

На правах рукописи

Никитина Алена Дмитриевна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В СОСНОВЫХ
ДРЕВОСТОЯХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОЙ СЪЁМКИ**

Специальность 1.5.15 – Экология (биологические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва
2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН).

Научный руководитель: **Князева Светлана Владимировна**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН

Официальные оппоненты: **Москалюк Татьяна Александровна**, доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории дендрологии филиала «Горнотаежная станция им. В.Л. Комарова», ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук

Фролов Павел Владимирович, кандидат биологических наук, научный сотрудник Лаборатории моделирования экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Пушкинского научного центра биологических исследований РАН

Ведущая организация: Федеральное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (г. Пушкино МО)

Защита диссертации состоится 24 сентября 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.109.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН по адресу: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33. Тел./факс: +7(495)952-35-84, e-mail: admin@sevin.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Отделения биологических наук Российской академии наук по адресу: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33; на сайте ФГБУН ИПЭЭ РАН по адресу: www.sev-in.ru и на сайте Высшей аттестационной комиссии по адресу vak.minobrnauki.gov.ru

Автореферат разослан «...» ... 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.б.н.

Кацман Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В контексте глобальных климатических изменений одной из важных задач лесной экологии является оценка варьирования бюджета углерода в лесах, играющих ключевую роль в секвестрации углекислого газа. Однако в настоящее время оценки бюджета углерода в лесах России варьируют в широких пределах и могут отличаться в несколько раз (Замолотчиков и др., 2007; Dolman et al., 2012; Швиденко и др., 2014; Sitch et al., 2015; Filipchuk et al., 2018). К причинам неопределённостей в оценках относятся различия в методологиях сбора и анализа данных, неоднородность и сложная доступность лесных территорий, ограниченные возможности постоянного мониторинга обширных и отдаленных лесных массивов. В рамках разрабатываемой национальной системы мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов особое внимание уделяется повышению точности оценок углеродного бюджета наземных экосистем, в частности лесных сообществ. Использование высокодетальной съёмки значительно повышает качество данных, позволяя проводить точный и глубокий анализ структуры древостоев, их биометрических характеристик, важных для оценки пулов углерода, и способствует переходу от точечных наземных измерений к непрерывным пространственным оценкам. Применение данных беспилотных летательных аппаратов, или БПЛА, обеспечивает получение детальной информации на уровне отдельных деревьев, что увеличивает точность оценок и эффективность анализа углеродных пулов с высокой пространственной и временной детализацией. Однако, для оптимизации обработки данных БПЛА-съёмки, необходимо разрабатывать и совершенствовать методы, которые позволяют автоматически выделять отдельные кроны деревьев.

Сосновые леса, благодаря своему широкому географическому распространению, вносят значительный вклад в углеродный баланс. Леса с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) представляют собой ключевые экосистемы в умеренных широтах Северного полушария. Особенности вида является адаптивность к разнообразным условиям произрастания и высокая устойчивость к экологическим стрессам, таким как засухи и пожары. Высокая экологическая валентность и значительный вклад в углеродный цикл определяют важность изучения характеристик сосновых лесов в экологических исследованиях.

Диссертационное исследование сосредоточено на изучении варибельности характеристик сосновых древостоев дренированных местообитаний подзоны хвойно-широколиственных лесов в западной части Русской равнины и применении данных высокодетальной съёмки, а также методов машинного обучения и нейронных сетей, для оценки ключевых характеристик древостоев, непосредственно связанных с аккумуляцией углерода в лесных экосистемах.

Цель исследования – определить запасы углерода в стволовой древесине на основе оценки структурных и биометрических характеристик сосновых древостоев хвойно-широколиственных лесов дренированных местообитаний на западе Русской равнины с применением усовершенствованных методов обработки данных высокдетальной съёмки.

Задачи исследования:

1. Выявить различия в структурных и биометрических характеристиках сосновых древостоев для оценки вариабельности запасов углерода в стволовой древесине – основном пуле углерода в древостоях – со стратификацией по возрастным группам и географическим условиям с использованием данных наземных измерений.

2. Оптимизировать метод автоматической сегментации крон деревьев с использованием данных аэрофотосъёмки БПЛА для извлечения морфометрических параметров сосновых древостоев.

3. Оценить эффективность использования в регрессионном анализе морфометрических параметров, извлеченных на основе БПЛА-съёмки, и спутниковой съёмки VHR, для определения запасов углерода стволовой древесины и структурно-биометрических характеристик сосновых древостоев.

Научная новизна.

1. Показано, что запасы углерода в стволовой древесине молодых (до 40 лет) и средневозрастных (40-80 лет) древостоев сосновых лесов различного происхождения, формирующихся в различных природно-климатических условиях, сопоставимы, тогда как в старовозрастных лесах (старше 80 лет) различия в запасах углерода становятся выраженными.

