

- Особенность: использование сотен спектральных каналов.
- Применение: идентификация типов почв, мониторинг растительности, контроль загрязнений.
- Преимущества: высокая детализация, многофункциональность.

#### 6. LiDAR

- Технология: лазерное сканирование для создания 3D-моделей.
- Применение: топографическое картографирование, инвентаризация лесов, оценка инфраструктуры.
- Преимущества: независимость от погоды, высокая точность.
- Недостатки: высокая стоимость, сложность обработки.

#### Интегрированные методы

- Компоненты: ДЗЗ + ГИС + ML + аналитические платформы.
- Применение: комплексное управление ресурсами, экологическая оценка, городское планирование.

- Преимущества: повышение точности, гибкость, снижение затрат.

#### Преимущества и ограничения методов ДЗЗ

- Преимущества:
  - Оперативность и широкий охват территорий.
  - Автоматизация процессов, снижение влияния человеческого фактора.
  - Экономическая эффективность (сокращение полевых работ).
- Ограничения:
  - Зависимость от качества данных (погода, сезонность).
  - Необходимость в квалифицированных специалистах.

Современные методы классификации земель на основе ДЗЗ — ключевой инструмент для устойчивого управления лесными ресурсами. Они обеспечивают точность, оперативность и комплексный подход к анализу. Внедрение ML, DL и интеграция технологий открывают новые возможности для прогнозирования и минимизации экологических рисков. Однако успешное применение требует учёта технических ограничений и инвестиций в обучение специалистов.

## **ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ О. КУНАШИР (КУРИЛЬСКИЕ О-ВА)**

*Грищенко М.Ю.<sup>1,2</sup>, Фурунжиева В.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный природный заповедник «Курильский», Южно-Курильск, Россия

*E-mail: m.gri@geogr.msu.ru*

Дешифрирование растительного покрова по космическим снимкам, особенно в тепловом диапазоне, представляет собой актуальную задачу, учитывая, что растительный покров является одним из наиболее физиономичных компонентов природно-территориальных комплексов. Тепловые космические снимки показали свою эффективность в изучении растительности, помогая выявить различия в сезонной изменчивости теплового излучения и дифференциацию тепловых характеристик в разных природно-климатических условиях. Цель исследования – оценка применимости различных методик дешифрирования растительного покрова с использованием тепловых космических снимков. Объектами исследования являются два залесённых ключевых участка, расположенных на севере и юге острова Кунашир, значительно различающихся по своим природным условиям, что позволяет выявлять специфические тепловые характеристики различных геосистем.

Для анализа отобранные космические снимки со спутников Landsat-8/9 за 2013–2024 гг., включающие все доступные каналы, на основе которых созданы многовременные и многозональные снимки. Методы исследования включают расчет связи температуры поверхности (LST) и вегетационного индекса (NDVI), визуальное дешифрирование полученных изображений, неконтролируемую классификацию (алгоритм ISODATA) по созданным многовременным снимкам для выделения растительных сообществ, контролируемую классификацию многозональных снимков с использованием и без использования теплового канала, с последующим сопоставлением результатов, а также сравнение с крупномасштабными картами растительности, составленными по полевым данным.

Анализ полученных результатов выявил либо отсутствие, либо незначительную корреляцию между LST и NDVI, что, вероятно, связано с доминированием локальных факторов (грунты, рельеф, близость водоемов и др.) над глобальными, хотя исследования утверждают существование обратной корреляции данных показателей. Результаты кластеризации многовременных снимков позволили с высокой достоверностью выделить доминирующие растительные сообщества на южном участке Кунашира, где использование

этого метода позволяет дешифровать каменноберезовые бамбуковые и каменноберезово-пихтовые леса, которые преобладают в структуре растительного покрова данного участка. В то же время, на северном участке преобладают еловые бамбуковые леса, в том числе менцизиевые, которые не дифференцируются по кластерам и, следовательно, установить соответствие между кластерами и растительными сообществами нельзя. Использование теплового канала при контролируемой классификации многозональных снимков позволило выявить следующее. На низкогорном южном участке значительная амплитуда высот и связанные с этим различия в экспозиции склонов приводит к тому, что тепловой канал может ухудшать результат классификации. В частности, склоны южной экспозиции, сильнее прогреваемые солнцем, могут ошибочно классифицироваться как участки открытого грунта. На равнинном северном участке, где амплитуда высот невелика, тепловой канал, напротив, оказал положительное влияние на результаты классификации: использование теплового канала позволило более достоверно выделить сообщества, приуроченные к долинам рек и междуречьям, что не удалось сделать при классификации без использования теплового канала.

На основании наших исследований мы можем утверждать, что для лесов юга Дальнего Востока при дешифрировании низкогорных ландшафтов демонстрирует большую эффективность кластеризация теплового многовременного снимка, а для равнинных – контролируемая классификация многозонального снимка с использованием теплового канала. Связь LST и NDVI в рассматриваемом масштабе не выражена.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы 121051400061-9.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЗАРАСТАНИЯ ОХРАННЫХ ЗОН ТРУБОПРОВОДОВ**

*Демчук Е.В., Кулик Е.Н.*  
СГУГиТ, Новосибирск, Россия

*E-mail: Demchuk-EV2019@sgugit.ru*

Темпы развития современного общества приводят к все большему потреблению энергоресурсов. В частности, такие энергоресурсы как нефть и газ играют важную роль в развитии государства и его суверенности. Вместе с пользой, работа нефтегазового сектора также несет в себе постоянные экономические и экологические риски, возникающие на всех этапах функционирования комплекса, от разведки месторождения до транспортировки получаемых продуктов. В процессе создания транспортировочных трубопроводов в местах



их прокладки создаются охранные зоны, зачастую проходящие по территории лесных насаждений, и, в нередких случаях, даже по территории особо охраняемых природных территорий (ООПТ), где требуется более строгое соблюдение всех экологических норм.

Целью данной работы является автоматизация сбора аэрокосмических снимков, применяющихся для мониторинга соблюдения норм залесенности в пределах охранных зон вдоль трубопроводов. Практический эксперимент мониторинга проводился для магистрального нефтепровода Д-320, находящегося на территориях Северного, Куйбышевского и Барабинского районов Новосибирской области.

Магистральный нефтепровод Д-320, принадлежащий изначально АО «ННГ» 1994-2017 г., а впоследствии переданный в управление ООО «ПИТ «СИБИНТЭК»» 2017-н.в., являющихся дочерними компаниями АО НК «Нефтиса», транспортирует нефть, получаемую с трех месторождений Межовского гранитного массива: Малоичское, Верх-Тарское, Восточно-Тарское. Введенный в эксплуатацию в 2000 г. трубопровод «Верх-Тарское месторождение – Барабинск», протяженностью 182 км и диаметром трубы 325 мм, по результатам геопространственного анализа, имеет выявленные пересечения с двумя государственными заказниками: «Мангазерский» и «Казатовский», образованными решением исполнительного комитета Новосибирской области в 1973 году.

Для выполнения поставленной цели сформирован алгоритм поиска буферных зон регламентированного размера вдоль линейных объектов трубопроводов; зоны будут задействованы в автоматизированном поиске и сборе изображений, находящихся в открытом доступе, пригодных для расчета вегетационного индекса (NDVI), который позволит количественно оценить фотосинтетически активную биомассу, свидетельствующую о наличии экспансии лесных массивов в пределах охранных зон. Алгоритм реализован в виде программного кода на языке программирования JavaScript для облачной геоинформационной системы Google Earth Engine (GEE). Также алгоритм находит пересечения линейных объектов слоя трубопровода с площадными слоями ООПТ. По линии пересечения создается зона интереса шириной 50 м, согласно СНиП 2.05.06-85. На заданный оператором временной интервал, формируются запросы к архиву космоснимков системы Sentinel-2, для выбора изображений, попадающих в созданную область интереса, используемых для дальнейшего автоматического расчета индексных изображений NDVI. Динамика значений индексных изображений NDVI позволяет оперативно выявить зарастание охранной зоны лесом.

Был проведен мониторинг интересующей территории за вегетационный период 2017 и 2024 годов, свидетельствующий о динамике зарастания на всей территории исследования. Информация подобного характера необходима как подрядным организациям, следящим за

соблюдением регламента содержания инженерных сооружений, так и для ведомственных государственных организаций, ответственных за соблюдение правового режима, установленного на ООПТ. Автоматизация сбора данных позволит оперативно следить за ситуацией на всей территории и своевременно реагировать на возникающие обстоятельства.

## **РАЗРАБОТКА ГИС-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА ПРИ АНАЛИЗЕ ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

*Добровольский Д.А.<sup>1</sup>, Подольская Е.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>2</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: dmitrdobr@mail.ru*

Современная морфометрия используется для изучения закономерностей развития рельефа как фактора, определяющего положение дорог разных классов. Морфометрические характеристики рельефа (крутизна склона, предельный угол наклона трассы, экспозиция) являются важными показателями при проектировании, строительстве и анализе существующего расположения дорог. Они особенно важны для дорог без капитального инженерного основания, используемых в регионах России.

Выполнены разработка и тестирование модуля (плагины) для ПО с открытым кодом QGIS, основной задачей которого является получение морфометрических характеристик рельефа из цифровой модели рельефа (ЦМР) по осевой линии дороги. Использовались Лесной план региона, наборы открытых данных по дорогам Open Street Map (OSM), данные космической съемки в видимом диапазоне, а также цифровые модели рельефа SRTM и Arctic DEM на территорию Красноярского края.

Разработанный плагин QGIS позволил автоматизировать сбор морфометрической информации по линии дорог с определенным шагом измерений, который указывается перед началом выполнения основного алгоритма. Результаты тестирования представлены для набора векторных данных по дорожной сети и двух вариантов ЦМР. Разработанная методика позволит повысить скорость обработки данных для анализа дорожной инфраструктуры в лесном хозяйстве и принятия управленческих решений по транспортному развитию региона. Инструмент может быть включен в структуру проекта по геоинформационному обеспечению лесного транспортного моделирования регионального уровня.

Исследование является частью дипломного проектирования в бакалавриате кафедры геоинформационных систем Института информатики и радиоэлектроники РТУ МИРЭА, выполняемого в 2025 году. Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН

по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

## **ТЕМНОХВОЙНЫЕ ЛЕСА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ: НОВЫЕ КАРТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРЬ В XXI ВЕКЕ**

Дудов С.В.<sup>1,2</sup>, Дзизюрова В.Д.<sup>1,3</sup>, Рябенко О.И.<sup>1</sup>, Грищенко М.Ю.<sup>1</sup>, Корзников К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> КамГУ имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>3</sup> Ботанический сад-институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

E-mail: [serg.dudov@gmail.com](mailto:serg.dudov@gmail.com)

Бореальные темнохвойные леса северо-восточной Азии с доминированием ели аянской (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière) распространены в горных районах от центральной Японии и Корейского полуострова до Камчатки (40–55° с. ш.), включая как чистые ельники, так и смешанные насаждения с пихтой (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. на материке, *A. sachalinensis* (F.Schmidt) Mast. в островной части ареала). Эти леса имеют важное ресурсное и природоохранное значения и являются биологическим индикатором климатических изменений. В последние годы в них наблюдаются катастрофические ветровалы и вспышки численности насекомых-вредителей. Для оценки изменений в темнохвойных лесах с елью аянской, произошедших за двадцатилетний период, мы построили современную (2021 г.) и историческую (2001 г.) карты этих лесов на основе спутниковых снимков Landsat (разрешение 30 м) на весь ареал в России, в северо-восточном Китае, в Корее и на острове Хоккайдо.

В качестве исходных мы использовали продукт Landsat GLAD ARD, доступный на портале университета Мэриленда (GLAD, Global Land Analysis and Discovery). На основе исходных 16-ти дневных композитов были рассчитаны фенологические метрики – набор статистических показателей, полученных из временных рядов нормализованной отражательной способности поверхности. Классификацию с обучением проводили методом деревьев решений. Для это была создана обучающая выборка на основе 475 геоботанических описаний, включая оригинальные описания авторов, архивные и литературные данные. Классификацию для каждого периода времени (2001 и 2021 гг.) проводили в два последовательных этапа: выделение лесного покрова среди нелесных территорий и идентификация темнохвойных лесов с елью аянской, в несколько итераций, с экспертной верификацией результатов.

Для оценки точности картографирования мы рассчитали общую точность (ОА), точность пользователя (UA) и точность производителя (РА), проанализировав 1200 контрольных точек (по 300 на класс для каждого периода): 2001 г., 2021 г. и оба года вместе. Для выявления причин потерь мы проанализировали 4800 случайных точек в местах потерь лесов, предсказанных на 2001 год. Для интерпретации неопределенности в оценках за два периода (2001 и 2021) была создана случайная стратифицированная выборка точек на непересекающиеся значения растров за 2001 и 2021 год (по 1000 точек на каждый тип). Случайные точки интерпретировали с использованием всех доступных данных ДЗЗ.

Результаты картографирования показали высокую точность за оба периода (2001 и 2021 соответственно): ОА – 97 % и 97%, UA – 93 % и 93 %, РА – 69 % и 59 %. С 2001 года в 68% ячеек сетки 10\*10 км отмечено снижение площади исследуемых лесов. Наибольшие потери отмечены в Хабаровском и Приморском краях – там выявлено соответственно 19 и 3 крупных (до 800 км<sup>2</sup>) участка с сокращением темнохвойных лесов на 30–60%. Обнаружены четыре главных источника нарушений лесов из ели аянской, по убыванию значимости: пожары, вырубки, ветровалы, усыхание. Причины потерь географически детерминированы в ареале дальневосточных темнохвойных лесов. Роль отдельных факторов в общей доле потерь связана как с широтным, так и долготным градиентом, так и градиентом континентальности. С учетом неопределенностей картографирования, в XXI веке сократилась на 23 %, а площадь темнохвойных лесов на 2021 год составляет 54,7 тыс. км<sup>2</sup>.

Исследования поддержаны программой развития МГУ, проект № 23-Ш07-66.

#### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО ЯРУСА ДРЕВОСТОЯ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «КИВАЧ»**

*Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Тихонов Д.Н., Никитина А.Д., Белова Е.И.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: ershov@ifi.rssi.ru*

В последние годы стремительно растет количество публикаций, связанных с оценками и картографированием запасов наземной биомассы лесов с помощью данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с беспилотных авиационных систем. Задача опубликованных исследований сводится к изучению возможностей данных АФС и ВЛС для определения базовых таксационных характеристик древостоев (высота, диаметр стволов, площадь кроны древесной породы), которые могут использоваться для

моделирования в пространстве лесного участка запасов надземной биомассы на подеревном уровне и на уровне лесного насаждения (Sheridan et al., 2015; Novotný et al, 2020; Saarela et al, 2020; Diószegi et al, 2024; Karthigesu et al, 2024).

Целью настоящего исследований было изучить возможности данных аэрофотосъемки в видимом и ближнем инфракрасных диапазонах и воздушного лазерного сканирования для оценки базовых таксационных характеристик на подеревном уровне, чтобы использовать их для последующей валидации данных спутниковых продуктов различного пространственного разрешения.

Для проведения текущих исследований был выбран тестовый полигон площадью 400 га, расположенный в заповеднике Кивач республики Карелии. На полигоне (по данным наземной таксации) преобладают хвойные насаждения (71% сосняки и 16% ельники), лиственные (березняки и осинники) занимают 9 и 4% площади, соответственно. Насаждения характеризуются довольно высоким возрастом и продуктивностью.

В 2023 году были проведены аэросъемочные работы с использованием беспилотных летательных аппаратов Геоскан-201 с RGB Sony 6000 и мультиспектральной RedEdge-MX камерами и Геоскан-401 с лазерным сканером MC1. Оптическая съемка проводилась весенне-летний и осенний периоды вегетации, а воздушное лазерное сканирование - в весенне-летний период. С помощью специализированного программного обеспечения Agisoft Metashape Professional, AGM PosworksWeb, AGM ScanWorks Base и Lidar360 проводилась обработка отдельных снимков и облаков точек лазерного сканирования для получения оптических ортофотопланов, цифровой модели местности и рельефа с пространственным разрешением 3-15 см. Плотность облака точек данных ВЛС составляет 30-60 точек на м<sup>2</sup>.

Методика картографирования лесотаксационных характеристик верхнего древесного полога включает несколько этапов: (1) сегментацию крон деревьев с использованием алгоритма нейронной сети MASK R-CNN (Никитина, 2024); (2) классификацию методом Random Forest (Breiman, 2001) крон деревьев по видам древесных пород на основе спектральных и текстурных метрик, извлеченных из RGB и мультиспектральных ортофотопланов; (3) определение высот древостоев на основе анализа классифицированных облаков точек лазерных отражений ВЛС; (4) моделирование диаметра стволов деревьев на основе линейной связи высоты и площади кроны дерева; (5) расчет объема стволов древесных пород на основе нормативных справочников таксации лесов европейской части России и (6) оценка точности определения перечисленных выше лесотаксационных характеристик по данным наземной таксации методом сплошного перече́та деревьев на 30 пробных площадях размером 50x50 м.

Сравнение результатов сегментации крон деревьев, классификации их по видам пород, определения диаметров стволов, высоты и объемов по деревьям сети наземных площадок показало следующее. Точность сегментации крон деревьев с помощью обученной нейронной сети составила  $F1=0.93$ . При детальном визуальном анализе были выявлены ошибки выделения крон деревьев в межкроновых пространствах, что потребовало дополнительного применения слоя облаков точек ВЛС для фильтрации ложных срабатываний алгоритма. Интегральная точность модели классификации крон деревьев полигона по видам деревьев составила  $F1=0.85$  (сосна – 0.95; ель и береза – 0.85 и осина – 0.75). Средняя абсолютная ошибка (MAE) определения средней высоты древостоя по тестовым площадкам (в анализе использовались 2235 модельных деревьев, точно идентифицированных во время полевых работ по ортофотопланам) оценивается порядка 1.32 м для 95-перцентиля, а средних диаметров стволов через регрессионную связь высоты и площади кроны деревьев - 2.03 см. Средний относительный объем стволов деревьев на пробной площадке оценивается на уровне  $MAE=10.6 \text{ м}^3/\text{га}$ . Распределение ошибок оценки относительного запаса деревьев на пробной площадке (при учете всех деревьев на площадке) имеет разнонаправленный характер, т.е. в положительную и отрицательную сторону, что связано, в первую очередь, с разным количеством деревьев, отнесенных к первому ярусу методом наземном таксации и при сегментации ортофотопланов. Ошибка определения диаметров стволов также зависит от точности модели связи диаметра ствола с площадью кроны дерева и его высоты, измеренных дистанционными и наземными методами.

Для повышения точности оценок таксационных характеристик лесов на подеревном уровне и на уровне выдела необходимо: (1) провести дополнительное обучение нейронной сети MASK R-CNN для снижения ошибок определения границ крон деревьев и их количества в первом ярусе; (2) провести обучение нейронной сети для классификации видов древесных пород; (3) учитывать при определении площади кроны цифровую модель местности и классифицированное облако точек воздушного лазера; (4) исследовать возможность инструментального определения диаметров стволов дерева и его высоты по данным воздушного лазерного сканирования с разной плотностью точек отражений на квадратный метр (до  $700 \text{ т/м}^2$ ) с оценкой точности метода и (5) провести апробацию методики в разных лесорастительных условиях с разным породным составом и возрастной структурой древостоев.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» (Соглашение

№169-15-2023-004 от 1 марта 2023 г. между ЦЭПЛ РАН и Росгидромет) и в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН №124013000750-1.

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРЯМЫХ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДА ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ РОССИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ПРОДУКТАМ**

*Ершов Д.В., Соколова Е.Н., Ковганко К.А.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: ershov@ifi.rssi.ru*

В последнее десятилетие миру представлено несколько глобальных тематических продуктов с оценками прямых эмиссий углекислого газа (CO<sub>2</sub>) от природных пожаров на основе анализа и обработки спутниковых данных (Kaiser et al., 2012; Ichoku, Ellison, 2014; Darmenov, da Silva, 2015; van der Werf et al., 2017; Liu Y.; Shi Y, 2023; Wiedinmyer et al., 2023, Ершов и др., 2024). Каждый из представленных выше продуктов имеет свою точность и уровень неопределенности в оценках пожарных эмиссий для разных биомов и регионов планеты. Это зависит от набора входных данных допожарных объемов запасов углерода в растительности, а также методов определения интенсивности горения и доли сгоревшей фитомассы.

В докладе будет представлено развитие ГИС-технологии пространственной оценки прямых эмиссий углерода от лесных пожаров. Технология базируется на комплексном анализе данных о пройденных огнем площадях, степени повреждения лесной растительности и допожарных запасах лесных горючих материалов (ЛГМ) исследуемой территории (Ершов, Соколова, 2020, 2022, Ершов и др., 2024).

Оценка пожарных эмиссий углерода включает следующие этапы: (1) формирование пространственно-распределенной базы данных запасов ЛГМ до пожара; (2) определение зон возможного распространения верхового пожара; (3) восстановление характера и интенсивности пожара и (4) оценка расходов ЛГМ и количества углерода, выделяющегося в процессе горения.

В рамках работ первого этапа Важнейшего инновационного проекта (2022 - 2024 гг.) по разработке национальной системы климатического мониторинга (Ритм углерода..., 2024) был создан ряд новых спутниковых тематических продуктов с характеристиками лесов и других наземных экосистем среднего пространственного разрешения (230 м), которые позволили значительно перестроить технологию ежегодного пространственного

моделирования запасов ЛГМ и расширить состав слоев основных проводников горения вертикального профиля древостоя (Ершов и др., 2023).

Для картографирования допожарных запасов ЛГМ используются многомерные регрессионные модели (Щепащенко и др., 2013; Schepaschenko et al., 2018; Швиденко и др., 2008; Shvidenko, 2023) с такими характеристиками лесов на пиксельном уровне данных MODIS (250м) как преобладающая порода, возраст, полнота, запас древостоя, класс бонитета. С помощью моделей определяется запас лесных проводников горения до пожара (ветви, листва, подрост, подлесок, напочвенный покров, лесная подстилка, крупные древесные остатки) для древесных пород разного возраста, с учетом относительной полноты древостоя и бонитета (Ершов и др., 2023). Для валидации карт допожарных лесных горючих материалов также разрабатываются методы регионального картографирования основных характеристик таксационных характеристик лесов по серии спутниковых изображений высокого пространственного разрешения программы Landsat. На основе полученных продуктов будут оцениваться уровень неопределенности карт ЛГМ среднего пространственного разрешения территории России.

Карта зон вероятного распространения верхового пожара строится на основе совмещения и анализа спутниковых карт лесных пород, сомкнутости и классов возраста (Ершов и др., 2009). Восстановление характера и интенсивности пожара осуществляется совмещением двух цифровых карт: степень повреждения лесов (Стыценко и др., 2013) и зоны возможного распространения верхового типа горения. Масса сгорающих органических материалов на каждом пройденном огнем участке определяется через запасы ЛГМ до пожара и долю расходуемых горючих материалов, зависящих от типа и интенсивности пожара. Общая масса углерода пожарных эмиссий находится как произведение массы сгоревших органических материалов и доли углерода в их составе.

В докладе приводится ГИС-технология всех вышеперечисленных этапов и результаты оценки прямых эмиссий углерода от пожаров за 2011-2024 годы по всей территории России.

Работа выполнена за счет средств Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» (Соглашение №169-15-2023-004 от 1 марта 2023 г. между ЦЭПЛ РАН и Росгидромет) и в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН №124013000750-1.



## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ И МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ: ЦЕЛИ, ТРУДНОСТИ, РЕЗУЛЬТАТЫ**

*Завьялов З.А., Манапова Д.И.*

ООО «ГеосАэро», Пенза, Россия

*E-mail: zavyalov@geosaero.ru*

Выполнение аэрофотосъемочных работ и воздушного лазерного сканирования позволяет в короткие сроки получать высокоточные цифровые модели местности и рельефа, ортофотопланы в видимом и мультиспектральном диапазонах.

В рамках доклада рассмотрены требования к условиям проведения аэрофотосъемки воздушного лазерного сканирования для получения наиболее качественных и достоверных результатов. Определены сложности получения мультиспектральных снимков в облачную погоду и представлены решения проблемы; ошибки привязки к местности цифровых моделей рельефа воздушного лазерного сканирования в зависимости от времен года; отклонения вершин деревьев на данных беспилотных авиационных систем, трудности, к которым они приводят и пути решения.

Чтобы оценить достоверность показателей, рассчитанных по данным, полученным с беспилотных авиационных систем, были проведены сравнения с данными, полученными наземными способами таксации.

## **СВЯЗЬ ДИСТАНЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ И НАСАЖДЕНИЯ С РАДИАЛЬНЫМ ПРИРОСТОМ ДЕРЕВЬЕВ: РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ**

*Иванова Ю.Д.<sup>1</sup>, Ковалев А.В.<sup>2</sup>, Суховольский В.Г.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: lulja@yandex.ru*

Радиальный прирост — один из важнейших показателей состояния деревьев в насаждении. Величина радиального прироста связана с состоянием природной среды, и в частности, с погодой. Оценка входных характеристик погоды по выходным данным радиального прироста деревьев — одна из основных задач дендрохронологии и такую модель можно рассматривать как обратную задачу теории управления. Однако при использовании дистанционных методов возникает возможность подойти к решению прямой задачи, когда по известным входным дистанционным характеристикам оцениваются выходные показатели

радиального прироста и, в связи с этим рассматриваются регуляторные свойства у деревьев в насаждениях.

В настоящей работе рассмотрена возможность решения прямой задачи оценки радиального прироста по данным дистанционного зондирования насаждений. Блок-схема модели прямой задачи включает характеристики насаждения в целом и природной среды как входные переменные, и радиальный прирост как выходную переменную. При этом необходимо учитывать возможные обратные связи в динамике радиального прироста и воздействие аддитивного внешнего шума. В этом случае можно записать линеаризованное уравнение управления процессами радиального роста с обратной связью и внешним шумом следующим образом:

$$D = \frac{P(s)}{E + P(s)K(s)} X + \varepsilon(t) \quad (1)$$

где  $X$  – вектор входных переменных,  $P(s)$  – передаточная матрица объекта управления (насаждения),  $K(s)$  – передаточная матрица обратной связи,  $\varepsilon(t)$  – внешний шум,  $E$  – единичная матрица,  $D$  – выходные характеристики радиального прироста.

Для анализа предпочтительно, чтобы модель (1) была стационарной. Но так как радиальный прирост зависит от возраста дерева, то при построении модели для решения прямой задачи в качестве выходных переменных рассматривались не нестационарные ряды радиального прироста, а стационарные ряды первых разностей радиального прироста.

В качестве входных переменных модели (1) рассматривались характеристики фотосинтетического индекса NDVI и показатели температуры поверхности почвы LST. Данные дистанционного зондирования позволяют получить информацию о временных рядах NDVI и LST для отдельного пространственного пиксела в течение сезона. Однако рассматривать все значения этих временных рядов как входных переменных модели нецелесообразно, так как эти значения коррелируют, и необходимо «свернуть» эти временные ряды до некоторого числа, что существенно упростило бы решение прямой задачи.

В настоящей работе для свертки входных данных предложено два подхода. В первом из подходов для свертки набора временных рядов NDVI и LST за определенное число  $n$  сезонов предложено использовать метод главных компонент во времени и рассмотреть в качестве входных переменных первые главные компоненты матриц NDVI и LST. Во втором подходе предлагается рассмотреть в качестве входных переменных характеристики спектра

$H(f)$  функции отклика  $h(\tau)$  изменения NDVI в ответ на изменение LST. Такая функция отклика описывается с помощью следующего интегрального уравнения:

$$\Delta NDVI(t) = \int_0^t h(\tau) \Delta LST(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

где  $\Delta NDVI(t)$  и  $\Delta LST(t)$  – первые разности рядов NDVI и LST.

Для оценки обратной связи в системе рассматриваются авторегрессионные уравнения  $AR(k)$  для рядов первых разностей радиального прироста, порядок которых определяет реакцию первой разности радиального прироста деревьев в сезон  $t$  на значения первых разностей их радиальных приростов в  $k$  предыдущие сезоны. Внешний шум можно охарактеризовать как некоторую функцию от уровня загрязнения территории.

Верификация модели проводилась с использованием данных о радиальном приросте более 120 деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в насаждениях на территории г. Красноярск, растущих в различных экологических условиях (вдали и вблизи от источников поллютантов). При анализе использовались данные дистанционного зондирования, полученные со спутника MODIS в период с 2003 по 2014 гг.

Представлено найденное решение прямой задачи, позволяющее по динамическим данным дистанционного зондирования оценить динамику первой разности радиального прироста деревьев в различных экологических условиях. Полученные результаты позволяют подойти к оценке динамики радиального прироста деревьев в зависимости от экологического состояния территории и характера регуляторных процессов у деревьев в насаждениях.

## **АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА НА СПЛОШНЫХ ВЫРУБКАХ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Ильинцев А.С.<sup>1</sup>, Черкасов Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СевНИИЛХ, Архангельск, Россия

<sup>2</sup> САФУ имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

Колееобразование является неизбежной частью лесозаготовительных работ. Колейность может увеличить уплотнение почвы и эрозию, изменить гидрологические условия и привести к заболачиванию. Все это оказывает неблагоприятное воздействие на последующее лесовозобновление и рост деревьев после проведения рубок.

Возрастает актуальность изучения устойчивости лесных почв к действию лесных и лесозаготовительных машин, так как лесозаготовительные операции проводятся

круглогодично, и антропогенная нагрузка на лесные экосистемы увеличивается, особенно в период с повышенным выпадением осадков. Минимизация колеиности и снижение воздействия лесозаготовительной деятельности на лесную среду имеет важное значение при совершенствовании технологии заготовки древесины.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) все чаще применяется в качестве полезного инструмента в целях лесного хозяйства. Кроме того, повышается уровень точности данных измерений, проводимых с помощью БПЛА. Фотограмметрические методы, как дистанционные, так и проксимальные, а также LiDAR, ультразвук и камеры применяются для измерения колеиности на вырубках в последние годы. Хорошие результаты были продемонстрированы с использованием фотограмметрии на основе БПЛА в полевых исследованиях. Для практических целей в лесном хозяйстве надежные и недорогие методы низкой сложности, которые дают достаточно точные результаты, являются востребованными.

Цель исследования – определение масштабов повреждения почвенного покрова на сплошных вырубках в наиболее распространенных условиях Архангельской области.

Для реализации данной цели подобрали 10 свежих сплошных вырубок в Сурском лесничестве Архангельской области. Площадь сплошных вырубок в среднем составила 26,3 га (от 13,3 до 38,2 га). Исходные насаждения были представлены спелыми и перестойными ельниками черничными (влажными), долгомошными и травяно-болотными с запасом 60-170 м<sup>3</sup>/га. Преобладали низко- и среднеполнотные насаждения V-Va класса бонитета. Насаждения были вырублены в летний лесозаготовительный сезон 2024 года. Заготовка древесины проводилась комплексом лесозаготовительной техники по узкопассечной технологии лесосечных работ. Общая площадь технологических коридоров (волоков) не превышала 20 %.

В полевых условиях провели съемку сплошных вырубок дроном DJI 3 pro с высоты 100 м со скоростью движения дрона 2,5 м/с и 80%-м наложением снимков. Количество снимков на одну рубку в среднем составило 467 шт. (от 243 до 685 шт.). Пространственное разрешение до 2,5 см на пиксель. В камеральных условиях провели обработку снимков в программе Agisoft Metashape Professional. В программе QGIS создали полилинейные векторные слои и провели обрисовку колеи по их центру. Для получения площади и глубины колеи на линиях добавили дополнительные точки вершин. Для определения глубины колеи построили цифровую модель рельефа (ЦМР). Вычислив разницу между ЦМР и ЦММ для каждой точки, получили глубину колеи с шагом измерений 1 м. Глубина колеи была классифицирована по трём классам: мелкие – до 15 см, средние – от 15 до 30 см, глубокие – больше 30 см.

Результаты исследования показывают, что площадь колеи изменяется в узком диапазоне от 10,2 до 12,6 % площади вырубki (в среднем 11,4 %). Площадь мелких колеи составляет в пределах от 66 до 95 % (в среднем 81,4 %), средних – от 8 до 24 % (в среднем 15,4 %), глубоких – от 0,5 до 10 % (в среднем 3,2 %). Пространственный анализ показывает, что доля глубоких колеи увеличивается на волоках, проложенных в низинах и местах пересечения временных водотоков. С оставлением ключевых элементов древостоя, неэксплуатационных участков, природных биотопов, количество доступных порубочных остатков в локальных местах также снижается, поэтому требуется более тщательное планирование технологической сети. В целом практика укладки порубочных остатков на волокa с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при транспортировке древесины позволят снизить нагрузку на лесные почвы. Также при многократном проезде порубочные остатки вдавливаются в почву и наблюдаются глубокие колеи, которые играют ключевую роль в определении экологических показателей заготовки древесины.

В настоящее время в нормативно-правовых документах по лесному законодательству отсутствуют требования к допустимому уровню колееобразования и повреждению почвенного покрова. Таким образом, одним из основных направлений дальнейших исследований является разработка руководящих принципов и нормативных документов для научно обоснованного ведения лесного хозяйства, учитывающего снижение негативного воздействия многооперационной техники на лесные почвы.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

*Карминов В.Н., Митрофанов Е.М., Чумаченко С.И.*  
МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Россия

*E-mail: vnk57@yandex.ru*

Изучение биогеоценозов, особенно лесных экосистем, требует точных методов оценки структуры растительности. Применение мобильного наземного лазерного сканирования (МНЛС) значительно упрощает подеревный переcчёт, предоставляя трёхмерные облака точек. Эти данные позволяют получить точные координаты каждого дерева и измерить его диаметр, в том числе автоматическими методами.

Эффективность автоматизации этого процесса зависит от плотности получаемых данных, формирующих трёхмерную измерительную сцену. Это делает актуальной задачу определения минимальной плотности точек, необходимой для надёжного выделения стволов и измерения их дендрометрических параметров.

Технология МНЛС использует лидары на подвижных платформах для создания облаков точек с координатами (X, Y, Z) и атрибутами, такими как интенсивность отражения. В исследовании применялся портативный лидар Zeb Horizon GeoSLAM, обеспечивающий дальность до 100 метров и скорость сбора до 300 000 точек в секунду, что делает его хорошо подходящим для работы в лесных условиях.

Одним из ключевых преимуществ МНЛС является возможность создания цифровых двойников насаждений. Эти точные трёхмерные модели лесных участков включают данные о высоте, диаметре и форме деревьев, плотности крон и других параметрах, что позволяет более точно моделировать развитие лесов и оценивать их продуктивность.

Исследование проводилось на научном полигоне МГТУ им. Н.Э. Баумана, расположенном на северо-востоке Московской области. Полигон занимает площадь около 15 га и был заложен в 2022 году. Это уникальный природный комплекс, используемый для проведения лесных и экологических исследований, а также тестирования современных методов дистанционного зондирования.

Цель исследования заключалась в определении минимальной плотности точек формируемой трёхмерной измерительной сцены, при которой возможно автоматическое выделение стволов и измерение их диаметров.

Для оценки качества получаемых данных использовалось свободное программное обеспечение CloudCompare и плагин 3DFin. CloudCompare позволяет эффективно работать с трёхмерными облаками точек, а 3DFin предназначен для автоматического извлечения геометрических характеристик деревьев. Он определяет координаты ствола, диаметры на различных высотах, высоту дерева и другие дендрометрические параметры.

Для оценки пространственной плотности точек лидарной съёмки была использована дискретизация (растеризация) с разрешением 0,5 м × 0,5 м. Данный подход позволил эффективно анализировать распределение точек в пределах исследуемой территории, обеспечивая объективную оценку качества полученных данных. Применение растеризации позволило выявить зоны с повышенной и пониженной плотностью точек, что важно для корректировки параметров съёмки и оптимизации последующей обработки данных.

Ключевым критерием оценки сцены являлась способность плагина 3DFin автоматически идентифицировать деревья и измерять их диаметры. В зонах, где находились

деревья, анализировалась плотность точек и эффективность работы плагина. Если дерево автоматически идентифицировалось и его диаметр измерялся плагином, плотность точек считалась достаточной. В тех случаях, когда автоматические методы не позволяли выделить и измерить дерево, плотность точек признавалась недостаточной. На основании проведенного анализа был установлен пороговый критерий – около 500 точек на 1 м<sup>2</sup> вертикальной проекции облака. Это значение обеспечивало возможность автоматического определения дендрометрических параметров для 90 % отдельно стоящих деревьев.

Результаты исследования подтвердили высокую эффективность наземного лазерного сканирования для получения качественных данных о лесных насаждениях. Для типичных условий смешанных лесов Подмосковья была определена минимальная плотность облака точек, необходимая для автоматизированного измерения параметров деревьев.

Комбинация МНЛС, CloudCompare и 3DFin ускоряет анализ и снижает затраты благодаря открытому программному обеспечению. Эти инструменты показали свою эффективность для работы с трёхмерными сценами и оценки качества лидарной съёмки, а также позволили выявить критические зоны, требующие увеличения плотности точек.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ЛЕСОВ МОСКОВСКОЙ ЧАСТИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА "ЛОСИНЫЙ ОСТРОВ"**

*Киселева В.В.<sup>1</sup>, Тихонова Е.В.<sup>2</sup>, Горнов А.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Мытищи Московской обл., Россия

<sup>2</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: vvkisel@mail.ru*

Национальный парк "Лосиный Остров" уникален наличием архивных материалов о состоянии лесов, начиная с конца XIX в. Серьезную проработку этих материалов сделали А.В. Абатуров с соавторами (1998), но они не располагали полноценной картографической основой. Развитие геоинформационных технологий позволяет оценить всю пестроту условий и направлений развития лесов национального парка, привязать их динамику к контурам структурных компонентов ландшафта, выявить наиболее динамичные и наиболее стабильные участки.

Материалы лесоустройства на московскую часть "Лосиног Острова" известны с 1891 г., но соответствующие им карты – только с 1934 г. ГИС национального парка была создана по результатам лесоустройства 1998 г. Впоследствии была оцифрована выделная сеть 1934 и 1945 г. и соответствующая атрибутивная информация. Таким образом, с учетом лесоустройства 2020 г. история каждого выдела может быть прослежена на протяжении 90

лет. Наличие картографической основы 1934 г. позволило точно определить местоположение довоенных постоянных пробных площадей, описания которых сохранились.

Сравнение карт породного состава 1934, 1945, 1998 и 2020 гг. показывает, что "Лосиный Остров", особенно его московская часть, неоднократно подвергался природным и антропогенным нарушениям, но всегда восстанавливался в ходе природных процессов. Эта территория проходила и через стадию лесных культур (преимущественно сосновых). В то же время, есть кварталы или их части, где природная динамика почти не нарушалась, они особенно интересны как объект исследований. Лесной массив уже в первой половине XX в. имел мозаичную структуру, с контрастным чередованием хвойных и лиственных выделов.

Заслуживает внимания изменение ареалов насаждений с преобладанием наиболее распространенных пород. Ельники, которые изначально преобладали в "Лосином острове", к настоящему времени сохранились отдельными фрагментами. Площади липняков, напротив, постоянно расширяются. Ареалы распространения сосны остаются постоянными и привязаны к супесчаным почвам, на которых на месте распавшихся или вырубленных сосняков вновь создавались сосновые культуры.

На основании карты природно-территориальных комплексов, карты коренных типов леса А.В. Абатурова и О.В. Кочевой и положений, изложенных в монографии "Леса Восточного Подмосковья" (1979), была создана карта условно коренных типов лесных биогеоценозов. На ее основе сделана попытка оценить текущий сукцессионный статус лесов. Современную динамику лесов национального парка можно характеризовать как сравнительно благополучную: около 10% лесных площадей могут быть отнесены к предклимаксным, примерно на 50% лесной площади наблюдаются восстановительные сукцессии.

Общая тенденция для городской части парка за последнее столетие – "мезофитизация", а затем неморализация растительного покрова: на рубеже XIX-XX в. абсолютно преобладали хвойные насаждения таежного облика, к середине XX в. широкое распространение получают леса кисличные и широколиственные. В 1998 г. разнотравно-кисличные, кислично-зеленчуковые ассоциации сохранялись островками под хвойными породами, преобладающими типами леса стали березняки и липняки волосистоосоково-зеленчуковые. По итогам полевых исследований 2024 г. из 86 геоботанических площадок, заложенных в городской части национального парка, 56 (65%) пришлось на леса с доминированием неморальных видов в напочвенном покрове, 16 площадок (19%) - на леса с неморально-бореальным напочвенным покровом и только 3 площадки (3,5%) с бореальными видами в напочвенном покрове.



Леса национального парка имеют сложную возрастную и ярусную структуру, и их эволюция направлена в сторону дальнейшего усложнения. Современный лесной массив представляет собой мозаику лесов на разных возрастных стадиях и разных этапах сукцессий. Такое положение соответствует концепции динамической устойчивости геосистем.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Департамента Природопользования и Охраны Окружающей Среды города Москвы (проект # 2-СГ/24).