2. Разработан подход к автоматической сегментации крон деревьев по RGB-ортофотопланам БПЛА-съёмки с использованием нейронной сети архитектуры Mask R-CNN, адаптированный для сосновых древостоев подзоны хвойно-широколиственных лесов.

3. Обоснована эффективность использования морфометрических параметров, извлеченных с использованием автоматической сегментации данных аэрофотосъёмки БПЛА, в качестве предикторов для оценки запасов углерода и ключевых биометрических и структурных характеристик сосновых древостоев.

Теоретическая и практическая значимость работы. Значимость исследования обусловлена адаптацией и совершенствованием методик дистанционного зондирования для изучения сосновых лесов хвойно-широколиственной подзоны западной части Русской равнины. Результаты работы можно использовать в задачах определения характеристик сосновых древостоев на больших территориях, а также в качестве информационной основы для оценки запасов углерода, структурных и биометрических характеристик древостоев, в практике устойчивого управления лесными ресурсами и экологического мониторинга лесных экосистем. Результаты

работы являются основой для разработки самостоятельного модуля автоматической сегментации крон деревьев по аэрофотосъёмке БПЛА в открытом программном обеспечении для использования в других исследовательских и прикладных проектах.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе при наземных обследованиях на пробных площадях (ПП) применены общепринятые способы глазомерной и измерительно-перечислительной таксации для определения характеристик древостоев, сделаны геоботанические описания, определено проективное покрытие видов, зафиксированы географические координаты ПП. Выполнена аэрофотосъёмка с использованием дронов DJI и последующая обработка данных с целью получения цифровых моделей местности (ЦММ) и ортофотопланов. Проведены визуальное дешифрирование и автоматическая сегментация крон деревьев с использованием нейронной сети архитектуры Mask R-CNN, по полученным данным рассчитаны морфометрические параметры древостоев. Применены методы статистического анализа (коэффициент корреляции Спирмена, критерий Краскелла-Уоллиса, критерий Манна-Уитни) для оценки и сравнения характеристик сосновых лесов. Регрессионный анализ для оценки характеристик сосновых лесов на основе данных БПЛА-съёмки проведён с использованием методов множественной линейной регрессии (MLR), метода опорных векторов (SVM), моделей многослойного персептрона (MLP).

Положения, выносимые на защиту:

1. Запасы углерода в стволовой древесине сосновых древостоев подзоны хвойно-широколиственных лесов на локальном уровне характеризуются широкой индивидуальной изменчивостью: в молодых лесах (10-40 лет) в пределах от 4 до 97 т С га⁻¹, в средневозрастных (40-80 лет) — от 66 до 129 т С га⁻¹, в старовозрастных (от 80 лет) — от 100 до 246 т С га⁻¹.

2. Усовершенствованный метод автоматической сегментации с применением нейронной сети Mask R-CNN обеспечивает надёжные результаты распознавания крон деревьев в сосновых лесах по RGB-ортофотопланам, полученным в результате БПЛА-съёмки.

3. Применение в регрессионном анализе данных автоматической сегментации обеспечивает получение устойчивых оценок биометрических и структурных характеристик, а также запасов углерода стволовой древесины сосновых лесов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены и обсуждены на семинарах ЦЭПЛ РАН (Москва, 2018–2024), международной научно-практической конференции «Геоматика: образование, теория и практика» (Минск, 2019), Всероссийской конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (Москва, 2019), Всероссийской конференции «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2019, 2020), международных чтений памяти Г.Ф. Морозова «Актуальные проблемы современного лесоводства» (Симферополь, 2020), конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2020), XVII Большом географическом фестивале (Санкт-Петербург, 2021), научной конференции «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2022).

Личный вклад автора. Полевые исследования, обработка полученного материала, статистический анализ, разработка программного кода и обобщение полученных результатов осуществлены соискателем лично или при непосредственном участии.

Связь с научными программами и плановыми научными исследованиями. Работа выполнена в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (НИОКТР 124013000750-1) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-34-90152) на базе лаборатории мониторинга лесных экосистем и молодежной лаборатории климаторегулирующих функций и биоразнообразия лесов (122111500023-6) ЦЭПЛ РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 публикации в изданиях, включённых в Перечень ВАК и систему цитирования Scopus, 10 тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях, 1 глава в монографии.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 260 источников (в т.ч. 161 иностранной работы) и списка основных сокращений. Диссертация изложена на 204 страницах, содержит 13 таблиц и 57 рисунков, 7 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Князевой С.В. – за руководство исследованиями, советы и помощь на всех этапах работы; сотрудникам ЦЭПЛ РАН за внимание и помощь научного, технического и организационного характера. Особую благодарность автор выражает Горнову А.В. и Тихоновой Е.В. за помощь в сборе и анализе геоботанических и лесотаксационных материалов, Ершову Д.В. и Гаврилюку Е.А. за совместную работу в области обработки дистанционных данных, Браславской Т.Ю. за ценные предложения по улучшению работы, Лукиной Н.В. за рекомендации по развитию исследования. Автор выражает благодарность Гайбуллаеву А.З. за консультирование в технических аспектах работы, а также сотрудникам ГПБЗ «Брянский лес», НП «Смоленское Поозерье», НП «Куршская коса» за помощь на полевых этапах работ.

ГЛАВА 1. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

Исследования растительности в регионах западной части Русской равнины выявили разнообразие типов лесов с преобладанием *Pinus sylvestris* L. и их адаптацию к различным экологическим условиям (Березина и др., 2003; Губарева, 2009; Немирова, Мартынов, 2010; Евстигнеев, Коротков, 2013; Аккумуляция..., 2018; Тихонова, 2021). Работы по дистанционному исследованию этих территорий сосредоточены на изучении видового разнообразия и динамики растительного покрова, используя спутниковые данные с пространственным разрешением 10 м и ниже (Гаврилюк и др., 2018; Королева и др., 2018; Никитина и др., 2019; Ершов и др., 2020). Однако ограничения детализации данных и трудности при валидации подчёркивают необходимость в более точной информации для оценки характеристик лесов. Интеграция данных ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения является актуальной задачей в исследовании сосновых лесов хвойно-широколиственной подзоны для улучшения понимания структуры и состава этих лесных сообществ и более точной оценки структурных и биометрических характеристик, необходимых для расчёта запасов углерода.

Данные спутниковой съёмки VHR активно используются в исследованиях, направленных на выделение отдельных деревьев и оценку характеристик лесов, включая видовой состав и мониторинг их состояния (Vanderhoof et al., 2018; Wagner et al., 2018, 2019; Dalagnol et al., 2019; Günlü et al., 2019; Li et al., 2019). Продукты WorldView-3 при определении характеристик лесов чаще совмещаются с другими источниками информации, например, лазерного сканирования (Li, 2019; Zhao et al., 2022). В исследованиях применяются текстурные характеристики, рассчитанные по матрице смежности уровня серого (GLCM), для классификации и оценки лесных насаждений (Kayitakire et al., 2006; Ozdemir, Karnieli, 2011). Для достижения высокой точности активно используются алгоритмы машинного и глубокого обучения (Brososfske et al., 2014; Qian et al., 2014; Cheng, Han, 2016; Bulut et al., 2019), включая Random Forest (RF) (Jackson, Adam, 2022) и свёрточные нейронные сети (CNN) (Günlü, 2019; Braga et al., 2020). CNN эффективны, но требуют много данных, в то время как метод RF представляет собой практичный выбор при ограниченных ресурсах.

Мировые исследования подчёркивают потенциал БПЛА и передовых алгоритмов обработки изображений для точного и эффективного изучения лесов (Tang, Shao, 2015; Jaakkola, 2015; Torresan et al., 2017; Puliti et al., 2015, 2017), а использование нейронных сетей обеспечивает высокую точность детекции деревьев (Chadwick et al., 2020; Ocer et al., 2020; Diez et al., 2021). Ошибки RMSE указывают на приемлемую точность методов в разных условиях, особенно в лесах с однородной или разреженной структурой

полога (Hernandez et al., 2016; Birdal et al., 2017; Nevalainen et al., 2017; Li et al., 2020; Медведев и др., 2020). Однако, следует отметить, что в лесах сложной структуры с сомкнутым пологом (Nevalainen et al., 2017; Grznarova, 2019; Ball et al., 2023) проведено относительно мало исследований, что указывает на необходимость дальнейшего изучения и повышения точности методов. Важно адаптировать существующие и разработать новые методологии, учитывающие сложную структуру и гетерогенность таких экосистем, а также региональные особенности лесных сообществ.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются сосняки дренированных местообитаний подзоны хвойно-широколиственных лесов в западной части Русской равнины на следующих особо охраняемых природных территориях (ООПТ): национальный парк (НП) «Куршская коса», НП «Смоленское Поозерье», государственный природный биосферный заповедник (ГПБЗ) «Брянский лес».