## **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ ПО ВЫСОКОДЕТАЛЬНЫМ ДАННЫМ РОССИЙСКОГО СПУТНИКА РЕСУРС-П1**

*Князева С.В., Никитина А.Д., Белова Е.И.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

E-mail: [knsvetl@gmail.com](mailto:knsvetl@gmail.com)

Космические снимки с российских спутников Ресурс-П, полученные аппаратом сверхвысокого пространственного разрешения Геотон–Л1, являются сегодня единственным доступным источником высокодетальных дистанционных данных для лесов, поэтому существует настоятельная необходимость в совершенствовании способов их обработки и анализа.

Метод пороговой сегментации может быть простым и эффективным подходом к оценке зависимости яркостных переменных изображения от характеристик древостоев (среднего диаметра ствола, высоты и возраста). В процессе пороговой сегментации выделяются затененные участки изображения кронового пространства, различающиеся друг от друга, как средней яркостью, так и числом пикселей, но для которых соблюдается определенный заданный критерий однородности (диапазон яркости). Первоначальный этап включает выделение локального минимума затененных участков межкронового пространства. На каждом последующем этапе происходит увеличение размера выделяемых сегментов в результате объединения соседних пикселей с учетом спектральной близости их значений при заданном пороге яркости.

Для эксперимента выбрана сцена с пространственным разрешением около 1 м, полученная в панхроматическом диапазоне (0,58 – 0,8 мкм) съемочной аппаратурой Геотон-Л1 на отечественном спутнике Ресурс-П1 10 июля 2017 года для центральной и северной частей национального парка «Куршская коса». Из таксационной базы лесоустройства 2016 г. было отобрано 602 выдела с преобладанием сосны обыкновенной, представляющих все группы возраста от 10 до 140 лет.

Для сегментации выбрано 10 пороговых яркостных значений с постепенным расширением верхней границы диапазона на 10 единиц яркости: для начального диапазона яркостной интервал составил 100-110; а для последнего – 100-200. На основе пороговых значений яркости проведено сегментирование изображений и созданы маски для каждого диапазона яркости. Затем, на основе масок рассчитаны площади теневых участков (сегментов) в границах выделов, а также средние значения яркости этих сегментов ( $D_0...D_n$ ), стандартные отклонения и медианные значения, а также пороговая сомкнутость полога, учитывающая только затененные межкрупные промежутки ( $Cd_0...Cd_n$ ). Статистические характеристики ( $D_0...D_n$ ) и ( $Cd_0...Cd_n$ ) использованы в качестве переменных для регрессионного анализа оценки тесноты связи между биометрическими (высота, диаметр, возраст древостоев) характеристиками сосновых лесов и особенностями изображения древесного полога на космических снимках Геотон-Л1.

Регрессионный анализ проведен с использованием 2-х методов: 1) моделирование на основе кусочно-линейной функций программными средствами пакета STATISTICA; 2) ансамблевый метод с построением деревьев решений Random Forest.

Значимые переменные  $D_n$  кусочно-линейной регрессии в большинстве своем относятся к нижним и средним пороговым значениям (100-110, 100-120, ..., 100-160), а переменные  $Cd_n$  - к нижним и верхним порогам (100-110, 100-190, 100-200). Коэффициент детерминации для параметров сосновых лесов варьирует в пределах от 0,75 до 0,98, что характеризуют достаточно высокую тесноту связи пороговых значений и параметров древостоев. Среднеквадратические ошибки RMSE при определении средней высоты деревьев составляет 5,25м, а при определении диаметра стволов – 3,66см. Наиболее высокие значения RMSE отмечены для параметра средний возраст древостоя: около 12 лет.

При использовании метода RF для каждого целевого признака строилась своя регрессионная модель, а исходные данные были разделены случайным образом на обучающую и валидационную выборки в соотношении 70% на 30%. Наиболее значимые признаки средней яркости и сомкнутости полога относятся к максимальным пороговым значениям диапазонов 170 – 200. Коэффициент детерминации  $R^2$  для характеристик сосновых лесов гораздо ниже, чем при использовании первого метода, и находится в диапазоне 0,29 – 0,37. RMSE также значительно больше и составляют 5,8см при определении диаметра ствола, 4,2м – для высоты и 20,4 лет – для возраста.

Результаты проведенного исследования показывают, что регрессионный анализ для оценки характеристик сосновых древостоев, где в качестве предикторов выступают переменные, полученные методом пороговой сегментации изображения лесного полога на

космических снимках сверхвысокого разрешения, позволяет получать результаты с достоверностью, достаточной только на уровне прогнозирования класса возраста и их характеристик.

Работа выполнена за счет средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ОЧАГОВ ВСПЫШЕК ХВОЕГРЫЗУЩИХ НАСЕКОМЫХ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ**

*Ковалев А.В.<sup>1</sup>, Суховольский В.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ИЛ СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: sunhi.prime@gmail.com*

Оценить уровень повреждения древостоя хвоегрызущими насекомыми можно двумя способами. При первом способе проводится комплексное наземное обследование поврежденной территории, оценивается общая площадь поврежденного участка, породный состав насаждения, его возраст и полнота, а также интенсивность повреждения древостоя вредителем и оценка стадии вспышки массового размножения (произошел спад численности вредителя после текущего повреждения или повреждения будут продолжаться дальше). Имея эти данные, можно достаточно точно рассчитать скорость деструкции фитомассы и объем уничтоженной фитомассы. Однако получить такой набор информации для обширных лесных территорий Сибири, значительная часть которых удалена от населенных пунктов на сотни километров, не представляется возможным. Имеющиеся на текущий момент данные лесной таксации во многих случаях устарели на 30-40 лет и потеряли актуальность, попытки экстраполировать текущее состояние насаждения на их основе, скорее всего, приведут к значительным ошибкам.

Другой способ, который получает все больше распространение в последние десятилетия, оценка необходимых характеристик поврежденного древостоя по данным дистанционного зондирования Земли. Наиболее информативными представляются расчетные вегетативные индексы, полученные на основе изображений Земли в узких спектральных диапазонах.

Для сезонной динамики таких индексов (в нашем случае, нормализованный вегетативный индекс NDVI) наблюдается ряд биологических свойств:

- для лесов бореальной зоны характерны летний подъем NDVI почти до максимальных значений на пике вегетативного периода. Схожие значения достигаются как

для хвойных массивов, так и для лиственных и травянисто-кустарниковой растительности. В то же время сухостой, гари и вывалы существенно снижают максимальные сезонные значения NDVI, что позволяет явно увидеть повреждения текущего года на пике сезона. Необходимо заметить, что развитие вспышки массового размножения может произойти в середине вегетативного сезона (от июня до августа-сентября). В этом случае возможно также использование для анализа повреждений среднего значения NDVI в летний период и сравнение его с аналогичным показателем предыдущих лет.

- индикатором, различающим хвойные и лиственные насаждения, является скорость роста NDVI в весенний период. Рост показателя начинается с момента схода снежных покровов, причем скорость роста NDVI в разы выше для хвойных пород. Аналогичная картина наблюдается в конце сезона (опад листвы с сохранением хвои и покрытие снегом), что также может служить дополнительным маркером различия породного состава древостоев.

Используя указанные выше свойства сезонной кривой NDVI, можно сформулировать алгоритм выделения очагов массового размножения основных (хозяйственно значимых) видов лесных насекомых Сибири, таких, как сибирский шелкопряд и уссурийский полиграф. Сходная задача идентификации повреждений и породного состава решается за счет машинного обучения в ГИС-системах классификации заранее известных контуров повреждения и набора спутниковых снимков за разные временные промежутки. Зачастую подобное решение представляет собой «черный ящик», построенный на основе случайного выбора весов исходных данных при минимизации ошибки классификации. В настоящей работе алгоритм строится на основе знаний о взаимодействии системы «древостой-вредитель» с тем, чтобы его можно было использовать в другом регионе или с другим видом вредителя с минимальной коррекцией коэффициентов. Кроме этого, сделан акцент на сравнительном анализе динамики изменения вегетативных показателей в разные временные промежутки.

Результативность выявления повреждений насаждений насекомыми была проверена на примере очага Сибирского шелкопряда на юго-востоке Ирбейского района Красноярского края в 2019г.

Работа выполнена в рамках государственного проекта «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

## **ВЛИЯНИЕ РАЗРАБОТКИ РАЗРЕЗА «ЗАРЕЧНЫЙ» ТАЛДИНСКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЛЕСНОЙ ПОКРОВ**

*Коломеец А.К., Хамедов В.А.*  
СГУГиТ, Новосибирск, Россия

*E-mail: stasyakolomeets@yandex.ru*

Угольная отрасль играет ключевую роль в энергетике и экономике России. Наша страна занимает пятое место в мире по объёмам добычи угля и является одним из крупнейших его экспортёров. Основными бассейнами, где ведётся добыча, являются Кузнецкий, Канско-Ачинский и Печорский, а также месторождения Восточной Сибири и Дальнего Востока. Кемеровская область (Кузбасс) является крупнейшим регионом России по добыче угля. Угли Кузбасса представлены всеми технологическими марками и группами, от бурых до антрацитов. Они могут быть использованы для получения кокса и являются ценным сырьём для химической промышленности. Добыча угля ведётся открытым способом на угольных разрезах и подземным способом в шахтах. Основными угледобывающими компаниями Кузбасса являются «СУЭК-Кузбасс», «СДС-Уголь», «Кузбассразрезуголь», «Южный Кузбасс». Талдинское каменноугольное месторождение расположено в Кемеровской области (Кузбасс) в северо-западной части Кузнецкого бассейна и занимает значительную площадь и включает несколько угольных пластов.

Несмотря на экономическую значимость, разработка угольных месторождений приводит к серьёзным экологическим рискам, которые требуют комплексного регулирования. Основными экологическими последствиями в связи с добычей являются загрязнение атмосферы, деградация земель, загрязнение гидросферы, влияние на биоразнообразие. В связи с этим целью работы является исследование динамики состояния лесного покрова территории угольного разреза «Заречный» Талдинского каменноугольного месторождения.

Рассматриваемая территория располагается на водоразделе между реками Тагарыш и Кыргай. Разрез Заречный, входящий в состав производственной единицы (ПЕ) Разрезуправления АО «СУЭК-Кузбасс», является действующим угледобывающим предприятием, введён в эксплуатацию в декабре 2003 г. В 2018 г. компания решила сегментировать разрез Заречный и выделила разрез Заречный Северный.

Большую часть территории занимают горнопромышленные ландшафты, сочетающие участки техногенных пустынь и участки с разной степенью протекания самовосстановления территории. Характерный ландшафт представлен луговыми степями с березовыми колками, лесостепями на серых лесных почвах и оподзоленных или выщелоченных черноземных аккумулятивно-эрозионных равнин.

Растительный покров участка представлен смешанными лесонасаждениями. Сохранившиеся ряды регулярной посадки, позволяют судить, что данный лесной участок сформирован в результате лесовосстановительных работ. Основные лесообразующие породы на территории – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза (*Betula pendula*) и осина (*Pópulus trémula*). Естественные березово-осиновые леса сохранились небольшими колками в понижениях рельефа и по берегам водоемов.

На исследуемой территории были выделены два тестовых участка (ТУ). Выбор местоположения ТУ был выполнен с учетом анализа данных о розе ветров исследуемой территории, полученных с метеостанции аэропорта «Спиенково» (г. Новокузнецк). С использованием инструментов геоинформационной системы выполнена географическая привязка картографического изображения с нанесением границ санитарно-защитной зоны. Анализ состояния лесного покрова выполнен по многолетним рядам вегетационного индекса NDVI в сервисе «БЕГА-Science».

За период наблюдения с 2000 г. по настоящее время вегетационный индекс хвойных деревьев, находящихся с юго-западной части ТУ и наиболее подверженных воздействию от эксплуатации разреза, имеет отрицательный тренд, в то время как на ТУ, находящихся на противоположной стороне, тренд положительный или без изменений. Также было установлено, что колебание уровня осадков статистически незначимо влияют на состояние хвойной растительности. Это позволяет предположить, что основное негативное воздействие на хвойную растительность, расположенную вблизи участка ПЕ «Заречный», связано с техногенным загрязнением, обусловленным долговременной разработкой разреза.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕРВИСОВ YANDEX CLOUD ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Котельников Р. В.

Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», Красноярск, Россия

E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

Современный этап развития лесного хозяйства характеризуется расширением использования информационных технологий, которые не просто упрощают различные производственные и научные процессы, но и создают предпосылки к их радикальной модернизации. Это связано не только с существенным увеличением объема цифровых сведений о лесах или быстрым развитием компьютерных технологий. За последние годы серьезный скачек произошёл и в развитии методов обработки данных, статистических

алгоритмов, методах машинного обучения, нейросетевых технологий и т.д. Это открывает потенциальные возможности перехода на принципиально новый уровень лесопожарной аналитики.

Несмотря на то, что Центр лесной пирологии является научным институтом в лесной сфере, а не IT-компанией, есть серьезное продвижение в вопросах информационных технологий. Вместе с тем, сложно обеспечить достаточный уровень собственной IT-инфраструктуры, дорого содержать необходимый штат инженеров и программистов для поддержания серверов и текущего системного администрирования. Одним из решений подобных проблем является использование облачных технологий и сервисов.

Одним из примеров таких сервисов является Yandex Cloud — облачная платформа от компании Яндекс, предоставляющая инфраструктурные и платформенные сервисы (IaaS и PaaS) для бизнеса и разработчиков. Она включает в себя виртуальные машины, хранилища данных, базы данных, инструменты для машинного обучения и аналитики. Платформа ориентирована на высокую производительность, масштабируемость и интеграцию с другими сервисами Яндекса, такими как искусственный интеллект и геосервисы.

Наиболее востребованный нами функционал Yandex DataLens (сервис бизнес-аналитики и визуализации данных). Чаще всего он используется для визуализации заранее рассчитанных и специальным образом подготовленных аналитических продуктов. В качестве примеров можно привести: «Календарные пожароопасные сезоны в лесах Российской Федерации»; «Анализ плотности населения вблизи лесов»; «Динамика лесопожарного зонирования»; «Динамика объемов финансирования групп мероприятий по охране лесов от пожаров»; «Населенные пункты, потенциально подверженные лесным пожарам».

Один из новейших сервисов: «Анализ динамики розы ветров», который позволяет по выбору пользователя построить для нужной территории (по точке на карте, по координатам или по территории лесничества) розу ветров по направлению и скорости ветра за последние 11 лет и среднемноголетнюю (для сравнения динамики).

Иногда мы используем сервисы не для предоставления информации внешним пользователям, а для внутренних нужд, например, визуализации исходных или промежуточных данных. Это позволяет визуально увидеть полноту данных, форму распределения, визуализировать срез данных (за нужную дату или по выбранной территории) и т.д. Такой подход очень удобен для работы команды исследователей, так как нет необходимости каждый раз отправлять новые версии файлов, а достаточно просто один раз разослать ссылку. В качестве примеров можно привести дашборды: «Визуализация

характерных пиков горимости лесов»; «Сравнение методик оценки пожарной опасности лесов в зависимости от условий погоды».

Кроме того, сервис может быть составной частью более сложной технологической цепочки, когда обновление данных происходит регулярно. Фактически это уже часть полноценной информационной системы. В качестве примеров можно назвать: «Краткосрочный прогноз вероятности возникновения лесных пожаров»; «Модифицированный расчет пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды», «Визуализация границы снежного покрова». Данные в соответствующих дашбордах обновляются автоматически на регулярной основе.

Кроме сервиса Yandex DataLens нами активно используются и ряд других сервисов Cloud Functions, Object Storage, Managed Service for ClickHouse; Virtual Private Cloud (VPC) и т.д.

В качестве одного из интересных примеров можно отметить реализацию на данной платформе голосового навыка для голосового ассистента «Лесная пирология», которая позволяет любому пользователю ассистента «Алисы» в диалоговом режиме получить голосовую информацию об основных лесопирологических особенностях лесных районов.

Платформа Yandex Cloud не решает всех инфраструктурных проблем, связанных с информатизацией, но существенно упрощает многие процессы, позволяя высвободить программистов для решения прикладных задач.

## **ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ И ТЕКУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСОВ В РАЙОНАХ НЕФТЕДОБЫЧИ – ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ НА ПРИМЕРЕ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Кравцова В.И., Зимин М.В., Чалова Е.Р.*

Географический ф-т МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

*E-mail: valentinamsu@yandex.ru*

Разработка нефтяных месторождений в лесных районах оказывает сильное воздействие на леса. Обустройство месторождений связано с расчисткой территории под площадки нефтедобычи, создание сооружений по первичной обработке нефти, нефтепроводов для ее транспортировки. Развитие нефтедобычи на уже обустроенном месторождении связано с потерями нефти при авариях на пунктах добычи и нефтепроводах. Оба аспекта - сокращение площадей лесов и влияние на них нефтяных разливов - представлены в настоящем докладе на примере исследований с помощью космических снимков участка Самотлорского месторождения в Западной Сибири.



Сравнение топографической карты 1980 г. с современными космическими снимками показало почти 3-кратное сокращение площади лесов с образованием на их месте техногенных пустошей. Состояние растительности на участках нефтяных разливов исследовано по снимкам со спутника WorldView-3 2019 г., отразившим деградацию растительности при разливах. Предложена методика дешифрирования нефтяных разливов по гиперспектральным снимкам. По материалам повторной съемки в 2022 г. выявлено частичное самовосстановление растительности через 3 года после разлива, что соответствует и данным наземных наблюдений. Результаты исследований необходимо использовать для разработки систем дистанционного мониторинга территорий месторождений.

## **ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ**

*Кудрявцев А.Ю.*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СФ ИПЭЭ им. А. Н. Северцова РАН, Саратов, Россия,

<sup>2</sup>ГПЗ «Приволжская лесостепь», Пенза, Россия

*E-mail: akydtaks@mail.ru*

Исследования проводили на территории участка «Верховья Суры» заповедника «Приволжская лесостепь». Участок, созданный в 1991 г., расположен в центральной части Приволжской возвышенности неподалеку от истоков р. Суры. Площадь участка составляет 6339 га. Средняя высота территории участка около 300 м н.у.м. Лесные экосистемы чрезвычайно разнообразны, что связано с разнообразием условий местопроизрастания и способностью многих видов растений обитать в широком диапазоне экологических условий. Преобладают коренные сосновые леса, различные по составу, строению и производительности.

Первое лесоустройство территории заповедника проведено в 2002–2004 гг. Инвентаризация лесного фонда была выполнена с повышенной точностью и детализацией. Все насаждения, начиная с молодняков, протаксированы по элементам леса, с указанием для каждого из них возраста, высоты и диаметра. При таксации описаны древостои различного состава и полноты (сомкнутости) в возрасте от 5 до 250 лет. В каждом выделе проводилось описание живого напочвенного покрова, при котором учитывались степень проективного покрытия и основные доминанты. Планы лесонасаждений были изготовлены на основе спектрзональных и черно-белых аэрофотоснимков.

Массовые материалы лесоустройства были обработаны с помощью специально разработанных схем расчета в программе Microsoft Office Excel 2010.

В 2001–2002 гг. сотрудниками Почвенного института им. Докучаева РАН было проведено картирование почвенного покрова участка «Верховья Суры», в результате которого составлена почвенная карта участка масштаба 1:10000. При этом ими были выделены 27 разновидностей почв.

Для типологической оценки лесных земель использован картографический способ, при котором на почвенную карту накладывается план лесонасаждений, и все выделы, попадающие в один почвенный контур, относят к тому или иному типу лесорастительных условий.

Результаты типологической оценки лесных земель позволили выделить семь типов лесорастительных условий.

Свежие боры (А2) занимают небольшую площадь. Пять довольно крупных участков приурочены к выровненным поверхностям водоразделов и надпойменных террас на севере и западе. Отдельные мелкие фрагменты встречаются неподалеку от них. Насаждения растут на дерново-подзолистых слабодифференцированных песчаных и супесчаных почвах, подстилаемых песками.

Площадь влажных боров (А3) очень невелика. Они приурочены к понижениям надпойменных террас Суры и ее притока р. Кармалы с высотами около 240 м н.у.м. Наиболее крупный участок находится на северо-востоке. Почвы дерново-неглубокоподзолистые профильно-глеевые супесчаные на песках.

Свежие субори (В2) – наиболее распространенный на территории участка тип лесорастительных условий. Основная площадь земель этого типа занимает возвышенные поверхности водоразделов и надпойменных террас. Небольшая их часть вытянута в виде узких полос по склонам надпойменных террас. При этом они образуют сложную мозаику из мелких фрагментов, чередующихся надпойменных террас и склонов. Отметки высот колеблются от 260 до 290 м н.у.м. Высоты водораздельного массива немного превышают 300 м.