НП «Куршская коса» (Калининградская область, Россия), основанный в 1987 году и включенный в список мирового наследия ЮНЕСКО, является песчаным полуостровом. Регион характеризуется климатом, меняющимся от умеренно-континентального до морского (WorldClim, Chubarenko, 2002; Avotniece, 2010). Лесистость НП составляет около 71% с преобладанием сосняков (Губарева, 2009). Влияние человека на ландшафт с XIV-XVI веков было значительным, в XX веке усилиями по восстановлению лесных массивов предотвращено разрушение косы (Ромина, Мякокина, 2021). НП «Смоленское Поозерье» (Смоленская область, Россия), основанный в 1992 году и признанный биосферным резерватом ЮНЕСКО, занимает около 3% площади области. Рельеф парка обусловлен действием Валдайского ледника, регион характеризуется умеренно-континентальным климатом с тёплым летом и умеренно холодной зимой (Климатологический справочник..., 1964; WorldClim). Территория залесена (около 75%) и включает разнообразные типы сосновых лесов (12.5%), которые сформировались под влиянием антропогенных факторов (Березина и др., 2003). ГПБЗ «Брянский лес» (Брянская область, Россия) располагается в регионе с субконтинентальным климатом. Леса составляют 80% территории заповедника, из которых 35% – сосновые леса, сформировавшиеся на зандровых местностях. Их формирование было обусловлено многовековой историей рубок и частыми пожарами (Евстигнеев, 2009).

Среди групп типов сосновых лесов (Определитель типов..., URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm>) на ПП всех ООПТ (43 ПП) наиболее представленными в исследовании являются сосняки кустарничково-зеленомошные (15 ПП) и ксерофитно-зеленомошные (13 ПП). Также описаны сосняки зеленомошно-лишайниковые (4 ПП), мелкотравно-зеленомошные (5

ПП), сложные с липой и дубом (3 ПП), мелкотравно-бореальные (2 ПП) и полумертвопокровный (1 ПП).

Всего на территории НП «Куршская коса» было заложено 24 ПП, большая часть представлена сосняками ксерофитно-зеленомошными. На возвышенных днах также распространены сосняки зеленомошно-лишайниковые, адаптированные к засушливым условиям, во влажных низинах преобладают сосняки мелкотравно-зеленомошные и кустарничково-зеленомошные, в старовозрастных лесах также описаны сосняки мелкотравно-бореальные. Пробные площади НП «Смоленское Поозерье» включают в себя 13 участков с преобладанием сосняков кустарничково-зеленомошных. Молодые сосновые леса – мелкотравно-зеленомошные и полумертвопокровные, а в старовозрастных лесах описан сосняк мелкотравно-бореальный. В ГПБЗ «Брянский лес» заложено 6 ПП, представленные кустарничково-зеленомошными сосняками (3 ПП) и сложными сосняками с липой и дубом (3 ПП). Разнообразие выбранных объектов позволило разработать эффективные инструменты автоматической сегментации и адаптировать их к различным условиям произрастания основных древостоев, улучшая их универсальность и точность.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования включали наземные обследования и аэрофотосъёмку БПЛА в середине вегетационного сезона 2017-2021 гг.

Геоботанические и таксационные описания. В исследуемых основных древостоях заложены ПП размером 20×20 м в молодых древостоях (10-40 лет) и до 50×50 м в средневозрастных (40-80 лет) и старовозрастных (от 80 лет) лесах. Во время наземных обследований древостоя использованы общепринятые методы таксации. Проведен поперечный перемер, измерены диаметры на уровне 1.3 м, высоты деревьев определены лазерным высотомером Nikon Forestry Pro, календарный возраст – подсчётом годичных колец по керну для некоторых деревьев. Геоботанические описания ПП выполнены в соответствии с общепринятыми методиками (Mucina et al., 2000; Методические подходы..., 2010), составлен полный флористический список с учётом ярусной структуры леса. Проективное покрытие видов и сомкнутость древесного яруса оценивались в процентах. Географические координаты площадок зафиксированы трёхкратно при помощи навигатора Garmin GPSmap 64st, на некоторых участках использованы реперные точки. В НП «Смоленское Поозерье» на части ПП зафиксированы координаты отдельных деревьев для точного сопоставления с ортофотопланами БПЛА. По результатам наземной таксации на ПП рассчитаны показатели густоты общей и для сосны (шт га⁻¹), среднего диаметра общего и для сосны (см), средней высоты общей и для сосны (м), мера неоднородности (коэффициент Джини, CG), объём стволовой древесины (м³ га⁻¹) и запас углерода в

стволовой древесине ($t \text{ C га}^{-1}$) по методическим рекомендациям (О методических указаниях..., 2017).

Аэрофотосъёмка БПЛА. Проведена аэрофотосъёмка с использованием дронов DJI Phantom 3 Advanced и Mavic Pro, оснащёнными RGB-камерами. Моделирование полётных заданий проводилось в ПО DroneDeploy. Полёты выполнены на высоте 100-200 м в зависимости от сложности рельефа и высоты лесного полога с продольным и поперечным перекрытием 90% в безветренных условиях. Фотограмметрическая обработка изображений, полученных с БПЛА, создание ЦММ и RGB-ортофотопланов осуществлялись с использованием ПО Agisoft PhotoScan и Metashape.