Почвы дерново-подзолистые неполноразвитые слабодифференцированные супесчаные на песках, склоновые дерново-подзолистые супесчаные на песках и дерново-подзолистые слабодифференцированные супесчаные на песках, подстилаемые песчаником на глубине до 150 см.

Площадь влажных суборей (В3) также очень значительна. Они занимают пологие склоны речных долин (преимущественно правый берег Суры), и надпойменных террас. Почвы дерново-мелкоподзолистые поверхностно-слабоглееватые супесчаные на песках,

подстилаемые песчаником на глубине 101-150см и дерново-мелкоподзолистые поверхностно-слабоглееватые супесчаные на песках.

Сырые субори (В4) – наименее распространенный тип леса. Узкие полосы земель этого типа окаймляют заболоченные котловины в понижениях водоразделов и речных террас. Почвы торфяно-глеевые и торфяные различной мощности.

Довольно велика площадь влажных сложных суборей или судубрав (С3). Они занимают наиболее возвышенные части плоских водоразделов на северо-западе и северо-востоке участка. Довольно крупный участок лесов этого типа находится в левобережье Суры, на ее второй надпойменной террасе. Почвы дерново-поверхностно-подзолистые неполноразвитые контактно-поверхностно-глееватые супесчаные на песках и дерново-неглубокоподзолистые контактно-неглубокоглееватые супесчаные на песках, подстилаемые суглинками.

Сырые сложные субори (С4) приурочены к поймам Суры и ее притоков и занимают довольно большую площадь. Они представляют собой своеобразные географические аналоги приручьевых ельников лесной зоны, в которых сосна заместила ель. Формируются на торфянисто-подзолистых оглеенных почвах.

Сообщества, приуроченные к разным экотопам, довольно четко различаются по характеру всех ярусов растительности. Эти отличия проявляются как в гигрогенном, так и в трофогенном рядах. В борах отсутствуют широколиственные древостои и осинники. На территории суборей эти сообщества распространены незначительно. Для сложных суборей характерно преобладание лиственных древостоев. В местообитаниях с избыточным увлажнением преобладают березняки и ольшаники.

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИНДЕКСА NDVI В ОКРЕСТНОСТЯХ СТ. ВЁШЕНСКАЯ ШОЛОХОВСКОГО РАЙОНА РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА 2022-2024 ГГ.**

*Лиховидова Е.В.*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: lihovidovacatherine@yandex.ru*

Леса играют важную роль в экосистемах, оказывая значительное влияние на климат, водный баланс и биоразнообразие. В условиях изменения климата и усиливающегося антропогенного воздействия мониторинг состояния лесных массивов становится особенно актуальным. Одним из наиболее эффективных инструментов для оценки состояния растительности является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI),

который позволяет отслеживать динамику фотосинтетической активности растений на основе спутниковых данных.

Данный проект направлен на анализ изменений индекса NDVI в окрестностях ст. Вёшенская Шолоховского района Ростовской области в период с 2022 по 2024 гг.

Основная цель исследования — оценка динамики состояния растительного покрова с использованием данных спутников Landsat 8-9. Спутниковые снимки были выбраны за 22 августа 2022 года и 19 августа 2024 года, что позволило избежать сезонных колебаний вегетации и обеспечить корректное сравнение данных.

Для достижения поставленной цели выполнены следующие этапы:

- Подготовка спутниковых данных. Скачивание снимков из каталога USGS, радиометрическая и геометрическая коррекция, а также выбор спектральных каналов для расчета NDVI. Были использованы каналы 4 (красный спектр) и 5 (ближний инфракрасный спектр), которые наиболее чувствительны к изменениям в состоянии растительности.
- Расчет и визуализация NDVI. Расчеты выполнены в программной среде QGIS 3.34.13 с использованием Калькулятора Растров. Полученные карты NDVI позволяют наглядно оценить пространственное распределение индекса в исследуемой области.
- Сравнительный анализ индекса. Выполнен анализ изменений значений NDVI за двухлетний период. В 2022 году значительная часть территории имела умеренные значения NDVI (0.4–0.6), указывающие на относительно здоровую, но частично подверженную стрессу растительность. В 2024 году наблюдается повышение значений NDVI до 0.6–0.8, что свидетельствует о росте плотности и фотосинтетической активности растительности.
- Картографическое отображение. Для наглядной демонстрации пространственной динамики были построены карты с использованием цветосинтезированных изображений. Применена стандартизованная дискретная шкала NDVI в диапазоне от -1 до +1.

Анализ изменений NDVI за период с 2022 по 2024 год показывает положительную динамику в состоянии растительного покрова в окрестностях ст. Вёшенская. Основные выводы исследования:

- Увеличение значений NDVI указывает на улучшение состояния растительности и повышение ее плотности.
- Сокращение зон с низкими значениями индекса подтверждает уменьшение площадей деградированных экосистем.

- Восстановление растительности может быть обусловлено благоприятными климатическими условиями, мерами по лесовосстановлению или естественным возобновлением экосистем.

Практическая значимость данного ГИС-проекта заключается в предоставлении актуальных данных о состоянии насажденных лесов, которые могут быть использованы для мониторинга экосистем, планирования лесохозяйственных мероприятий и разработки стратегий устойчивого управления природными ресурсами.

### **ОПЫТ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ ПЕРМСКОГО КРАЯ СРЕДСТВАМИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ЛЕС»**

*Макурин Д.В.<sup>1,3</sup>, Полевицкова Ю.А.<sup>2</sup>, Шевелев Д.А.<sup>2</sup>, Иванина Л.А.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края, Пермь, Россия

<sup>2</sup> ООО «ИНФОГИС», Иннополис, Россия

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*E-mail: 1-0-0@bk.ru*

В условиях глобальных изменений климата и интенсивной эксплуатации природных ресурсов веб-системы мониторинга лесов играют решающую роль. Эти системы используют спутниковые снимки для оперативного выявления изменений, таких как вырубки, пожары и усыхание лесов. В России основным источником информации о лесах являются данные дистанционного зондирования (ДЗЗ). Для решения проблемы недостаточной точности и оперативности сведений о состоянии лесов создаются государственные информационные системы, такие как ИСДМ-Рослесхоз и ИС «Вега-Приморье».

С 2019 года в Пермском крае развивается система «Умный лес», включающая функциональную подсистему для космического мониторинга изменений в лесном фонде. В рамках системы в качестве исходных данных для анализа изменений в лесных насаждениях использовались данные о лесных участках, границах лесосек и лесопатологических обследованиях в Пермском крае с 2015 по 2022 годы, данные ДЗЗ.

В процессе предобработки данных проведены проверки и фильтрации данных, включая удаление дубликатов, коррекцию ошибок оцифровки, определение преобладающих пород и проверку консистентности. Алгоритм распознавания изменений по классам объектов запускается автоматически при поступлении новых космических снимков. Проводится предварительная обработка снимков, включая обрезку, калибровку, удаление облаков и расчет

TOA (Top of Atmosphere) reflectance. Выполняется классификация и сегментация объектов с формированием SHP-файлов для каждого класса изменений.

На описываемом этапе развития РГИС «Умный лес» для распознавания изменений для построения бинарной сегментационной маски используется сверточная нейронная сеть U-Net. Обучение проводится на объектах лесного покрова, на кропах изображений с использованием аугментации данных и композитной функции потерь (Dice loss и Weighted Cross-Entropy loss). Оценка точности проводится с использованием метрик F1-Score и IOU-score. Результаты идентификации проверялись камерально и в полевых условиях для дальнейшей настройки алгоритма.

С 2021 по 2023 годы подсистемой выявлено 56388 лесоизменений. Наилучшие результаты достигаются при использовании данных Sentinel для распознавания вырубок в бесснежный период. За разные годы процент ошибок варьировался, что требует дальнейшего анализа. Среди проблем - влияние облачности и теней на точность распознавания, вариация процента изъятия деревьев в рамках легальных рубок, необходимость натурных проверок.

Основные проблемы включают влияние облачности и теней на точность распознавания, вариацию процента изъятия деревьев в рамках легальных рубок, и необходимость натурных проверок. Предложенные решения включают улучшение методов предобработки данных, использование временных рядов (RNN/LSTM) для анализа изменений, и интеграцию данных БПЛА для более точного мониторинга. Интеграция дополнительных данных, например, метеорологических или спутниковых, может увеличить точность и надежность алгоритмов.

С 2024 года ведется съемка лесных насаждений с помощью БПЛА для детального анализа состояния деревьев, что позволит дополнительно оптимизировать работу подсистемы и улучшить распознавание лесопатологических изменений.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>

## **ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСОВ**

*Мальшиева Н.В., Золина Т.А., Филипчук А.Н., Сильнягина Г.В.*  
ФБУ ВНИИЛМ, Пушкино, Московская область, Россия

*E-mail: nat-malysheva@yandex.ru*

Индикаторами биологической продуктивности принято считать текущий прирост по наличному запасу (годовой прирост запаса древостоев) и текущий прирост по общей продуктивности, т.е. годичный прирост древостоев и накопление отпада – валежной и сухостойной древесины (Швиденко, 1999). В практике лесоустройства, при таксации лесов, эти показатели не считались приоритетными и не определялись. Возможность определения текущего прироста запаса в лесах страны стала реальной благодаря масштабным работам по государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) выборочно-статистическим методом. В 2020 г. завершен первый цикл ГИЛ и с 2021 г. проводятся работы второго цикла. Фактический текущий прирост запаса древостоев можно подсчитать по результатам повторных измерений на одних и тех же постоянных пробных площадях (ППП) ГИЛ как частное от деления разницы запасов на временной интервал между наблюдениями. Другой вариант расчета – использование однократно измеренных таксационных характеристик на ППП ГИЛ и нормативно-справочных материалов – таблиц и моделей хода роста (Швиденко и др., 2008), входными параметрами в которые служат фактические сумма площадей сечения, средний возраст, средняя высота насаждений, класс бонитета.

На примере пилотного субъекта Российской Федерации – Республики Карелии – проведен сравнительный анализ пространственных моделей 1) текущего прироста запаса древесины и общей продуктивности, рассчитанных по базе данных подеревного уровня первого и второго циклов ГИЛ, и 2) расчетной величины текущего прироста по наличному запасу и общей продуктивности по таблицам и моделям хода роста. Объем выборки 590 ППП. В картографической форме представлены результаты пространственного моделирования показателей биологической продуктивности, рассчитанных по разным наборам исходных данных. Для интерполяции использован один из методов геостатистического моделирования в программной среде ГИС – эмпирический байесовский кригинг (ЭБК). Этот метод применим к наборам умеренно нестационарных данных с распределением отличным от нормального. Для выполнения требования репрезентативности прогнозных значений для территории объекта исследования данные локально преобразуются к нормальному распределению на подвыборках. В отличие от других моделей кригинга, в

которых ориентиром интерполяции служит общее среднее значение и среднеквадратичное отклонение всех выборочных данных, ЭБК ориентирован на локальные случайные функции – расчет локального среднего и его вариабельности в подвыборке. Преимущество этой модели кригинга – более точный прогноз с использованием небольших наборов данных (Gribov A., Krivoruchko K. 2020). Опробованный метод реализован для предсказания пространственного распределения текущего прироста по наличному запасу и общей продуктивности. Эффективность метода оценена набором критериев. Величина ошибок интерполяции свидетельствуют о несмещенности прогноза и правильной пространственной интерполяции переменных. Сопоставление пространственных моделей фактического и расчетного по таблицам хода роста показателей на территории пилотного субъекта позволило локализовать экстремумы и продемонстрировать снижение текущего прироста и потенциала продуктивности лесов в результате заготовки древесины и неблагоприятных воздействий природного характера.

## **ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ СТВОЛОВ МОЛОДЫХ ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

*Мателенок И.В., Семенов Д.А.*

Санкт-Петербургский ГУАП, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: igor\_matelenok@mail.ru*

Методы воздушного и наземного лазерного сканирования, обеспечивающие оперативное получение информации о форме и расположении объектов на земной поверхности, находят все более широкое применение в лесоведении и лесном хозяйстве благодаря совершенствованию измерительной аппаратуры и реализации новых подходов к обработке данных. При этом оценка параметров древостоев на основе формируемых в результате сканирования облаков точек во многих случаях по-прежнему оказывается затруднена. Так, зачастую сложности вызывает обработка данных сканирования участков, занятых подростом.

Последовательность операций обработки данных наземного сканирования для решения задач лесоведения и лесного хозяйства традиционно включает в себя формирование, уравнивание и сшивку сканов, выделение в облаке точек образов растительных организмов, поверхности земли и прочих объектов, детектирование стволов, ветвей и листьев и определение значений показателей, характеризующих каждое дерево и древостой в целом. Настоящее исследование является частью работы, направленной на минимизацию ошибок



обнаружения ствола и его координирования, влияющих на качество оценки ряда важных показателей, для случаев сканирования молодых деревьев.

Созданное авторами программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО), предыдущая версия которого описана в работе (Мателенок И. В. Определение планового положения стволов подроста по данным наземного лазерного сканирования. Сборник тезисов докладов IV Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». СПб., 6 ноября 2024 г. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2024. С. 318–320.), по состоянию на март 2025 г. позволяет детектировать стволы деревьев и определять координаты центров проекций комлей стволов на поверхность грунта посредством обнаружения в растеризованных слоях облака точек каплевидных образований и анализа их взаимного расположения с выявлением наиболее вероятного положения ствола и его корректировкой по данным о форме кроны.

Альтернативой созданному ПАО является используемый в практике лесоведения программный модуль 3DFin, функционирующий на базе открытого программного обеспечения CloudCompare, а также доступный в виде библиотеки Python и плагина QGIS. Алгоритмическая основа модуля берет свое начало в работе Cabo и др. (Cabo C., Ordonez C., Lopez-Sanchez C. A., Armesto J. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. Vol. 69. P. 164–174). Данный модуль, как и широко применяемый программный продукт 3DForest, позволяет с высоким уровнем автоматизации определять ряд характеристик древостоев (высота дерева, диаметр ствола на уровне груди) на основе облаков точек.

Испытания созданного ПАО были проведены на материале данных наземного лазерного сканирования, полученных на территории заказника «Северное побережье Невской губы» с помощью прибора Trimble X7. Большая часть площади ранее подвергнутого съемке участка занята подростом разных пород (хвойных и лиственных). Облако точек, сформированное в результате сшивки и уравнивания исходных сканов, было нарезано на фрагменты для экономии вычислительных ресурсов. Визуально различимые деревья в каждом фрагменте были проиндексированы, и с помощью инструментов программного обеспечения CloudCompare определены координаты центров проекций комлей их стволов в условной системе координат. Эти опорные значения использованы для оценки величины ошибок при испытаниях ПАО.

В ходе испытаний было успешно выполнено детектирование и оценка планового положения центров проекций комлей стволов 88% деревьев из отсканированных на тестовом

фрагменте участка. ПАО не позволило верно определить координаты стволов некоторых молодых хвойных деревьев (елей и сосен), образы стволов которых оказались сильно фрагментированы по причине экранирования лазерного излучения ветвями в ходе съемки. На той же выборке растительных организмов модуль 3DFin обеспечил верное обнаружение 78% стволов после продолжительного подбора параметров автоматического детектирования. Ошибки также ассоциированы с подростом хвойных пород.

В результате проведенных работ выявлено, что использование ПАО на основе детекторов каплевидных образований является одним из путей уменьшения ошибок обнаружения стволов и их координирования при автоматизированном анализе данных сканирования подроста. Однако в ряде случаев густота крон в сочетании с геометрией съемки не позволяет получить исходные данные, пригодные для выделения образов стволов.

## **ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ КАК СПОСОБ ЗАЩИТЫ ОТ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ**

*Медведева М.А.<sup>1</sup>, Иткин В.Ю.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ИЛАН РАН, Успенское, Московская область, Россия

<sup>2</sup> НИУ имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*E-mail: medvedeva@ilan.ras.ru*

Процесс осушения торфяников нарушает естественный баланс этих экосистем, приводя к деградации почвы и резкому увеличению объема выделяемых парниковых газов (ПГ). Заброшенные и не подвергнутые рекультивации торфяники, являющиеся легковоспламеняющимся материалом, становятся первоочередными объектами торфяных пожаров. Наиболее оптимальный метод для сокращения эмиссии ПГ и снижения пожарной опасности на осушенных торфяниках – вторичное обводнение и заболачивание. Данная мера напрямую способствует реализации целей Парижского соглашения по климату в рамках сектора землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство (ЗИЗИЛХ) и, в конечном счете, и смягчению изменений климата. На базе ранее проведенных работ с использованием спутниковых данных и наземной проверки представлены методы оценки сокращения выбросов ПГ по результатам мероприятий по вторичному обводнению, которые могут быть использованы на национальном, региональном уровнях и для локальных проектов обводнения. Методика включает определение эффективно обводненных площадей, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья. Подход использован при включении с 2020 года вторично обводненных торфяников в Национальный доклад

Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и при поддержке Российского научного фонда (проект 23-74-00067).

## **СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЛЕСОПОКРЫТЫХ ТЕРРИТОРИЙ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ БАСЕЙНОВ РЕК ПЕЧОРЫ И ВЫЧЕГДЫ**

*Мыльникова Т.А., Боровлёв А.Ю., Елсаков В.В.*  
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*E-mail: mylnikova.t.a@ib.komisc.ru*

Большинство современных лесоэкологических исследований не обходится без данных дистанционного зондирования Земли. Различные тематические продукты глобального спутникового мониторинга расширили возможности для количественного анализа лесных экосистем через спектральные индикаторы. Среди множества «геоиндикаторных» или «ландшафтных» признаков, выявляемых по спутниковым данным, ключевая роль принадлежит комплексным показателям состояния растительности и гидрологических объектов. Таким образом, цель исследования – анализ интенсивности изменений среднетаежных лесопокрываемых территорий водосборных бассейнов рек Печоры и Вычегды с 2001 по 2023 годы.

Материалами исследования послужили временные композиты изображений Global Forest Change 2000-2023 (Treecover2000 и Lossyear), данные Рослесхоза по фактической рубке леса с 2001 по 2005 и материалы о пожарах со спутника SPOT. По результатам анализа Global Forest Change к 2023 году, в среднем лесопокрываемые территории бассейнов рек Вычегды и Печоры сократились на 9%. Несмотря на завышающие показатели потерь в связи с пожарами, общий тренд площадных изменений в связи с вырубками остается близким по значению с данными Рослесхоза (занижение на 35%).

При продвижении на юг степень трансформации ландшафтов бассейна р. Вычегда возрастает, что связано с активной лесозаготовительной и хозяйственной деятельностью, в то время как трансформация бассейнов Печоры наблюдается при продвижении на восток, ближе

к Уральским горам, что связано с заболачиванием лесных территорий, пожарами и сходами лавин. Это касается как коренных, так и производных лесов, при этом до 2010 года потери коренных лесов были выше на 12-14%.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ С БАЗОЙ ДАННЫХ «ПОДСТИЛКИ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ РОССИИ»**

*Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Честных О.В.*

ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: narykovaanna@yandex.ru*

Анализ ранее опубликованных обзоров современных российских и зарубежных исследований по цифровому почвенному картографированию (Гопп и др., 2023; Suleymanov et al., 2024) выявил небольшое число работ, посвященных картографированию содержания и запасов углерода лесной подстилки на территории России (Гаврилюк и др., 2021). Существуют оценки запасов углерода подстилок на национальном и региональном уровнях, которые выполнены традиционными методами картографирования, основанными на использовании тематических карт, а также на данных лабораторно-полевых измерений (Честных и др., 2007; Щепашенко и др., 2013; ИГКЭ, 2018; Бахмет, 2018; Чернова и др., 2021; БД «Подстилки лесной зоны России»).

В исследовании (Нарыкова, Плотникова, 2023) была создана геопространственная модель запасов углерода лесной подстилки для Республики Карелии и Карельского перешейка (КП) Ленинградской области. Для обучения модели использованы результаты лабораторно-полевых измерений запасов углерода подстилки, полученные в рамках международной программы по оценке и мониторингу влияния загрязнения воздуха на леса ICP Forests. Согласно результатам моделирования наибольшие запасы углерода сосредоточены в средней тайге: от 4.7 до 5.4 кг/м<sup>2</sup> в окрестности северного Приладожья, от 5.2 до 5.7 кг/м<sup>2</sup> на Заонежском полуострове и на юго-востоке Карелии. Минимальные запасы углерода отмечаются на КП – от 1.9 до 2.6 кг/м<sup>2</sup>, в Центральной части Карелии и при движении на северо-восток – от 3.8 до 4.2 кг/м<sup>2</sup>.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ результатов геопространственного моделирования запасов углерода лесной подстилки в исследуемом регионе со значениями базы данных (БД) О.В. Честных и Д.Г. Замолодчикова «Подстилки лесной зоны России».

Ранее проведенный сравнительный анализ результатов моделирования и опубликованных работ (Нарыкова, Плотникова, 2025) показал, что модель запасов углерода в подстилке в среднем превышает литературные значения от трех (Честных и др., 2007; ИГКЭ, 2018; Чернова и др., 2021) до пяти раз (Щепашенко и др., 2013). Наиболее близкие к результатам моделирования оценки запасов углерода представлены в работе О.Н. Бахмет (2018) для Республики Карелия. Значения, представленные в БД «Подстилки лесной зоны России» для северной и средней подзон тайги Европейско-Уральской части России, в полтора раза ниже, чем полученные результаты моделирования. Кроме того, средние значения для северной и средней подзон тайги практически не отличаются — 2.9 и 2.8 кг/м<sup>2</sup>. По результатам моделирования запасы углерода в подстилке имеют статистически значимые различия ( $p\text{-value} < 0,05$ ) в разных подзонах тайги: в северной — 4.4 кг/м<sup>2</sup>, в средней — 4.7 кг/м<sup>2</sup>.

Ранее проведенные исследования (Честных и др., 2007; Щепашенко и др., 2013; Кузнецова и др., 2020; Чернова и др., 2021) показали тренд снижения средних запасов углерода подстилки с севера на юг на территории Европейской части России. Этот тренд соответствует данным БД О.В. Честных и Д.Г. Замолотчикова, согласно которым запасы углерода в южной подзоне тайги составляют около 1.4 кг/м<sup>2</sup>, тогда как результаты моделирования оценивают этот показатель в диапазоне 1.9–2.6 кг/м<sup>2</sup>.

Анализируемая БД «Подстилки лесной зоны России» содержит значения запасов углерода подстилки, близкие к результатам геопространственного моделирования. По мнению авторов, результаты моделирования запасов углерода в лесной подстилке могут объясняться исходно высокими значениями, полученными в ходе лабораторно-полевых измерений ICP Forests. Вероятно, в проанализированных работах национального уровня могла не учитываться вариабельность запасов углерода в почвах с различными условиями увлажнения. О существующей проблеме ранее упоминалось в исследовании М. А. Подвезенной и соавторов (2022).

Благодарности. Работа выполнена в рамках молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН им. А.С. Исаева «Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов» (регистрационный номер 1024100700084-5-1.6.19).

## **ПЕРЕХОД ОТ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ К MASK R-CNN: ОЦЕНКА СОГЛАСОВАННОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОСНОВЫХ ЛЕСОВ**

*Никитина А.Д.*

ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: nikitina.al.dm@gmail.com*

Визуальное дешифрирование ортофотопланов остаётся распространённым подходом при определении морфометрических характеристик деревьев по данным БПЛА-съёмки. Однако его применение на больших территориях ограничено трудоёмкостью и субъективностью интерпретации. В условиях расширения практики дистанционного мониторинга лесов возрастает потребность в надёжных и воспроизводимых автоматизированных методах обработки изображений. Перспективным направлением становится применение алгоритмов машинного обучения, в частности нейронных сетей, таких как Mask R-CNN, для автоматической сегментации крон деревьев.

В нашей работе проведён поэтапный анализ согласованности данных, полученных различными методами. На первом этапе характеристики сосновых древостоев, определённые визуально по ортофотопланам БПЛА, были сопоставлены с результатами наземных таксационных измерений. На втором этапе визуальные оценки были сопоставлены с результатами автоматической сегментации по алгоритму, разработанному в рамках методического подхода, представленного ранее (Никитина, 2024). Такой подход на основе нейронной сети Mask R-CNN позволяет оценить, насколько автоматизированные методы могут воспроизводить результаты, получаемые при традиционном визуальном дешифрировании, и где наблюдаются расхождения. Оценка включала сравнение по ключевым параметрам: площади и периметру крон, числу деревьев и сомкнутости. Анализ проводился на пробных площадях сосновых древостоев различного возраста в пределах трёх особо охраняемых природных территорий хвойно-широколиственных лесов европейской части России.

Полученные результаты подтверждают высокую степень согласованности между визуальной и автоматической сегментацией и демонстрируют потенциал применения нейронных сетей для комплексной оценки структурно-биометрических характеристик лесов. Разработка и внедрение таких подходов позволяет существенно повысить эффективность и воспроизводимость лесного мониторинга, обеспечивая основу для расчёта запасов углерода и оценки состояния лесных экосистем.

Благодарности. Работа выполнена в рамках работы молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов» (регистрационный номер 1024100700084-5-1.6.19).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ КАРКАСОВ ГОРОДОВ КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ ПЯТИГОРСКА, ЕССЕНТУКОВ, КИСЛОВДСКА, ЖЕЛЕЗНОВОДСКА И ЛЕРМОНТОВА)**

*Паташова Е.С., Скрипчинская Е.А.*  
ФГБОУ ВО СКФУ, г. Ставрополь, Россия

*E-mail: patashova.elizaveta@yandex.ru*

Лесные экосистемы выполняют ряд жизненно важных функций, включая регулирование климата, улучшение качества атмосферного воздуха, предотвращение водной и ветровой эрозии почвы, а также сохранение биологического разнообразия. Особая значимость сохранения лесов района Кавказских Минеральных Вод (КМВ) определяется уникальной природой региона, где природные ресурсы, такие как минеральные воды и горный климат, неразрывно связаны с состоянием окружающей среды. Кроме того, леса способствуют развитию рекреации и туризма, обеспечивая комфортную среду для отдыха и лечения. Экологический каркас (ЭК) представляет собой систему природных территорий, обеспечивающих устойчивость экосистем и улучшение качества городской среды. Изучение вопросов сохранения и рационального использования лесных ресурсов имеет первостепенное значение для устойчивого развития региона и повышения его привлекательности как курорта мирового уровня.

На этапе сбора данных исходной информацией послужили снимки высокого разрешения спутника ДЗЗ Sentinel-2B. Для определения типа территории получен двухканальный снимок с общедоступного информационного портала EarthExplorer за 2023 гг.

Предобработка данных включает в себя радиометрическую коррекцию, геопривязку изображений и удаление облачности и теней посредством подбора космоснимков.

Методика исследования основана на определении нормализованного относительного индекса растительности – NDVI, вычисляемого по формуле:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ , где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра. Расчеты показателей и определение площадей произведено в программном обеспечении QGIS в следующей последовательности действий:

- 1) Загрузка двухканальных растровых снимков в пространство QGIS;

- 2) Создание границ городов и микрорайонов с помощью тега «admin\_level» модуля OpenStreetMap;
- 3) Обрезка растровых снимков по загруженным контурам районов;
- 4) Определение диапазона зеленой растительности;
- 5) Синтезирование полученных значений;
- 6) Классификация изображений в интегрированном плагине SCP на основе участков-эталонов, данные о которых получены на спутниковом снимке с комбинацией каналов «естественные цвета»;
- 7) Определение площадных характеристик в инструментах анализа «Зональная статистика растров».

Для изучения определены города КМВ: Ессентуки, Пятигорск, Кисловодск, Железноводск и Лермонтов; проанализированы генеральные планы; исследование базируется на данных, полученных с использованием методов ДДЗ и космоснимков данных территорий. Анализ ландшафта предполагает оценку фрагментации ландшафтов, определение ключевых экологических ядер и коридоров, как следствие, выявление зон высокой ценности. Как результат, на основе полученных данных были выделены основные структурные элементы ЭК для выбранных городов, определены узловые общегородские центры и главные ландшафтно-планировочные оси. Основные выводы:

- В каждом городе существует значительное количество ядер 1-го и 2-го порядков, однако их распределение неравномерно, что создает пробелы в покрытии территорий зелеными насаждениями.
- Центральные части городов лучше обеспечены элементами ЭК, тогда как периферийные районы испытывают дефицит структурных элементов.
- Наиболее сбалансированной системой ЭК обладает Пятигорск, где элементы каркаса равномерно распределены по городу и образуют единую сеть.
- Во многих городах ощущается нехватка связующих экологических коридоров, что препятствует формированию непрерывной системы озелененных пространств.
- Большая часть площадей в городах (особенно в Кисловодске и Железноводске) занята природными лесными массивами, преимущественно по периферии, однако в центральных районах наблюдается недостаток зеленых насаждений.

Использование данных ДДЗ позволяет эффективно выделять и оценивать современное состояние зеленых насаждений, а также может выступать в качестве доказательной базы при приведении рекомендаций по оптимизации городского планирования. Несмотря на наличие значительного числа ядер и коридоров, необходима оптимизация их размещения и



увеличение количества в недостаточно обеспеченных районах для улучшения экологической обстановки городов.

## **БИОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ**

*Петржик Н.М.<sup>1</sup>, Сандлерский Р.Б.<sup>2,1</sup>, Ермохина К.А.<sup>1</sup>, Тушигмаа Ж.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ИПЭЭ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> НИУ ВШЭ, Москва, Россия

<sup>3</sup> БСИ МАН, Улан-Батор, Монголия

*E-mail: petrzhik.nat@mail.ru*

Лесные экосистемы Монголии занимают до 8% территории страны и сосредоточены преимущественно на севере и северо-западе, в возвышенных и горных районах. Аридизация климата и антропогенное воздействие (пожары и вырубки) – основные факторы деградации лесных сообществ в регионе в последние десятилетия. Помимо естественных факторов (изменение режима увлажнения и конкуренция с кустарниковой растительностью), лесовозобновлению препятствуют и экономические изменения, которые привели к увеличению поголовья скота и затронули все экосистемы региона. Мониторинг и разработка мер по сохранению лесов региона обуславливают необходимость проведения комплексных исследований этих труднодоступных экосистем, прежде всего, на основе данных дистанционного зондирования, как инструмента прямых измерений параметров функционирования и экосистемных функций.

Исследование направлено на развитие методологии оценки параметров функционирования экосистем по мультиспектральным данным дистанционного зондирования (МДДЗ) в рамках информационно-термодинамического подхода. Такой подход рассчитывает основные составляющие энергетического баланса биогеоценоза, как открытой динамической системы, преобразующей солнечную энергию за счет неравновесности живого вещества, по соотношению отражения в каналах. В качестве измерительной системы использованы МДДЗ Landsat 8-9 OLI TIRS за период 2013-2024 гг. для двух ключевых участков без антропогенной трансформации с прямыми склонами и однородной горной породой. Для оценки вклада рельефа по ЦМР Aster DEM рассчитаны стандартные морфометрические характеристики, отражающие перераспределение тепла и влаги на различных иерархических уровнях, линейные размеры которых определялись с помощью спектрального анализа. Свойства экосистем оценивались на точках трансект в ходе полевых исследований в 2022-2024 гг. На склоне северо-восточной экспозиции хребта Тарбагатай-

Нуру (N 48.64, E 98.54) заложена трансекта длиной 1200 м и шагом опробывания 20 м. Вторая трансекта длиной 1700 м и шагом опробывания 40 м заложена на склоне северной экспозиции хребта Хан-Хохиун (N 49.40, E 94.79). Для точек (102 шт.) выполнены стандартные геоботанические и почвенные описания, измерены сумма площадей сечений древостоя (SBA) и индекс листовой поверхности (LAI), отобраны укосы фитомассы и определен её сухой вес. Для верхних горизонтов почв измерены pH, объемная влажность (TDR-100) и температура, содержание общего углерода и азота определено в лаборатории (VELP Scientifica CN 802). По итогам кластеризации растительности выделено 3 уникальных сообщества на каждую из трансект. Для первой (снизу вверх): 1) вейниково-осоковые жимолостные слабо-сомкнутые лиственничники, 2) осоково-злаковые березковые лиственничные редины, 3) осоково-злаковые черничные ерники. Для второй: 1) черничные березковые кедрово-лиственничные редины, 2) черничные жимолостно-березковые кедрово-лиственничные леса разной сомкнутости, 3) разнотравно-злаковые луга. На обеих трансектах почвенный покров представлен литозёмами, органо-аккумулятивными и железисто-метаморфическими почвами.

Биофизические параметры: альbedo, затраты энергии на эвапотранспирацию, связанная энергия (рассеяние энергии в среду), приращение внутренней энергии (накопление в системе), температура/тепловой поток от деятельной поверхности, индекс биологической продуктивности (NDVI), коэффициенты характеризующие организованность и неравновесность преобразования энергии (приращение информации, энтропия, самоорганизация, q-индекс) рассчитаны для периода с марта по ноябрь (50 сцен) для каждого участка. Ряд измерений для каждой переменной преобразован методом главных компонент для выделения их сезонных состояний. Получено, что вегетационный период для данной территории выделяется с мая по октябрь. Соответственно, далее анализировались сцены только для вегетационного периода (36 шт.). Внутри вегетационного периода аналогично выделены три типичных состояния для каждой переменной, отражающее их весеннее, летнее и осеннее «состояния». Далее, каждое «состояние» было сопоставлено с данными полевых измерений и морфометрическими характеристиками рельефа. Получено, что варьирование составляющих энергетического баланса, в основном, связано с характеристиками древесного яруса (LAI и SBA) и, в меньшей степени, кустарникового и мохового. В то же время, выделенные растительные сообщества достоверно различаются по своим средним биофизическим параметрам. Вклад характеристик рельефа в варьирование биофизических переменных составляет порядка 30-40%.

Благодарности. Зоёо Д. и Борхүү Д. за участие в полевых работах, начальнику СРМКБЭ РАН и АНМ С.Н. Баже и коллективу экспедиции за обеспечение полевых работ, И.И. Широне и С.Ю. Мочёнову за помощь в обработке данных.

## **СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСЕРВИСОВ В МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

*Плотникова А.С., Архипцева Е.А., Нарыкова А.Н., Гераськина А.П.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: plotnikova-as-cepl@yandex.ru*

Современные исследования природоохранной тематики часто требуют привлечения специалистов различных областей знаний - экологии, геоботаники, лесоведения, почвоведения, дистанционного зондирования Земли и ряда других. Одним из способов сотрудничества специалистов при совместном анализе пространственных данных является использование геосервисов. Согласно ГОСТ Р 58570—2019, под геосервисом понимается веб-сервис, предоставляющий возможность выполнять операции на пространственных данных или на связанных с ними метаданных.

Перспективным направлением при создании геосервисов является использование программного обеспечения (ПО) с открытым кодом. Выполненный авторами обзор российских геосервисов природоохранной тематики на основе открытого программного обеспечения показал широкое использование библиотек *OpenLayers* и *Leaflet*, *API Yandex.Map*, а также платформы *Google Earth Engine (GEE)*.

В Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН им. А. С. Исаева при проведении различных экологических исследований создаются геосервисы на основе открытого ПО. Так, функциональные возможности библиотеки *OpenLayers* были использованы для визуализации пространственных результатов проекта «Космическая научная обсерватория углерода лесов России» в виде многолетнего ряда карт растительного покрова, преобладающих лесных пород, возраста и бонитета леса, запаса стволовой древесины и углерода в надземной фитомассе лесов (<http://carbon.cepl.rssi.ru/maps/>).

Для представления сети мониторинга климатически активных веществ в наземных экосистемах России, отображающей распределение тестовых полигонов консорциума «РИТМ углерода», созданы интерактивные карты посредством библиотеки веб-картографирования *Leaflet* (<https://ritm-c.ru/choosing-poligons/choosing-poligons.html>), а также с помощью *API Yandex.Map* (<https://ritm-c.ru/results/monitoring-network/>).

Облачная открытая онлайн-платформа для работы с большими объемами геопространственных данных *Google Earth Engine* предоставляет инструмент *Earth Engine Apps* для разработки и публикации интерактивных веб-приложений. Реализация проекта «Геопространственное моделирование сообществ дождевых червей Северо-Западного Кавказа методами машинного обучения» выполнена на платформе GEE. С помощью инструмента *Earth Engine Apps* созданы интерактивные карты предикторов моделирования (<https://earthworms.ru/results/predictors/>) и базы данных точек отбора почвенно-зоологических проб, содержащих характеристики растительности, почвы, видового состава дождевых червей, их численности и биомассы (<https://earthworms.ru/results/db/>). Для визуализации и анализа результатов моделирования сообществ дождевых червей разработаны карты и инструменты интерактивного получения статистической информации в пределах биомов и лесных формаций (<https://earthworms.ru/results/modeling/>).

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (НИОКТР 124013000750-1).

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ НА ПРИМЕРЕ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Подольская Е.С., Ершов Д. В., Ковганко К. А.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: podols\_kate@mail.ru*

Согласно актуальной Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, повышение транспортной доступности территорий является долгосрочной целью развития транспортной системы страны. Транспортная доступность является важной частью развития лесного хозяйства и лесной промышленности, учитываемой в Лесных планах регионов России. Под наземной транспортной доступностью в лесном хозяйстве понимается возможность доступа к ресурсам леса по дорогам общего и специального назначения.

Оценка комплексной транспортной доступности регионального уровня необходима для решения трех взаимосвязанных задач: осуществления охраны лесов от пожаров (доступ от пожарно-химических станций - ПХС), обеспечения доступа населения к ресурсам леса (доступ от населенных пунктов), получения и анализа логистики доступа к лесным ресурсам предприятиями лесопромышленного комплекса (доступ от ЛПК) с определением перспективных участков.

Оценка строится на основе анализа актуальных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по лесным участкам, населенным пунктам, дорожной сети и ПХС, а также данным по расположению предприятий ЛПК. Для предлагаемого исследования данными ДЗЗ являются тематические растровые мозаики, содержащие классификацию наземных экосистем, а также основные характеристики лесных участков: преобладающие породы, возраст, а также запасы древесины.

В качестве объекта исследования выбрана Костромская область, расположенная в Центральном федеральном округе России и обладающая значительной лесистостью и перспективным лесопромышленным комплексом, основным направлением которого является развитие мощностей по глубокой переработке древесины. Растровые мозаики для ее территории подготовлены сотрудниками Лаборатории мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН по снимкам LANDSAT с пространственным разрешением 30 метров за период 2017-2021 гг. Имеются данные по 5ти расположенным в области ПХС, относящимся к станциям 3го типа ОГБУ «Костромская база охраны лесов» в лесах высокой природной пожарной опасности с продолжительным пожароопасным сезоном (более 5ти месяцев). В качестве данных по предприятиям лесной промышленности используется каталог ЛПК, находящийся в открытом доступе в сети Интернет и состоящий из 29 предприятий, локализованных в 16ти населенных пунктах региона.

В подборе и оценке данных по дорогам использовались датасеты открытого доступа Open Street Map (OSM), Diva GIS, а также данные по дорожной сети общего и специального использования от ФБУ ВНИИЛМ, полученные и используемые ЦЭПЛ РАН в рамках Государственного задания. Подробная характеристика дорог по типу, виду и скорости перемещения техники, а также степень актуальности подготовленного специалистами ВНИИЛМ датасета позволяют принять его за основной для построения регионального графа дорог Костромской области. В граф дорог были включены данные по всем их типам за исключением строящихся.

Предварительный анализ данных состоял в расчете общих характеристик транспортной доступности региона и лесничеств. В 3х часовой доступности от ПХС, регламентирующей методическими указаниями лесного хозяйства, находится примерно 51 % территории Костромской области: 10,3 % территории доступно в пределах часа, 19,4 % - от 1 до 2х часов, 21,3 % - за 2-3 часа. Анализ транспортной доступности региона в границах лесничеств показал, что из 22х лесничеств 11, 18 и 19 лесничеств находятся в границах зон 1 час, 1-2 и 2-3 часа соответственно. В группе доступа в пределах 1 часа максимальная по площади территория доступа находится в границах Костромского, Нейского и Мантуровского

лесничеств, что определяет актуальные приоритеты и возможности их лесохозяйственного освоения.

Совместное использование характеристик лесов по наземным экосистемам, преобладающим породам, возрасту, а также запасам древесины лесных участков определяет основу для разработки методики комплексной оценки транспортной доступности лесных участков региона, использующей лесничество как единицу административного деления лесного хозяйства. Для продолжения исследования методику планируется дополнить изучением влияния границ лесничеств как возможных барьеров наземного доступа к ресурсам леса для пожаротушения, доступа населения и предприятий ЛПК к ресурсам леса.

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

## **СОВРЕМЕННЫЕ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА**

*Подольская Е.С.<sup>1,2</sup>, Шайхметов А. Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, РФ

<sup>2</sup> НИУ ВШЭ, Москва, РФ

*E-mail: podols\_kate@mail.ru*

Под лесной инфраструктурой, согласно перечню статьи 13 Лесного Кодекса России 2006 г., понимаются такие объекты, как лесные дороги, проезды, просеки, склады, а также пожарные наблюдательные пункты, противопожарные полосы, скважины и системы для осушения, используемые для охраны, защиты и воспроизводства лесов. В этом списке значительное место по протяженности и значимости для многих регионов страны занимают дорожные сети, распознавание которых по космическим снимкам имеет исследовательский и практический интерес для ряда отраслей хозяйства при актуализации данных по дорогам. Автоматизированное распознавание объектов линейного протяжения, к которым относятся дороги, при помощи нейросетей уже имеет историю практической разработки и продолжается в настоящее время: создаются и представляются в открытый доступ датасеты (наборы данных) по дорогам регионов мира, совершенствуются методы и технологии глубокого обучения (нейросети с архитектурами разной сложности), улучшается точность распознавания дорог разных типов.