Автоматическая сегментация. Для разработки модели автоматической сегментации отдельных крон деревьев использована нейронная сеть архитектуры Mask R-CNN (He et al., 2017), реализованная в фреймворке машинного обучения *PyTorch* на языке Python и предобученная на наборе данных «COCO». Для создания проекта использовались следующие инструменты, фреймворки и библиотеки: CUDA, Jupyter Notebook, QGIS, Pytorch, rasterio, fiona, Matplotlib.

Для обучения и валидации модели проведено визуальное дешифрирование крон отдельных деревьев в ПО ArcGIS. Используются материалы съёмки ПП и дополнительных участков разнопородного состава. Итоговый набор данных – 8300 отдельных крон, охватывающий 55 участков в разных лесных сообществах. Размер валидационного набора – 1337 крон (16%) для сосновых лесов с учётом объекта и возраста древостоя.

Проведено переобучение модели на этапах классификации областей интереса, создания ограничивающих прямоугольников и сегментации масок. Подготовка данных включала проверку геометрии объектов, перепроецирование, конвертацию изображений, приведение данных к единым границам. Входной формат модели принимает изображения в виде матрицы $[W, H, 3]$ (где W и H – ширина и высота, а 3 – число каналов RGB), проведено разделение на компоненты с одинаковыми размерами по сетке.

Для обучения модели набор данных разделен на тренировочные и валидационные подмножества. Для тренировочных данных применялась к-блочная кросс-валидация ($k=10$). При обучении качество модели оценивалось после каждой эпохи на основе средней точности и полноты при показателе Intersection over Union (IoU) = 0.5. В процессе обучения использован оптимизатор стохастического градиентного спуска (SGD). Для предотвращения переобучения проводилась регуляризирующая оценка функции потерь на изолированном валидационном наборе данных.

При обработке данных из-за ограничения модели на обработку до 100 объектов применено разбиение на части (патчи) с 50%-м перекрытием и зоной игнорируемых границ. Пирамида патчей с увеличивающимся размером использована для баланса между размером сегментов и числом крон. После обнаружения обученной моделью сегменты преобразованы в бинарные

изображения с контурами крон методом марширующих квадратов, а затем – в векторный формат. Удалены сегменты на границах для уменьшения дублирования и краевых крон, оставшиеся сегменты собраны в набор данных с указанием уровня достоверности (score) каждой кроны.

Для оценки точности модели использовались результаты визуального дешифрирования. Крона считалась корректно детектированной при $IoU > 0.5$. Метрики оценки качества модели включали точность (precision), достоверность (accuracy), полноту (recall), F1-меру.

Вычисление параметров для алгоритма фильтрации произведено на основе данных с посчитанным IoU. Разработанная последовательная фильтрация включает в себя критерии площади (порог = 15), уровня достоверности (порог = 0.629), повторов сегментов (порог = 0.5). Для трансформации координат в географические и создания итогового векторного файла используются метаданные.

Исходные результаты сегментации характеризуются высокими значениям полноты (0.91 для всех площадок) и низкими показателями точности (0.31), достоверности (0.3) и F1-меры (0.46). Фильтрация улучшает показатели точности (0.87), достоверности (0.72) и F1-меры (0.83), незначительно уменьшая итоговую полноту (0.81). После всех этапов фильтрации значения F1-меры увеличиваются для всех возрастных групп. Лучшие результаты ($F1 = 0.7–0.96$) модели – в старовозрастных лесах со средним $F1 = 0.86$. Результаты свидетельствуют об эффективности алгоритма фильтрации для уменьшения избыточности сегментов и увеличения надёжности данных (рис. 3.1). Итоговая модель демонстрирует высокое качество сегментации для всех возрастных групп сосновых древостоев с медианным значением F1-меры 0.85.

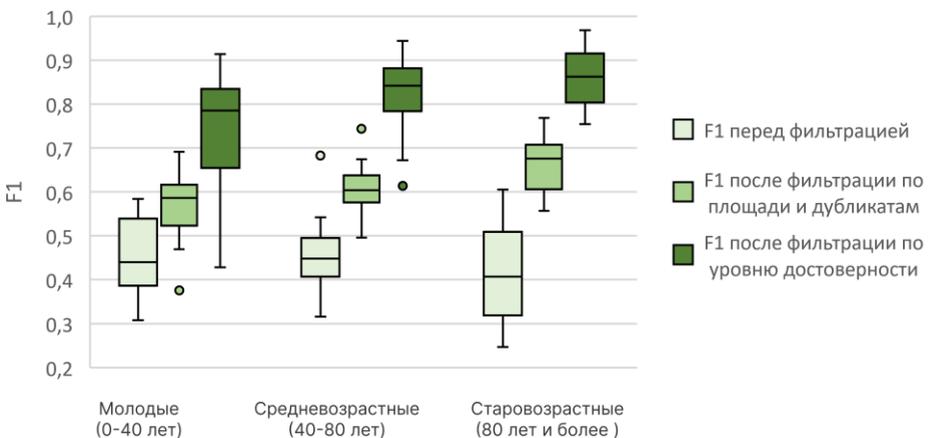


Рисунок 3.1 – Изменение F1-меры на разных этапах фильтрации для сосновых лесов разных групп возраста