Предлагаемая работа является развитием доклада по результатам тестирования архитектур нейросетей для распознавания дорог, представленном на XI Международной

научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», состоявшейся в Красноярске в сентябре 2024 года. Сделан обзор современных (по состоянию на март 2025 года), находящихся в открытом доступе нейросетей для применения в распознавании объектов инфраструктуры лесного хозяйства. Самыми используемыми архитектурами для дорог продолжают оставаться UNet и ResNet, актуальным примером является датасет от Microsoft (<https://github.com/microsoft/RoadDetections>). Модель была обучена на 512x512 изображениях, является полностью сверточной, что позволяет обрабатывать изображения любого, кратного 64, размера. Обучающий набор получен при помощи инструментария фреймворка Keras и состоит из 20000 размеченных изображений, созданных в том числе с использованием аугментации.

Доменная библиотека TorchGeo, являющаяся расширением PyTorch, содержит пространственные датасеты, примеры их использования и обученные модели. В актуальной версии 0.6.2 от 20 декабря 2024 года реализованы современные модели сегментации (например, U-Net и DeepLabV3+), поддерживаются преобразования с учётом географических проекций, а также обеспечивается работа с мультиспектральными изображениями высокого пространственного разрешения. Эти возможности позволяют не только локализовать объекты за счёт сохранения геопространственных метаданных, но и обрабатывать большие объёмы данных, что важно для решения практических задач лесного хозяйства.

YOLO (You Only Look Once) представляет собой семейство нейросетевых архитектур, специализирующихся на обнаружении и распознавании объектов в реальном времени. Последние версии, включая YOLO11 (октябрь 2024 года) и YOLOe (март 2025 года), показывают возможности в распознавании объектов лесной инфраструктуры на спутниковых и аэрофотоснимках. YOLO11 отличается уменьшенным на 22% количеством параметров по сравнению с YOLOv8m и обеспечивает поддержку сегментации экземпляров и классификации изображений, что важно при работе с разнородными объектами лесной инфраструктуры. YOLOe, выпущенная в 2025 году, представляет интерес при обнаружении и сегментации таких линейных объектов, как лесные дороги, просеки и противопожарные полосы. YOLOe обладает повышенной устойчивостью к различным условиям съёмки и атмосферным явлениям, что делает ее вариантом выбора для лесных территорий в различных климатических и сезонных условиях. Модель способна адаптироваться к разному пространственному разрешению снимков и учитывает геопространственную привязку данных, что важно при распознавании объектов инфраструктуры лесного хозяйства.

В 2025 году результаты работы используются в подготовке и проведении лекций и семинарских занятий по курсу «Машинное обучение в решении пространственных задач»

магистратуры «Пространственные данные и прикладная геоаналитика» 1го года обучения (<https://www.hse.ru/ma/geoanalytics/>), открытой на Факультете географии и геоинформационных технологий НИУ ВШЭ в 2024 году.

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

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ ПО СНИМКАМ SENTINEL-2**

*Попова А.К.*  
ИДСТУ СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: chudnenko@icc.ru*

Информация о составе и пространственном распределении пород деревьев необходима для эффективного мониторинга и управления лесными ресурсами. Необходимые сведения о лесах можно получить при классификации мультиспектральных спутниковых снимков, но распознавание пород деревьев является сложной задачей из-за сходства спектральных коэффициентов отражения разных пород. В этом случае для улучшения точности классификации к спутниковым снимкам добавляют данные другой модальности – топографические, климатические и почвенные.

В данном исследовании объектом изучения стало Слюдянское лесничество Иркутской области. Для него был собран набор мультимодальных данных из 101 переменной: 9 каналов Sentinel-2, 13 вегетационных индексов, 4 топографических, 18 климатических, 54 почвенных и высота полога леса. Топографические данные извлечены из цифровой модели рельефа Copernicus DEM, это высота над уровнем моря, аспект, уклон и затенение. Климатические взяты из наборов данных WorldClim и Chelsa и включают основные (минимальная и максимальная температура, количество осадков) и дополнительные характеристики (биоклиматические – сезонность температуры и осадков; первый, последний день и длительность вегетационного периода, количество воды при таянии снега и т.д.). Почвенные данные из наборов SoilGrids содержат сведения о плотности почвы, содержанию азота, углерода, уровню pH для шести интервалов глубины.

Классификация проведена методом Random Forests, последовательно оценивалась производительность модели при использовании только спектральных данных Sentinel-2, при добавлении данных каждой модальности по-отдельности и для всего набора признаков.



Общая точность классификации полного набора из 101 переменной составила 78,8%, что на 29,21% больше, чем точность классификации только каналов Sentinel-2, которая равна 49,59%. Из данных других модальностей наибольший вклад внесли климатические и почвенные, повысившие точность до 67,38% и 69,86% соответственно. По отдельным породам деревьев климатические переменные больше всего повлияли на повышение точности сосны, пихты и лиственницы, а почвенные – кедра и сосны. В общем рейтинге признаков наиболее важными стали канал B11, высота полога леса, продолжительность вегетационного периода и количество дней со снежным покровом. Полученная классификация позволяет оценить размеры площадей деревьев разных пород, что важно для устойчивого управления лесами.

## **ГЕОСЕРВИС ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ХВОЙНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ПРОГНОЗА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

*Пушкин А.А.<sup>1</sup>, Коцан В.В.<sup>1</sup>, Ильючик М.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> РУП «Белгослес», Минск, Республика Беларусь

*E-mail: aa\_pushkin@belstu.by*

В настоящее время лесное хозяйство Республики Беларусь достаточно часто сталкивается с проблемами массовых повреждений лесных насаждений в результате воздействия на них неблагоприятных природно-климатических явлений и насекомых-вредителей. Так, только в 2024 г. в результате сильного ветра ветровальные повреждения лесных насаждений отмечены на площади порядка 33 тыс. га. земель лесного фонда.

С целью проведения оперативного мониторинга лесов, Белорусским государственным технологическим университетом совместно с лесоустроительным республиканским предприятием «Белгослес» и УП «Геоинформационные системы» разрабатывается специализированный информационный ресурс – геосервис «Состояние лесов» (<https://park.belgosles.by/4rmon>).

Целью создания геосервиса «Состояние лесов» является проведение обработки данных космической съемки и предоставление информационных продуктов для оперативного комплексного мониторинга состояния лесов, оценки поврежденных лесных насаждений, устойчивости к воздействию неблагоприятных природно-климатических факторов и прогноза пожарной опасности лесных территорий для обеспечения работников лесохозяйственной отрасли соответствующей оперативной информацией.

Геосервис обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- дистанционное детектирование и определение площадей следующих видов повреждений лесных насаждений: массовые усыхания; ветровальные и буреломные повреждения; повреждения лесными пожарами;
- прогноз пожарной опасности лесных территорий;
- проведение оценки устойчивости лесных насаждений к воздействию неблагоприятных природно-климатических факторов;
- формирование тематических продуктов по оценке поврежденных лесных насаждений, прогнозу пожарной опасности лесных территорий, устойчивости лесных насаждений к воздействию неблагоприятных природно-климатических факторов;
- публикацию формируемых тематических продуктов в сети Интернет.

Реализация функциональных задач дешифрирования поврежденных лесных насаждений и оценки их устойчивости к воздействию неблагоприятных природно-климатических факторов предусматривается для наиболее ценных и наиболее повреждаемых хвойных лесов (сосновая и еловая формация).

Территориально, разработка и внедрение геосервиса «Состояние лесов» ограничивается территорией лесохозяйственных учреждений Минской области (20 лесхозов) общей площадью земель лесного фонда порядка 1,5 млн. га.

Серверная часть геосервиса «Состояние лесов», основным назначением которой является актуализация данных, техническая поддержка и публикация тематических продуктов, эксплуатируется на технических средствах лесоустроительного республиканского предприятия «Белгослес». Пользователями клиентской части являются инженерно-технические работники лесхозов и лесничеств, а ее функционирование предполагает использование только Интернет-браузера с помощью которого выполняется просмотр тематических карт, атрибутивных данных подготовка и печать отчетной информации. Также предусматривается два режима функционирования информационного ресурса: для зарегистрированных и незарегистрированных пользователей. Зарегистрированные пользователи обладают дополнительными функциями поиска объектов, просмотра атрибутивных данных, формирования отчетных документов и подготовки картографических материалов к печати. Незарегистрированные пользователи имеют права просмотра картографических данных. При использовании мобильных средств всем пользователям доступны функции геолокации.

В качестве исходных данных при создании тематических карт в настоящее время используются данные космической съемки Sentinel и Landsat, а также специализированные

картографические слои и атрибутивные базы данных, формируемые при проведении базового лесоустройства. В качестве картографической подложки может быть использована базовая карта OpenStreetMap или данные BingAreal.

Разработка геосервиса «Состояние лесов» выполнена с использованием базового программного обеспечения и компонентов: геоинформационная система QGIS, СУБД PostgreSQL, расширение PostGIS для СУБД PostgreSQL, GeoServer и библиотека OpenLayers.

## **ДИСТАНЦИОННАЯ ТАКСАЦИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

*Савенков Д.А., Лябзин А.Л., Дементьев Г.Д., Калинин И.В.*  
ООО «Открытый лес», Архангельск, Россия

*E-mail: open.les@ya.ru*

В ходе научно- исследовательской работы в период с 2023 года по настоящее время коллективом сотрудников ООО «Открытый лес» было разработано и успешно апробировано программное обеспечение «Арборитм» для автоматической обработки данных воздушного лазерного сканирования и получения таксационных показателей.

Данные для обработки собираются с помощью беспилотного летательного аппарата мультироторного типа и полезной нагрузки в виде воздушного лазерного сканера. После формирования исходного облака точек, в автоматическом режиме, происходит обработка.

Технология состоит из сегментации облака на отдельные деревья, определения пород этих деревьев и вычисления геометрических параметров и объема древостоя каждого дерева.

Ключевые функции программного обеспечения:

- 1) Детектор деревьев с помощью метода водораздела на одноярусных насаждениях.
- 2) Классификатор породы на основе проекций деревьев. Это один из первых в мире классификатор с использованием такого способа с точностью на уровне зарубежных аналогов (Китай, Канада).
- 3) Алгоритм автоматического определения объема древесины на основе данных о высотах, породах и табличных значений, которые используются при традиционных методах таксации.

Основные тезисы выступления:

1. Алгоритм обработки данных воздушного лазерного сканирования. Этапы, способы реализации;

2. Целесообразность применения дистанционных методов оценки лесных насаждений для решения задач лесоустройства и таксации лесосек;
3. Результаты апробации программного обеспечения «Арборитм» на территории Архангельской области и СЗФО;
4. Возможности применения программного обеспечения «Арборитм» для оценки запасов углерода.

Проект реализуется при поддержке «Фонда содействия инновациям», Фонда «Сколково», Инновационного центра Архангельской области и Министерства Связи и Информационных технологий Архангельской области.

## **ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ЛЕСОВ**

*Сидоренков В.М.<sup>1</sup>, Капиталинин Д.Ю.<sup>2</sup>, Ачиколова Ю.С.<sup>1</sup>, Астапов Д.О.<sup>1</sup>, Рябцев О.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФБУ ВНИИЛМ, Пушкино, Московская область, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ Рослесинфорг, Москва, Россия

*E-mail: lesvn@yandex.ru*

Разработка методов анализа данных спутниковой съёмки для определения характеристик лесов в труднодоступных горных районах является важной частью новой концепции проведения лесоучётных работ в России. Технологии, описанные в тезисах, позволяют провести лесотаксационное дешифрирование горных лесов. Предлагаемые решения основаны на современных методах анализа информации с использованием систем машинного обучения. Предыдущие исследования показали, что методы анализа данных спутниковой съёмки для горных лесов отличаются от аналогичных методов, применяемых для равнинных лесов. Анализ данных спутниковой съёмки с помощью методов, описанных в тезисах, является новым направлением, для разработки которых требуются данные таксационно дешифровочных участков. Важным этапом в разработке методов является их тестирование с целью определения точности моделей и пригодности данных. Разработка технологии, описанной в тезисах проведена с использованием таксационных данных, полученных более чем по 200 пробным площадям.

В рамках исследовательской работы, проводимой в Южно-Сибирской горной зоне, были собраны экспериментальные данные о лесных массивах в Алтае-Саянском горно-таёжном, Алтае-Саянском горно-лесостепном и Байкальском горном лесных районах. Исследования проводились в соответствии с методикой, предложенной В.Н. Смагиным и его коллегами в работе (Смагин, 1980). В ходе исследования были изучены лесорастительные

области в горах Южной Сибири, которые включают в себя: Алтае-Саянскую горную область; Центральноазиатскую котловинно-горную область; Восточнотувинско-Южнозabayкальскую горную область; Прибайкальскую горную область.

В районе исследований значительное разнообразие климатических условий, которое определяется циркуляцией воздушных потоков, спецификой формирования высотно-поясных комплексов. Согласно районированию горных лесов В.Н. Смагина, в районе исследования выделяется четыре лесорастительные области, которые включают в себя 14 провинций и 29 округов. Рельеф и высотная зональность оказывают значительное влияние на природные условия и, как следствие, на растительность. Среди основных элементов рельефа, влияющих на лесную растительность, можно выделить высоту над уровнем моря, экспозицию и крутизну склона (Соколова, 2016). Разнообразие рельефа в горной местности приводит к значительным различиям природных комплексов. При этом высота границы леса зависит от широты расположения местности и особенностей рельефа.

Обобщение предыдущих исследований и анализ результатов экспериментальных работ позволяют создать математические модели роста леса с учётом особенностей рельефа. Их эффективность зависит от региональных факторов, влияющих на рост лесной растительности, таких как высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склона. Эти показатели можно получить из цифровых моделей рельефа, включая SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Farr et al., 2007, Rodriguez et al., 2005). Оптимальным вариантом для целей лесотаксационного дешифрирования является использование моделей рельефа, полученных по данным лидарной аэрофотосъёмки, поскольку это исключает искажения данных в области тени при радиолокационной съёмке. Данные рельефа не позволяют определить распространение растительности по высотной зональности. Решение этой задачи возможно с введением критерия, который бы характеризовал комплекс изменяющихся условий. На основе работ В.Н. Смагина и проведенных нами исследований таким критерием, комплексно учитывающим воздействие природных факторов, определена высота верхней границы леса. Для создания карты границы леса использовались данные со спутника Метеор-М, аппарата комплекса многозональной спутниковой съёмки (КМСС) с полосой захвата 900 км, разрешением 60 м. Анализ спутниковых данных позволил получить уравнение связи верхней границы леса с высотой над уровнем моря, экспозицией и крутизной склона, широтой и долготой. Математическая модель позволяет осуществлять прогноз высоты верхней границы леса для Южно-Сибирской горной зоны. Данный фактор в последующем учитывался для моделирования основных таксационных показателей при обработке спутниковых данных.

Верификация разработанной технологии осуществлялась на территории Тоджинского лесничества в Республике Тыва. По данным пробных площадей была создана база данных соотношения спектрально-отражательных характеристик насаждений, полученных по данным летней съемки с аппарата Sentinel-2 и их таксационных показателей. При последующей обработке базы данных осуществлялось моделирование показателей запаса, высоты, возраста насаждений с использованием множественной полиномиальной регрессия, в которую в том числе были введены факторы рельефа (склон, экспозиция, высота верхней границы леса), а также спектрально-отражательные каналы видимой и инфракрасной части спектра.

В ходе моделирования получены приемлемые результаты определения основных таксационных показателей лесных насаждений, соответствующие точности лесоустройства в пределах третьего разряда таксации.

## **СБОР И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ ПО СЕЗОННЫМ ДОРОГАМ ДЛЯ ЛЕСОТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ**

*Синицина А.Н.<sup>1</sup>, Подольская Е.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> РТУ МИРЭА, Москва, РФ

<sup>2</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, РФ

*E-mail: sinichka.ann.nik@yandex.ru*

Сезонное использование дорог – это использование тех или иных видов дорог в зависимости от сезона. Для характеристики сезонности в российской классификации автодорог существует ряд терминов: «зимник», также «автозимник», «зимняя автомобильная дорога», «летник», также «летняя автодорога». Автомобильная дорога зимняя (автозимник) является сезонной автомобильной дорогой, состоящей из конструктивных элементов, предназначенных для движения транспортных средств с покрытием проезжей части из льда, уплотненного снега и льда или проложенная по замерзшему льду рек и озер. Также с зимним сезонным использованием дорожной сети связаны следующие термины: ледовая переправа - искусственное дорожное сооружение, устраиваемое на автомобильной дороге общего пользования круглогодичного действия или сухопутном автозимнике, обеспечивающее переправу по ледяному покрову водных препятствий; ледовый автозимник - зимняя автомобильная дорога, устроенная по ледяному покрову рек, озер и морей.

Сезонные дороги играют ключевую роль в лесотранспортной логистике Сибирского федерального округа (СФО) России, в которой необходимо учитывать климатические

особенности и существующую дорожную инфраструктуру этого региона. Ключевой задачей зимнего сезона является логистика перемещений техники для заготовки леса, летом фокус сезонности смещается в сторону пожаротушения. Помимо лесного хозяйства и лесной промышленности, интерес к сезонным дорогам проявляют нефтегазовые компании, для которых данные по сезонности влияют на обеспечение техногенной безопасности, мониторинг, расчет рисков и стоимость проектов. В данной работе рассматриваются особенности сбора и систематизации данных о сезонных дорогах, что является важным подготовительным этапом для создания лесотранспортных моделей.

Для сбора данных о сезонных дорогах СФО использовались различные источники, включая открытые пространственные данные, такие как OpenStreetMap (OSM), а также данные от региональных организаций: ОГКУ «Томскавтодор», «Росавтодор», «Федеральная государственная информационная система контроля за формированием и использованием средств дорожных фондов», «КрУДДор», «Атлас Автомобильные дороги Кемеровской области – Кузбасса». Дополнительно были направлены запросы в администрации субъектов СФО, ответы на которые показали разный уровень наличия данных и заинтересованности адресатов. Большая часть полученных данных требует дополнительных проверки и обработки.

Одними из основных проблем при сборе данных о сезонных дорогах региона являются их фрагментарность (геометрия) и неполнота (атрибуты). Многие сезонные дороги не имеют официального статуса и не учитываются в федеральных или региональных базах данных. Это усложняет процесс их систематического многолетнего картографирования и анализа. Сбор данных о зимнем использовании дорог также включает информацию о наличии и времени функционирования ледовых переправ. Для сезонного использования дорожной сети характерно стихийное проложение, которое изменяется в зависимости от различных факторов (погода и другие). Так, например, проложение летника может меняться из-за переувлажнения почвы, а проложение зимника изменяется из-за степени промерзания болот.

В результате проведенной работы была создана пространственная модель дорог СФО, которая включает данные о постоянных и сезонных дорогах и их взаимосвязях с другими элементами инфраструктуры. Данные по дорогам собраны из открытых источников в 2023-2024 гг. Анализ данных модели показал, что зимние дороги имеют умеренный индекс корреляции с водотоками, что подтверждает их связь с промерзанием рек и созданием ледовых переправ, а также важность для логистики в зимний период. Данные по летним

дорогам имеют большую фрагментарность, чем по зимним. Модель дополняется актуальной информацией 2025 года.

Сбор и систематизация данных о сезонных дорогах являются важными этапами для создания актуальных и эффективных моделей лесотранспортного моделирования уровня федерального округа России, в частности, СФО. Для улучшения качества данных необходимо продолжать взаимодействие с региональными организациями и использовать современные методы геопространственного анализа.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОГО УЧАСТКА В ГОСУДАРСТВЕННОМ ПРИРОДНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ «КИВАЧ» (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ))**

*Смирнов Е.А.<sup>1</sup>, Ершов Д.В.<sup>2</sup>, Тихонов Д.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> МИИГАиК, Москва, Россия

<sup>2</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: smirnov.e.a@list.ru*

Современные методы дистанционного зондирования, включая воздушное лазерное сканирование (ВЛС), получили за последние годы значительную популярность в мире при изучении лесных экосистем. Автоматизированное извлечение ключевых таксационных характеристик деревьев (высота, диаметр ствола) из облаков точек, полученных с помощью данных ВЛС, позволяет проводить детальный анализ горизонтальной и вертикальной структуры древесного полога леса, оценивать фитомассу древесной растительности в пространстве и её динамику во времени.