Определение средней высоты древостоя ПП по данным БПЛА в исследовании осуществлялось с использованием ЦММ. Рассматривались два подхода к расчёту средних высот ПП: один основан на поиске локального минимума в рамках сцены съёмки БПЛА, а другой — на построении цифровой модели рельефа (ЦМР). Первый метод имеет ограничения при выраженном изменении рельефа, что проявилось для территории Куршской косы. В дальнейших исследованиях предлагается использовать второй подход как наиболее робастный. При определении числа деревьев на основе данных съёмки БПЛА использовались две методики: одна основывалась на анализе ЦММ, а другая — на визуальной разметке и автоматической сегментации, где использовалось сглаженное число деревьев для снижения погрешности на границах ПП. Сомкнутость рассчитана по данным сегментации как отношение суммы площадей горизонтальных проекций крон к общей площади ПП (%). Расчёт средних площади и периметра крон проводился с учётом всех сегментов, входящих в границы ПП.

Статистические методы анализа. Для оценки связей между параметрами, измеренными наземными методами и с помощью БПЛА применен коэффициент корреляции Спирмена (r_s). Для сравнения возрастных групп использованы непараметрические критерии Манна-Уитни и Краскелла-Уоллиса. Описаны алгоритмы нормализации данных и определения мультиколлинеарности. Для оценки запасов углерода и других характеристик сосновых лесов применяли регрессионный анализ с использованием в качестве предикторов данных, полученных по БПЛА-съёмке. Рассмотрены следующие методы: множественная линейная регрессия (MLR), метод опорных векторов (SVM) и модель многослойного перцептрона (MLP) с множественным выходом и отдельными моделями. К рассчитанным показателям качества моделей относятся корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2). Проведено разделение исходного набора данных (43 ПП) методом k-блочной кросс-валидации ($k=10$). Показатели качества рассчитаны отдельно на обучающих и валидационных данных с учетом каждого блока для общей оценки точностей моделей.

ГЛАВА 4. СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И БПЛА-СЪЁМКИ

Соответствие характеристик сосновых лесов по данным наземных измерений и визуального дешифрирования ортофотопланов. Для определения связи диаметра ствола, полученного при наземных измерениях, к площади кроны отдельных деревьев, полученной при визуальном дешифрировании, использованы данные съёмки БПЛА 7 ПП сосновых лесов НП «Смоленское Поозерье». Выявлена тесная связь между этими параметрами, особенно в старовозрастных сосняках с низкой плотностью деревьев, с коэффициентом корреляции от 0.53 до 0.96.

При определении числа деревьев с использованием ЦММ получены значительные ошибки (МАРЕ = 50.6%), поэтому в дальнейшем анализе использованы результаты второго подхода, основанного выделении отдельных крон по ортофотопланам БПЛА. Коэффициент корреляции (r_s) составляет 0.71, что указывает на сильную связь между данными БПЛА и натурными измерениями. Анализ возрастных категорий показал, что для молодых древостоев r_s ниже (0.52 для всех деревьев и 0.63 для сосны), что может свидетельствовать о большей изменчивости или меньшей точности данных в этой группе. Для средневозрастных лесов корреляция значительно выше ($r_s = 0.87$ для всех деревьев, $r_s = 0.93$ для сосны), что указывает на надёжность данных БПЛА. Старовозрастные леса имеют высокую корреляцию ($r_s = 0.68$ для всех деревьев, $r_s = 0.78$ для сосны) (рис. 4.1).