В то же время точность выделения формы и положения отдельных деревьев по данным ВЛС остаётся значимой научной и прикладной задачей, одной из которых является изучение возможности установления связи и формирования серии моделей оценки диаметра стволов деревьев через их высоту и диаметры кроны (Усольцев, 2016).

Настоящее исследование направлено на анализ эффективности алгоритмов автоматического выделения деревьев, в частности алгоритма, предложенного Dalponte and Coomes (2016), с использованием цифровой модели кроны. Была реализована система



автоматического подбора параметров алгоритма с последующей оценкой точности результатов по сравнению с вручную размеченными границами крон деревьев.

Целью работы является исследование алгоритмов автоматизированного выделения отдельных деревьев по данным воздушного лазерного сканирования с использованием цифровой модели крон для оценки базовых таксационных характеристик сосны на примере тестового лесного участка, расположенного на территории «Государственного природного заповедника «Кивач» (Республика Карелия).

На результаты сегментации влияют сомкнутость древостоя, породная структура насаждений, сложность форм крон деревьев, период съемки исследуемой территории, а также особенности рельефа местности. Особенно сложным оказывается анализ и выделение границ крон в условиях сомкнутого полога смешанного хвойно-лиственного древостоя. На данном этапе исследований отработка метода выполняется в сосновых древостоях средней сомкнутости. Съемка территории тестового участка проводилась с помощью Геоскан-401/АГМ-МСЗ в начале июня 2023 года с плотностью точек 60 штук на м<sup>2</sup>.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработка технологии автоматического подбора оптимальных параметров алгоритмов выделения крон; разработка технологии оценки точности работы алгоритмов; оценка точности сегментации методом сравнения автоматического выделения деревьев с ручной разметкой.

Эксперименты проводились с использованием языков программирования R и Python. Основные этапы обработки данных выполнялись с применением библиотеки lidR (R), предназначенной для обработки облаков точек, и пакета PyCrown (Python), используемого для автоматизированного выделения деревьев. В рамках эксперимента проводилась работа с цифровыми моделями крон (ЦМК), построенными с различным пространственным разрешением (от 0.125 до 1.0 м). Дополнительно тестировались параметры сглаживания ЦМК (размер медианного фильтра) и внутренние параметры алгоритма сегментации, включая размер окна поиска локальных максимумов и масштабные коэффициенты, влияющие на чувствительность алгоритма к перепадам высот.

При использовании подобранных параметров на шести тестовых участках (529 деревьев) удалось достичь корректного детектирования 75 % деревьев относительно ручной разметки. Для наиболее удачной комбинации параметров метрики точности (Precision) и полноты (Recall) составили 0.93 и 0.79 соответственно. Качество выделения крон алгоритмом было оценено с помощью метрики IoU (Intersection over Union). При использовании лучшей комбинации параметров 70 % деревьев имеют  $\text{IoU} > 0.5$  и 50 % -  $\text{IoU} > 0.7$ .

Таким образом, разработанный подход может быть использован для оптимизации процесса подбора параметров алгоритмов сегментации крон деревьев при работе с данными ВЛС на различных участках. Кроме того, реализованный способ оценки точности позволяет сравнивать результаты сегментации и выбирать наиболее подходящие алгоритмы для автоматического выделения деревьев.

Работа выполнена за счет средств Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» (Соглашение №169-15-2023-004 от 1 марта 2023 г. между ЦЭПЛ РАН и Росгидромет) и в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН №124013000750-1.

## **МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ И СПУТНИКОВЫХ ПРОДУКТОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Сочилова Е.Н., Еришов Д.В., Королева Н.В.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: elena@ifi.rssi.ru*

Определения запаса стволовой древесины лесных пород по данным ДЗЗ имеет большое значение для оценки ресурсного потенциала и продуктивности лесов, их биологического разнообразия, экосистемных функций и услуг. Работа посвящена исследованию возможностей моделирования запасов сыrorастущей древесины методом восстановления регрессионных зависимостей между спектральными яркостями на зимних изображениях высокого пространственного разрешения Landsat-8 и таксационными характеристиками по данным лесоустройства на примере лесов Костромской области.

Методика исследований включает в себя несколько этапов:

- формирование по данным лесоустройства опорной выборки (эталонов) тестовых участков лесных пород с различными запасами стволовой древесины;
- определение средних значений спектрально-отражательных яркостей по зимним мозаикам (2017 – 2021 гг.) в красном канале для лесных пород на тестовых участках;
- восстановление и анализ регрессионных зависимостей значений спектральных яркостей в красном канале зимней мозаики и таксационных показателей;
- сравнение смоделированных запасов и данных по наземным обследованиям.

Обучающая выборка (эталонные) участков леса формируется для основных лесообразующих пород (осина, береза, сосна, ель) по данным актуальной таксации. В результате выбрано для осины 96 участков, средняя площадь участков составляет  $2,3 \pm 2,2$  га; для березы – 38 участков, средняя площадь  $7,3 \pm 7,7$  га; для сосны – 34 участка, средняя площадь  $4,1 \pm 4,7$  га; для ели – 41 участок, средняя площадь  $2,2 \pm 1,5$  га. Для количественной оценки запаса древесины лесных пород восстанавливаются регрессионные зависимости между значениями яркости в красном канале зимнего спутникового изображения Landsat-8 с запасом стволовой древесины различных пород на отобранных эталонных выделах. Вид зависимостей, описывающих эту связь, является экспоненциальным, показатель степени имеет отрицательные значения. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) экспоненциальной связи спектральных яркостей с запасами для эталонных участков составил для березы - 0,91, для осины и прочих мягколиственных пород - 0,85, для сосны - 0,78 и для ели - 0,82.

Оценка точности проведена по наземным обследованиям (Буйский район Костромской области, лето, 2024). Выбор участков для обследований проведен по сегментированному ДДЗ (Sentinel) с учетом разнообразия значений запасов. Средняя относительная ошибка определения общего запаса по 66 контрольным сегментам составила 23%.

В докладе будут продемонстрированы результаты определения запаса для основных лесообразующих пород Костромской области с оценкой точности модели на основе контрольных обследований.

Работа выполнена за счет средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

## **ПОЧЕМУ ПОГИБЛИ СОСНЫ В КРАСНОТУРАНСКОМ БОРУ: РАССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ**

*Суховольский В.Г.<sup>1</sup>, Ковалев А.В.<sup>2</sup>, Красноперова П.Е.<sup>3</sup>, Солдатов В.В.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>4</sup>Центр защиты леса Красноярского края, Красноярск, Россия

*E-mail: soukhovolsky@yandex.ru*

Вести мониторинг лесов на российских территориях площадью в миллионы квадратных километров крайне трудно, и достаточно часто возникают ситуации, когда между критическим событием в лесу и анализом его причин проходит достаточно длительное время,

вследствие чего оценку типа и интенсивности воздействия приходится вести, что называется, «по холодным следам». В этом случае возникают следующие основные вопросы: что было причиной воздействия, каковая была его интенсивность, как деревья реагировали на воздействие и продолжается ли эта реакция на момент начала анализа состояния поврежденных насаждений? Таким образом, существует необходимость разработки методики, с использованием которой можно получить ответы на все эти вопросы.

В настоящей работе в качестве модельной рассмотрена ситуация с повреждением сосновых насаждений в Краснотуранском бору (юг Красноярского края), когда анализ повреждений неясного происхождения у деревьев в насаждении был проведен спустя два года после фиксации воздействия.

В этой ситуации для оценки типа и интенсивности повреждений был использован комплекс методов, включавший спутниковые дистанционные измерения, анализ с помощью БПЛА и наземные измерения с использованием методов диэлектрической спектроскопии, анализа рядов радиального прироста деревьев в зоне повреждений до начала повреждения и визуальной оценки состояния деревьев на пробных площадях.

В ходе исследований были определены значения NDVI разных участков леса и по этим показателям оценены зона, момент начала и интенсивность повреждения деревьев. Было изучено пространственное распределение деревьев по уровню повреждений вдоль выделенной трансекты и показано, что уровень повреждения линейно падает с увеличением расстояния до опушки леса. Исходя из полученных результатов, было предположено, что причиной повреждений мог послужить химический ожог деревьев, полученный под воздействием гербицидов при обработке сельскохозяйственных угодий вблизи границы леса в целях уничтожения сорняков. Были изучены закономерности изменения текущего состояния деревьев после воздействий в зависимости от их состояния перед повреждением и состояния деревьев до начала воздействия на кроны. Для оценки текущего и ретроспективного состояний деревьев предложен комплекс показателей, включающий характеристики спектров первых разностей ширин годичных колец деревьев в зоне повреждения за 2 – 20 лет до даты повреждения, диэлектрические показатели тканей столов деревьев, функции отклика дистанционных характеристик насаждений. Показано, что при одинаковом визуальном состоянии деревьев до и после повреждения их реакция на воздействие значительно отличается и часть деревьев категории состояния 1 по визуальным признакам следует классифицировать как деревья с определенным уровнем ослабления в результате воздействия. Использование совокупности методов позволило оценить реакцию деревьев на воздействие в зависимости от их начального состояния перед воздействием.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ВСПЫШЕК ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ВИД СВЕРХУ**

*Суховольский В.Г.<sup>1</sup>, Ковалев А.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр КНИЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: soukhovolsky@yandex.ru*

Вспышки насекомых являются одним из наиболее серьезных факторов повреждения лесов. В достаточно большом числе публикаций оценивается динамика повреждения насаждений разными видами лесных вредителей по дистанционным данным изменения значения NDVI насаждения. Значительно меньше внимания уделяется анализу закономерностей формирования очагов вспышек и причинам их затухания. В настоящей работе на примере процесса развития очага вспышки сибирского шелкопряда в Ирбейском районе Красноярского края в 2019 – 2020 гг. сравниваются две гипотезы, объясняющие формирование очага повреждений.

Первую из гипотез будем называть «фантомной» гипотезой. Согласно этой гипотезе, еще до начала видимых повреждений насаждений вредителем происходят изменения состояния деревьев в будущем очаге, и после подъема численности популяции вредителя только зона, в пределах которой изменилось состояние деревьев, осваивается вредителем. Таким образом, процесс вспышки, согласно этой гипотезе, начинается с формирования «фантома» очага и, если есть возможность оценить границы этого «фантома», можно заранее предсказать масштабы вспышки.

Вторую из гипотез будет называть гипотезой «холодного пожара». Согласно этой гипотезе, потеря устойчивости деревьев в насаждении происходит на достаточно малой площади первичного очага и после накопления численности вредителей популяция способна преодолеть сопротивление деревьев вблизи границ первичного очага, что ведет к дальнейшему распространению вспышки.

Дистанционные данные по динамике NDVI при освоении насаждений в процессе развития очага вредителя не позволяют верифицировать эти гипотезы, так как наблюдаемая по изменению величины NDVI динамика освоения насаждений будет одной и той же при любом механизме формирования вспышки.

В настоящей работе для анализа дистанционных характеристик насаждений был сделан выбор в пользу спутников Terra/Aqua действующих в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System). В качестве показателя, характеризующего состояние насаждений, в настоящей работе предложено использовать показатель восприимчивости вегетационного индекса растительность (NDVI) в течение сезона к изменению радиационной температуры

территории (LST). Для анализа и работы со стационарными временными рядами дистанционных данных выполнялся переход от рядов немонотонных переменных NDVI и LST к рядам первых разностей  $\Delta NDVI(t) = NDVI(t) - NDVI(t-1)$  и  $\Delta LST(t) = LST(t) - LST(t-1)$ .

На связь  $\Delta NDVI$  и  $\Delta LST$  можно наложить естественное условие причинности: значение  $\Delta NDVI(t)$  в момент  $t$  будет зависеть только от значений  $\Delta LST(t-\tau)$  в прошлые моменты времени  $(t-\tau)$ . Тогда связи между этими показателями можно конкретизировать и ввести интегральное уравнение

$$\Delta NDVI(t) = \int_0^t h(\tau) \Delta LST(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

где  $h(\tau)$  – ядро уравнения (1) (функция отклика).

Функция  $h(\tau)$  характеризует связи между рассмотренными дистанционными характеристиками и запаздывание отклика выходной переменной на изменения входной переменной. Решая (1), можно для любого насаждения получить значение спектра  $H(f)$  функции отклика  $h(\tau)$ .

Анализ спектральных функций отклика при дистанционном зондировании очагов вспышки в Ирбейском районе Красноярского края показал, что за два-три года до появления видимых признаков повреждения насаждений по данным анализа NDVI наблюдаются отклонения параметров спектра функции отклика насаждений в будущем очаге сибирского шелкопряда от характеристик спектров функций отклика в контрольных насаждениях и формируется «фантом» зоны будущих повреждений деревьев. Однако анализ дистанционных данных показал, что часть поврежденных деревьев в очаге не находилась в пределах «фантома» очага и непосредственно перед повреждением характеристики спектра функции отклика были близки к таким характеристикам в контрольном неповрежденном насаждении. В связи с этим можно сделать два предположения: либо «фантомная» модель корректна, но предложенные показатели состояния деревьев не полностью характеризуют это состояние, либо в ходе развития очага вспышки реализуются сначала «фантомный» механизм, а затем механизм «холодного пожара». Тем не менее, и в этом случае по дистанционным данным о местоположении и площади «фантома» очага можно судить о возможных масштабах будущего критического явления в лесу.

Работа поддержана грантом РФФИ 23-66-10015.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АРХИПЕЛАГА ТУЛОЛАНСАРИ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ПАРК «ЛАДОЖСКИЕ ШХЕРЫ»)**

*Тарасенко В.В., Раевский Б.В.*

Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: victor.tarasenko.2208@mail.ru, borisraevsky@gmail.com*

Разработка цифровых векторных карт растительного покрова на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования (ДДЗ) имеет исключительное значение с точки зрения организации мониторинга природной и антропогенной динамики растительных сообществ. Современный этап в развитии технологий спутникового картографирования (с начала 2000-х гг.) характеризуется нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, а также использованием web-сервисов on-line предоставления информационных продуктов и инструментов их анализа. Одним из таких сервисов является платформа облачных вычислений Google Earth Engine (GEE).

Цель настоящего исследования заключалась в оценке современного состояния и выявления динамики растительного покрова исследуемой территории (ИТ), представленного в условных границах архипелага Тулолансари, как части территории Национального парка (НП) «Ладожские шхеры», путем обработки разновременных многозональных космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения в среде GEE.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка современной и ретроспективной пространственных моделей состояния наземного покрова исследуемой территории (ИТ) и оценка их достоверности.
2. Выявление природной и антропогенной динамики изменений растительного покрова ИТ с использованием нормализованного индекса гарей (normalized burnt ratio – NBR).
3. Оценка структурных изменений растительного покрова ИТ как итога протекания природных сукцессионных процессов в лесных и луговых экосистемах.

Все операции по поиску и обработке мультиспектральных ДДЗ осуществлялись в облачном геосервисе GEE. Оценка изменений в растительном покрове ИТ осуществлялась путем вычисления разностных величин нормализованного индекса гарей (NBR – Normalized Burnt Ratio) за последние 37 лет с использованием временной серии снимков спутниковой миссии Landsat-5, Landsat-8 и Sentinel-2. Анализ полученной информации показал, что в исследованный период сосняки, в первую очередь сосняки скальные, исследуемого

архипелага довольно активно горели. С большой вероятностью причина всех эпизодов катастрофической динамики связана с влиянием человека.

## **ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ДРЕВОСТОЕ ЗАРАСТАЮЩИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ ЧЕРЕПОВЕЦКОГО РАЙОНА ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Тихонов Д.Н., Белова Е.И., Еришов Д.В.*  
ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

*E-mail: dtikhonov66@gmail.com*

Применение современных дистанционных методов позволяет получать высокоточные пространственные данные о структуре и биомассе древостоев как на локальном, так и на региональном уровнях. Особый интерес представляют заброшенные пахотные земли, на которых происходит естественное лесовосстановление.

Для исследования были выбраны неиспользуемые сельскохозяйственные (с/х) земли Череповецкого района Вологодской области. Расчёт запаса углерода в надземной части древостоя проведён на трёх пространственных уровнях: в пределах таксационных площадок ( $400 \text{ м}^2$ ), расположенных на заросшем лесом поле площадью 91 га к северу от п. Шулма, на основе полевых данных; в пределах этого же поля на основе данных беспилотной аэрофотосъёмки (АФС) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС); в пределах заросших с/х земель Череповецкого района с древостоем того же возраста (~20-25 лет), что и на поле у п. Шулма.

Запас углерода в пределах таксационных площадок определялся на основе конверсионных коэффициентов и объёмного запаса древесины. Для расчёта запаса углерода в пределах всего исследуемого поля была обучена регрессионная модель методом Random Forest. В качестве обучающей выборки использовались средние запасы углерода в пределах площадок, в качестве признаков – набор из 26 спектральных, структурных и текстурных метрик, полученных по результатам АФС, плотного облака точек ВЛС и цифровой модели древесного полога, построенной на основе ВЛС. Коэффициент детерминации модели составил 0,81, а RMSE – 9,9 т/га. Суммарный рассчитанный запас углерода в древостое на поле составил 2690 т.

Для поиска заросших лесом пахотных земель были построены маски лесов на территорию Череповецкого района по двум пятилетним композитам Landsat на летние



периоды 2008-2012 и 2018-2022 гг. Композиты включали каналы видимого спектра, ближний инфракрасный и два средних инфракрасных, а также рассчитанные по ним спектральные индексы: NDVI, FCI, NDWI, SWVI. По спутниковым данным высокого разрешения (Google Earth) были набраны опорные данные для пяти групп наземных экосистем для периода 2018-2022 гг.: открытая почва и урбанизированные территории, лес и молодой лес на полях, луга и с/х культуры, болота, водные объекты. Для выделения лесной растительности был выбран метод линейного дискриминантного анализа (LDA). Модели для разделения лесной растительности от луговой и с/х культур были построены для двумерного пространства признаков FCI – SWVI, где наблюдалась максимальная делимость этих классов. При этом лесные классы в данном пространстве перепутывались с классами болот, открытой почвы и воды. Для выделения болот и открытой почвы были построены модели для пространства FCI – NDVI, а для выделения водных объектов – FCI – NDWI. Модели были обучены по опорным данным 2018-2022 гг. Точность модели (ассигасу) для разных классов составила: водные объекты – 0,991; открытая почва и урбанизированные территории – 0,996; болота – 0,999; лес – 0,888. При помощи данных моделей были классифицированы композитные изображения Landsat и получены маски леса. Исследуемое поле не относилось к лесу на композите первого периода и относилось к лесу на композите второго периода. Далее для более детального отбора всех лесов того же возраста на с/х землях была проведена классификация нелесных территорий на различные классы земель. Сначала путём исключения маски лесов за 2008-2012 гг. из общей территории района были выделены нелесные участки, затем из них исключались болота, населённые пункты и водные объекты на основе данных OpenStreetMap. В результате на исследуемой территории выделены четыре основных класса: зарастающие лесом с/х земли, действующие с/х земли (включая луга), застройка и болота. Классификация проводилась с использованием разносезонных композитов Sentinel-2 за 2019-2023 гг., а её общая точность (overall accuracy) составила 0,95. Суммарная площадь неиспользуемых с/х земель по результатам классификации на территории Череповецкого района составила 579 км<sup>2</sup>.

В пределах класса заросших лесом с/х земель строилась регрессионная модель расчета запаса углерода методом Random Forest, в качестве обучающей выборки – рассчитанный средний запас углерода по беспилотным данным в пределах ячеек пиксельной сетки Sentinel-2 размером 10 м, в качестве признаков – каналы разносезонных композитов Sentinel-2 за 2023 г. Коэффициент детерминации модели составил 0,78; RMSE – 9,5 т/га. Суммарный запас углерода на заросших с/х землях составил 1,577 млн т углерода. Средний запас углерода на них – 27,2 т/га.

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность использования дистанционных методов для оценки углеродных запасов на заброшенных с/х землях. Применение нескольких типов данных ДЗЗ и методов машинного обучения позволило получить точные оценки углеродного запаса на различных пространственных уровнях.

Исследования выполнены за счет средств научного проекта «Оценка и прогноз регионального баланса парниковых газов в атмосфере и пути повышения их секвестрации для снижения климатического следа деятельности ФосАгро в Вологодской области» (Договор №АПТ-58-0000 от 31 января 2022 г. между ЦЭПЛ РАН и АО «Апатит» по теме «Создание прототипа лесной карбоновой фермы в Вологодской области на землях сельскохозяйственного назначения») и в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН №124013000750-1.