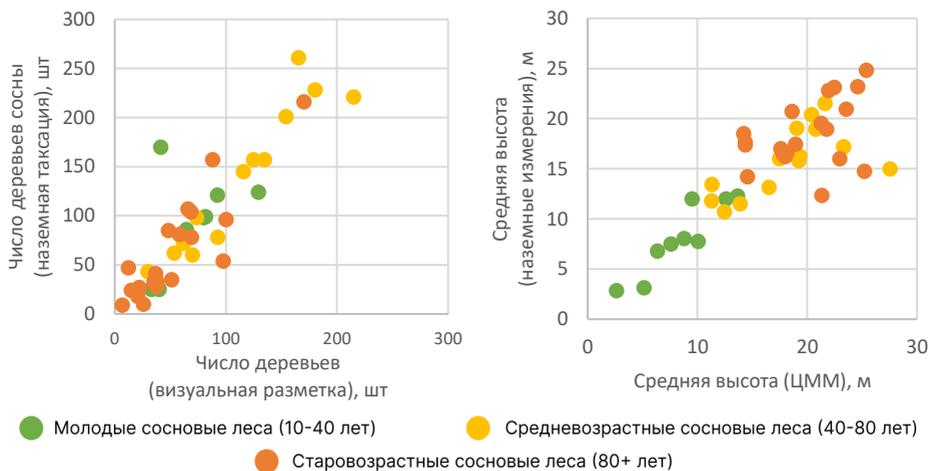


Рисунок 4.1 – Данные по числу деревьев сосны и средней высоте ПП, определённые с использованием БПЛА-съемки и по данным наземной таксации

Коэффициент корреляции для средней высоты при учёте всех возрастных групп составил 0.75 при сравнении данных БПЛА с натурными измерениями общей средней высоты и 0.85 отдельно для сосны. Для молодых сосновых лесов корреляция очень высокая: 0.94 для общей средней высоты и 0.95 для средней высоты *Pinus sylvestris*. Средневозрастные сосновые леса имеют коэффициенты корреляции на уровне 0.7 для всех деревьев и 0.89 для *Pinus sylvestris*. Средняя высота по данным БПЛА, хорошо коррелирует с наземными измерениями, но эта связь уменьшается с возрастом деревьев, что может быть обусловлено увеличением структурного разнообразия, затрудняющего точное дешифрирование и измерение высоты древостоев.

Коэффициент корреляции для параметра сомкнутости по всем возрастным группам составляет 0.59, что указывает на умеренную связь. Для молодых лесов $r_s = 0.48$, для средневозрастных $r_s = 0.78$, а для

старовозрастных $r_s = 0.52$. Сомкнутость древостоя, оценённая по БПЛА, может эффективно дополнять наземные таксационные данные.

Согласованность результатов визуального дешифрирования и автоматической сегментации Mask R-CNN. Средняя площадь кроны, определённая по данным визуального дешифрирования (14.16 м²) и автоматической сегментацией Mask R-CNN (15.71 м²), имеет высокую корреляцию ($r_s = 0.96$), однако автоматическая сегментация склонна к завышению оценок площади. Средний периметр кроны также демонстрирует сильную корреляцию ($r_s = 0.93$), но значения, полученные автоматически, немного меньше (14.32 м) по сравнению с разметкой (15.94 м). Число деревьев также показывает высокую согласованность ($r_s = 0.97$), хотя Mask R-CNN даёт меньшее среднее число (66.7 шт/ПП) по сравнению с визуальной разметкой (78.7 шт/ПП). Сомкнутость, определённая вручную (77.4%) и автоматически (74.9%), имеет хорошую согласованность ($r_s = 0.73$), показывая, что меньшее число деревьев, определённое автоматически, оказывает влияние и на общую сомкнутость крон (рис 4.2).

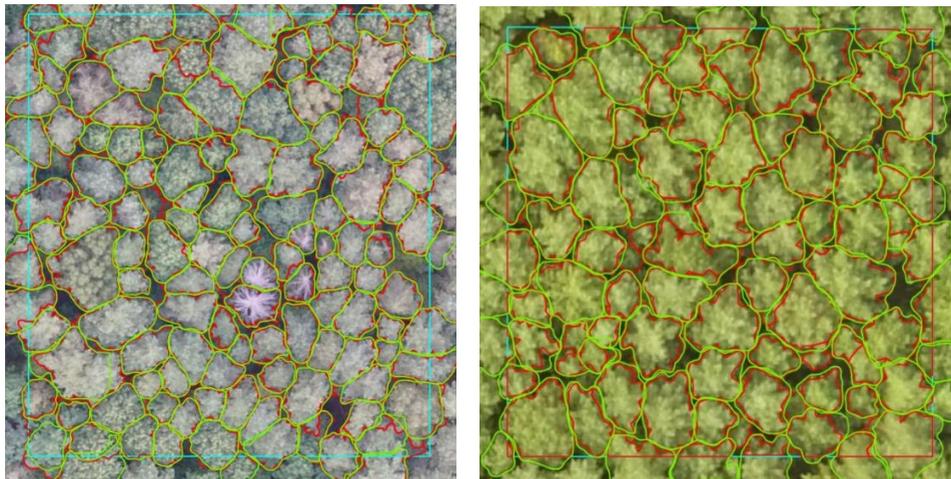


Рисунок 4.2 – Примеры выделения крон при визуальном дешифрировании (красный контур) и с использованием автоматической сегментации (зеленый контур) в старовозрастных сосновых лесах

Автоматическая сегментация с использованием Mask R-CNN представляет собой эффективный инструмент для извлечения морфометрических параметров сосновых древостоев, способный с высокой точностью воспроизводить результаты визуального дешифрирования. Это особенно важно для масштабирования исследований на большие территории, где ручное дешифрирование становится особенно трудоемким.