#### **ДИНАМИКА ПОРОДНОГО СОСТАВА ЛЕСОВ КИЛЕМАРСКОГО УЧАСТКА НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖЕГОРОДСКОЕ ПОВОЛЖЬЕ» ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДЗЗ**

*Тихонова Е.В.<sup>1</sup>, Горнов А.В.<sup>1</sup>, Ершов Д.В.<sup>1</sup>, Белова Е.И.<sup>1</sup>, Тихонов Д.Н.<sup>1</sup>, Гаврилюк Е.А.<sup>1</sup>, Никитина А.Д.<sup>1</sup>, Наумкин А.А.<sup>1,2</sup>, Титовец А.В.<sup>3</sup>, Кольцов Д.Б.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> ВНИИ Экология, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт лесоведения, Успенское, Россия

<sup>4</sup> Ассоциация специалистов по охране окружающей среды "Голос земли", Москва, Россия

*E-mail: tikhonova.cepl@gmail.com*

На Килемарском участке национального парка «Нижегородское Поволжье» сохранились наиболее крупные в Нижегородской области фрагменты малонарушенных высоковозрастных пихтово-еловых липовых лесов с дубравными элементами (широкотравных раменей), являющихся зональным типом экосистем. Их общая площадь составляет около 10 тыс. га. Леса были обследованы Нижегородской геоботанической экспедицией (1925–1928 гг.) и в 1990-е годы А.И. Широковым, который сделал вывод о климаксовом характере пихтово-ельников липовых.

В рамках проекта ВИП ГЗ в 2023–2024 гг. были проведены исследования растительности на полигоне 2×2 км, в результате которых показано, что в настоящее время на территории преобладают старовозрастные липовые с елью и единичной примесью пихты леса, а также послерубочные осинового и осиново-березовые леса возрастом 50–80 лет.

Целью исследования была оценка изменения доли хвойных пород в целом для полигона и для групп типов лесных сообществ за период 1985–2024 гг. Поскольку материалы

лесоустройства не отражают актуальное состояние растительности, то для анализа динамики породного состава были привлечены дистанционные данные.

Для выделения крон деревьев по данным беспилотной аэрофотосъемки (июнь и октябрь 2023 г.) летний цифровой ортофотоплан был сегментирован с использованием нейросети Mask R-CNN. Далее была проведена классификация крон по породному составу. Точность классификации оценена путем сопоставления сегментированных крон с определенными в поле тестовыми деревьями и составила 74,1% для лиственных пород и 76,1% для хвойных.

На следующем шаге для создания обучающей выборки были рассчитаны доли площадей хвойных крон (относительно суммарной площади крон) в ячейках 60×60 м, совпадающих с границами пикселей снимков Landsat. Максимальная доля хвойных в ячейках в пределах территории беспилотной съемки составила 0,57, поэтому было решено использовать мультиспектральное спутниковое изображение Jilin-1 за 23.05.2022, покрывающее помимо полигона 1-километровую буферную зону, в пределах которой были участки с большими долями хвойных в древостое. По результатам кластерного анализа снимка Jilin методом K-means рассчитывалась зональная статистика в пределах сегментов крон хвойных деревьев. Наилучшие результаты показала кластеризация на 20 классов. По ее результатам была построена маска хвойных деревьев, на основе которой была рассчитана доля хвойных в ячейках 60×60 м.

Для оценки распределения доли хвойных на временном ряду Landsat были собраны композитные изображения за 5-летние интервалы с 1985 по 2024 г. Каждый 5-летний интервал состоял из трех сезонов: вторая половина весны, лето и первая половина осени. Композиты включали в себя 6 спектральных каналов: синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный и два средних инфракрасных. По ним был построен ряд регрессионных моделей методами Random Forest, Gradient Boosting и AdaBoost. Модели обучали по композитам, построенным за 2020–2024 гг. Целевым признаком являлись значения доли хвойных в ячейках 60×60 м. Наилучший результат по оценке точности модели показал Random Forest:  $RMSE = 0,10$ ,  $R^2 = 0,88$ . Оптимальным набором предикторов являлись композиты, состоящие из красного, ближнего инфракрасного и средних инфракрасных каналов. Данная модель была применена ко всем 5-летним периодам, в результате чего были получены карты с долей хвойных пород.

На основе плана лесных насаждений 2008 г. были выбраны выделы, относящиеся к четырем группам сообществ: 1) березово-осиново-еловые возрастом >100 лет; 2) липовые с елью возрастом >100 лет; 3) осинового возрастом 70–80 лет послерубочные; 4) осиново-

березовые возрастом 50 лет послерубочные. Для полигона в целом и для четырех групп сообществ была рассчитана зональная статистика (медианное значение доли хвойных) по полученным картам долей хвойных пород на семь 5-летних периодов.

Доля хвойных в пределах полигона с 1987 по 2017 г. уменьшилась с 32,2 до 17,4%, а после выросла до 21,7%. Доля хвойных в березово-осиново-еловых лесах выросла с 38,8 до 62,5%. Доля хвойных в липовых с елью лесах уменьшилась с 36,0 до 21,3%. Доля хвойных в послерубочных осинниках 70–80 лет выросла с 5,0 до 13,3%. Доля хвойных в осиново-березовых послерубочных лесах 50 лет минимальна среди всех групп, она колебалась в пределах от 3,3 до 10,1%.

Благодарим всех коллег, принимавших участие в таксационных и геоботанических работах и в проведении беспилотной аэрофотосъемки. Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИСУТСТВИЯ ОСИНЫ В ТАЁЖНЫХ ЛЕСАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ SENTINEL-2 И АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Трошин Д.С.<sup>1</sup>, Файзулин М.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

<sup>2</sup> Высшая школа экономики, Москва, Россия

E-mail: troshin1515@mail.ru

Устойчивое управление лесами и сохранение биоразнообразия имеют фундаментальное значение для поддержания ключевых древесных пород, таких как *Populus tremula* L. в умеренных широтах Северного полушария. Осина, благодаря быстрому росту, относительно ценной древесине и устойчивости к засухе и бедным почвенным условиям, широко используется в лесном хозяйстве многих стран. Более того, особи *Populus tremula* имеют важное значение для сохранения биоразнообразия бореальных лесов.

В данном исследовании разработана методика определения вероятности присутствия осины в таёжных лесах с использованием данных спутниковой съемки Sentinel-2 и методов машинного обучения. Для анализа использовались снимки уровней L2A и L1C с территории Вологодской области, полученные через облачное API Sentinel Hub за 2020 год. Бинарная

классификация территорий (0 – территории без осины; 1 – территории с осиной) проводилась на основе полевых опорных данных из материалов лесоустройства, предоставленных Департаментом лесного хозяйства Вологодской области. В основе методики лежит новый подход к обработке данных дистанционного зондирования. Каждое мультиспектральное изображение раскладывалось на матрицы  $m \times n$ , где  $m$  – количество элементов цветовой модели RGB,  $n$  – количество пикселей в одном изображении. Для получения табличного формата данных каждый признак представлялся как среднее значение в градациях серого по формуле:

$$Z_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_i + G_i + B_i}{3},$$

где  $Z_j$  – значение  $j$ -го признака,  $i$  – номер пикселя,  $n$  – количество пикселей в изображении. Всего использовалось 19 признаков в виде каналов, композитов и индексов для каждого изображения территории, формируя матрицу  $h \times k$  ( $h$  – количество признаков,  $k$  – количество изображений).

Для отбора значимых признаков применялась бинарная регрессия наименьших квадратов. Финальная классификация реализована с использованием трех моделей машинного обучения: Random Forest (RF), Linear SVC и XGBoost. Применялась стратифицированная выборка с разделением данных на обучающую (80%) и тестовую (20%) части, а также 5-кратная кросс-валидация для предотвращения переобучения. Для оценки важности признаков использовались методы SHAP и Permutation Importance (PI). SHAP-показатель рассчитывался по формуле:

$$\varphi_i(p) = \sum_{S \subseteq N/i} \frac{|S|! (n - |S| - 1)!}{n!} (p(S \cup i) - p(S))$$

где  $i$  – входной параметр,  $n$  – общее количество параметров,  $p$  – предсказанное значение модели,  $N$  – вектор входных параметров,  $S$  – подмножество входных параметров.

Качество моделей оценивалось с помощью метрик Precision, Recall и Accuracy. Исследование показало высокую эффективность разработанной методики, достигнув общей точности классификации 95,03%. Наибольший вклад в точность классификации внесли индексы Agriculture и SAVI, демонстрируя различную сезонную динамику. Agriculture показывает положительную связь с присутствием осины в зимний, весенний и осенний периоды, но отрицательную в летний период. SAVI демонстрирует противоположную картину. Вероятно, в периоды отсутствия листвы архитектура ветвей и характерная текстура осины становятся более выраженными в SWIR-диапазоне (на что реагирует индекс Agriculture), в то время как летом густой лиственной полог формирует иную спектральную

сигнатуру, что также отражается на показателях SAVI, который лучше улавливает высокую фотосинтетическую активность осины среди хвойных пород.

В летний период наблюдается повышенная значимость индексов EVI и NDVI. В средней и южной тайге, где осина сосуществует с хвойными породами, более высокие значения EVI могут указывать на сложную структуру растительности и высокую биомассу хвойных пород. При этом осина с её относительно редкой кроной демонстрирует более низкие значения EVI.

Предложенная методика открывает новые возможности для эффективного мониторинга этой древесной породы в бореальных экосистемах. Результаты исследования могут быть использованы для разработки стратегий устойчивого лесопользования и сохранения биоразнообразия. Дальнейшие исследования должны быть направлены на учет межгодовой изменчивости фенологических паттернов, применение методов глубокого обучения и включение дополнительных экологических переменных для повышения точности прогнозирования.

## **ОЦЕНКА ЭСТЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАНДШАФТОВ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА**

*Черткова Е.П.<sup>1</sup>, Суховольский В.Г.<sup>2</sup>, Ковалев А.И.<sup>3</sup>, Тарасова О.В.<sup>4</sup>, Замолотчиков Д.Г.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: tchertckova.elena@yandex.ru*

Эстетическая ценность природных ландшафтов представляет собой одну из ключевых экологических услуг, предоставляемых лесными экосистемами. Хотя важность этой услуги общепризнана среди исследователей, её количественное измерение остаётся сложной задачей. В последние годы были предприняты усилия по оценке качества эстетических услуг в зависимости от типа лесных экосистем. Однако такие подходы поднимают важные вопросы относительно того, насколько однородны эстетические свойства различных насаждений в рамках одной и той же лесной экосистемы.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения математического подхода для оценки эстетики ландшафтов Алтайского государственного природного заповедника (АГПЗ). Ранее подобный метод был предложен для оценки эстетических характеристик живописи (Суховольский и др., 2022) и, используя изображение

картин признанных мастеров живописи, было показано, что эстетические характеристики картины можно связать с характеристиками ранговых распределений долей пикселей разного цвета и яркости на картине.

При анализе качества природных ландшафтов АГПЗ посредством анкетирования выявлено, что среди излюбленных мест АГПЗ для отдыхающих особое внимание привлекают такие живописные ландшафты, как: водопад Корбу; Телецкое озеро; водоскат Учар; подводная экотропа; рододендрон даурский (маральник); купальница азиатская (огоньки); звездное небо; озеро Джулукуль; бассейн реки Богояш. Фотоснимки, сделанные посетителями АГПЗ можно использовать для оценки эстетической полезности ландшафтов заповедника.

Для оценки было представлено 128 фотографий из 8 разных местообитаний. С использованием специальной оригинальной компьютерной программы были выполнены расчеты ранговых распределений изображений и получены распределение пикселей изображения в фотографиях по цвету и яркости. Проведены расчеты для всех фотографий по корректности моделей рангового распределения фотографий по величинам цветности и яркости (по коэффициенту детерминации  $R^2$ ). Большинство значений коэффициента детерминации по яркости превышает 0.90, а для цветности – 0.86, то есть для большинства фотографий выполняется правило близости коэффициента детерминации к 1. Очень небольшую долю фотографий можно рассматривать как фотографии с низкими эстетическими характеристиками. Для параметров функций рангового распределения яркости и цветности фотографий было выбрано значение моды  $b_m$ , которое можно принять за оптимум параметра  $b$  рангового распределения. Далее производился пересчет характеристик  $R^2$  и  $b$  фотографий по цветности и яркости в нормированные характеристики  $nb$  и  $nR^2$  рангового распределения, и по этим нормированным показателям фотографии классифицировались на четыре группы: самые лучшие по эстетическим характеристикам фотографии; средние по характеристикам фотографии; специфичные фотографии (скорее плохие); наконец, фотографии с низкими эстетическими характеристиками. Наилучшим по показателям ранговых распределений будут фотографии с параметрами  $nb$  и  $nR^2$ , близкими к 0, а наихудшими – с самыми большими значениям этих параметров. Предлагаемый подход позволил автоматически и не экспертным путем выделить фотографии с наилучшими по своим эстетическим свойствам из группы «Водоскат Учар» и наихудшими характеристиками цветности и яркости из групп «Ночное небо» и «Подводный мир».

Используя метод линейного дискриминантного анализа, была проведена оценка качества классификации фотографий по группам. Классификационная матрица имеет

практически диагональный вид, что говорит о высоком качестве разделения по предложенным показателям.

Таким образом, по использованным характеристикам можно выделить пять ландшафтных объектов (Водопад Корбу, маральник, цветы огоньки, Водоскат Учар, Богояш и Джулукуль) с наилучшими пейзажами. Пейзажи Телецкого озера близки к средним значениям пейзажей для всего заповедника. Пейзажи «Подводный мир» и «Ночное небо» характеризуются очень низкими значениями качества цветности и яркости.

Авторы благодарят фотографов, предоставивших свои фотографии пейзажей Алтайского заповедника для цифрового анализа. Без их усилий все размышления авторов остались бы только теорией.

## **КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВБЛИЗИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЛАНДШАФТОВ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДЗЗ И ЦМР**

*Шилов В.А.*

ГБОУ ВО ЯГТУ, г. Ярославль, Россия

*E-mail: shilovva@ystu.ru*

В последние десятилетия изменения климатических условий и антропогенное воздействие привели к значительным трансформациям лесных экосистем в прибрежных зонах, особенно в регионах, прилегающих к крупным водохранилищам. Леса в районе Углича подвержены как естественным изменениям (эрозия берегов, изменение гидрологического режима), так и антропогенным факторам (регулирование уровня воды в каскаде Верхневолжских ГЭС, интенсивное рекреационное использование территорий). Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют анализировать динамику изменений растительного покрова в пространственно-временном аспекте, выявлять зоны деградации лесных массивов и прогнозировать возможные риски.

Цель исследования – анализ динамики изменений прибрежных лесных экосистем в районе Углича с применением методов обработки данных дистанционного зондирования Земли для оценки состояния растительного покрова и выявления зон повышенной экологической уязвимости.

Использование ГИС-систем способствует качественному выполнению работы по обработке ДЗЗ и дешифрированию космических снимков, особенно в части определения трансформации и негативных процессов экосистемах с преобладающими процессами деградации древесно-кустарниковой растительности. Так, в данной работе в результате



моделирования сценария NDVI (нормализованный вегетационный индекс) для космического снимка Landsat\_8 от 28.06.2024 в программном комплексе QGIS 3.14 Desktop средние значения индекса в Угличском муниципальном районе для лесных массивов попали в диапазон 0,2-0,5, что соответствует удовлетворительному состоянию лесных экосистем с преобладанием разряженной растительности. Однако выявлены участки с пониженными значениями NDVI (0,1-0,2), занимающие около 6% площади исследований, которые преимущественно расположены либо в прибрежной зоне р. Волга, либо около урбанизированной застройки. Наиболее уязвимыми к разрушительным процессам являются: пойменные леса с NDVI 0,5-0,6; участки с абсолютными отметками высот ниже 110 м; территории в радиусе 5 км от гидроузла.

Особое внимание следует уделить лесному массиву в районе населенных пунктов Спирково и Кабаново Угличского муниципального района Ярославской области, где определены высокие значения NDVI ( $\geq 0,51$ ), что в сочетании с геоморфологическими особенностями территории, выявленных в результате анализа ЦМР Copernicus Global DSM 30 – высотные отметки в близкие к отметкам водной глади (100 м по балтийской системе высот), возникает повышенный риск потери (до 17%) древостоя при возникновении аварийного сценария. Таким образом, проведенное исследование демонстрирует эффективность комплексного подхода, сочетающего методы ДЗЗ и гидрологического моделирования для оценки состояния и устойчивости лесных экосистем.

## **ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ УСУХАНИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ SENTINEL-2**

*Шилоносов Л.А., Иванчина Л.А., Шихов А.Н.*

ПГНИУ, Пермь, Россия

*E-mail: lonya.sh@mail.ru*

В России и мире в последние десятилетия на фоне изменения климата леса теряют устойчивость к воздействию вредителей и болезней, и связанные с ними потери увеличиваются крайне интенсивно. В последние годы актуальной проблемой лесного хозяйства России стало распространение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford). Так, в лесах Пермского края к 2024 г. усыхание пихтарников зафиксировано в 13 лесничествах края и в городских лесах Перми. Наиболее эффективные методы мониторинга повреждений лесного покрова, вызванного вредителями и болезнями - съемка с беспилотных

летательных аппаратов и со спутников с использованием аппаратуры, способной снимать в спектральном диапазоне от 450 нм до 1500 нм, что позволяет рассчитывать такие информативные вегетационные индексы (ВИ), как NDVI, NDMI, LWI и т.д.

В исследовании оценивались полевые данные с 51 пробной площади, собранные за летний период 2024 года на территории трех лесничеств Пермского края. На пробных площадях средняя доля темнохвойных пород в составе составила 81% (пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.)), средний возраст древостоев – 92 года (спелые насаждения). Преобладают среднеполнотные древостои (среднее значение полноты – 0,5). Доля живых темнохвойных пород деревьев в насаждениях в среднем выше, чем доля погибших (64,7% и 26,8% соответственно). Доля ветровалов и буреломов на ПП в среднем составила 8,5%.

Спектральные характеристики исследуемых участков оценивались по спутниковым снимкам Sentinel-2 сенсора MSI (за 01.06.2024 и 06.07.2024 г.). По снимкам был выполнен расчет 28 различных вегетационных индексов с последующим определением средних значений в пределах ПП и также расчет средних значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в спектральных каналах MSI с пространственным разрешением 10 и 20 м (всего 10 каналов). На следующем этапе выполнен расчет коэффициентов корреляции (R) – линейный R Спирмена и ранговый R Пирсона между характеристиками состояния насаждений на ПП (долей живых, погибших, ветровальных и буреломных деревьев) и значениями рассчитанных ВИ, а также КСЯ в отдельных каналах снимков.

Основным результатом проведенного исследования можно считать то, что ВИ, рассчитанные по спутниковым снимкам Sentinel-2 за июнь и июль 2024 г., объясняют меньше половины различий по показателям санитарного состояния между пробными площадями. Выявлен ряд статистически значимых корреляций между ВИ (или КСЯ в отдельных каналах) и показателями санитарного состояния насаждений. По снимку за 06.07.2024 выявлено больше значимых корреляций, чем за 01.06.2024 г. Однако из них устойчивой во времени является только зависимость между индексами водного стресса LWI и NDMI и долей живых деревьев на участке. Она подтверждается ранее опубликованными работами на основе данных Landsat (Крылов, Владимирова, 2011; Крылов и др., 2012). Остальные корреляции хотя и статистически значимы по снимку за июль, но не подтверждаются по второму снимку. На основе ВИ не представляется возможным однозначно отделить усыхание, вызванное вредителями, от других типов повреждений лесов без использования дополнительных данных. Аналогичные выводы приведены и в работе (Крылов и др., 2012).

Индексы, которые имеют значимые корреляции с показателями санитарного состояния древостоя, сильно коррелированы друг с другом (для некоторых пар индексов значение  $R$  превышает 0,9). Это препятствует построению адекватной модели множественной регрессии на основе ВИ для оценки показателей санитарного состояния. Значения ВИ на исследуемых участках примерно в равной степени определяются как долей живых или погибших деревьев, так и прочими таксационными показателями, прежде всего долей темнохвойных пород, полнотой насаждения, долей бурелома и ветровала. Для уточнения зависимостей между ВИ и показателями санитарного состояния древостоев, выборка пробных площадей должна включать более однородные насаждения по таксационным показателям.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>



IX ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)  
КОНФЕРЕНЦИЯ

«АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЛЕСОВЕДЕНИИ, ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ  
И ЭКОЛОГИИ»

15-17 АПРЕЛЯ 2025 ГОДА  
ЦЭПЛ РАН, МОСКВА, РОССИЯ