ГЛАВА 5. ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ И СТРУКТУРНО-БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВОСТОЕВ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ

В главе представлены результаты изучения variability характеристик сосновых лесов в различных ООПТ по данным наземных измерений и возможности их оценки с использованием параметров, полученных при обработке аэрофотосъёмки БПЛА. Рассматриваемые в работе характеристики включают структурные (густота и сомкнутость) и биометрические (средние высота, диаметр и возраст) параметры, а также показатели объёма и запаса углерода в стволовой древесине. Дополнительно были рассмотрены характеристики густоты, среднего диаметра и средней высоты для доминирующего вида сосны обыкновенной. Обсуждение структурировано по возрастным группам древостоев: молодые (10-40 лет), средневозрастные (40-80 лет) и старовозрастные (80+ лет) леса. Результаты сравнения характеристик сосновых лесов в различных ООПТ представлены в табл. 5.1. В молодых сосновых лесах (НП «Куршская коса» и «Смоленское Поозерье») не наблюдается значимых различий в исследуемых характеристиках.

Таблица 5.1 – Попарное сравнение характеристик ПП с использованием критерия Манна-Уитни по возрастным группам*

Характеристики	Возрастные группы лесов						
	Старовозрастные			Средневозрастные			Молодые
	СП - КК	БЛ - КК	СП - БЛ	СП - КК	БЛ - КК	СП - БЛ	СП - КК
Сомкнутость, %	0.22	0.36	0.05	0.01	0.15	0.03	0.89
Густота, шт га ⁻¹	0.05	0.22	0.23	0.05	0.25	0.04	0.90
Густота <i>Pinus sylvestris</i> , шт га ⁻¹	0.03	0.04	0.37	0.01	0.16	0.04	0.51
Возраст, лет	0.56	0.34	0.88	0.02	0.15	0.07	0.90
Средняя высота, м	0.71	0.01	0.07	0.02	0.03	0.04	0.24
Средний диаметр, см	0.05	0.72	0.23	0.13	0.52	0.14	0.16
Средняя высота <i>Pinus sylvestris</i> , м	0.02	0.01	0.04	0.00	0.03	0.55	0.36
Средний диаметр <i>Pinus sylvestris</i> , см	0.10	0.04	0.23	0.03	0.16	0.23	0.25
Объём древесины, м ³ га ⁻¹	0.56	0.03	0.04	0.23	0.37	0.77	0.16
Запас углерода стволовой древесины, т С га ⁻¹	0.49	0.05	0.07	0.24	0.37	0.77	0.16

*где КК – НП «Куршская коса», СП – НП «Смоленское Поозерье», БЛ – ГПБЗ «Брянский лес»; зелёным выделены значимые отличия (p-value < 0.05).

Результаты регрессионного анализа характеристик сосновых древостоев с применением методов MLR, SVM, MLP представлены в табл. 5.2. В качестве предикторов использовались нормализованные данные, полученные в результате автоматической сегментации RGB-ортофотопланов (средние площадь и периметр крон, густота, сомкнутость), а также высота,

полученная по ЦММ. Целевые характеристики включали густоту древостоя, сомкнутость, средние диаметр, высоту, возраст, объём древесины и запас углерода в стволовой древесине, полученные по данным наземной таксации.

Таблица 5.2 – Результаты регрессионного анализа характеристик сосновых лесов с использованием разных методов*

Тип	Характеристики	MLR		SVM		MLP: общая модель		MLP: отдельные модели	
		$R^2 t^{**}$	$R^2 v^{**}$	$R^2 t$	$R^2 v$	$R^2 t$	$R^2 v$	$R^2 t$	$R^2 v$
Структурные	Сомкнутость, %	0.44	0.28	0.01	0.00	-	-	0.53	0.52
	Густота, шт га ⁻¹	0.67	0.53	0.96	0.77	0.87	0.67	0.93	0.82
	Густота <i>Pinus sylvestris</i> , шт га ⁻¹	0.74	0.67	0.90	0.79	0.89	0.83	0.95	0.88
Биометрические	Возраст, лет	0.55	0.40	0.61	0.48	0.74	0.56	0.82	0.66
	Средняя высота, м	0.76	0.63	0.79	0.70	0.84	0.74	0.87	0.73
	Средний диаметр, см	0.53	0.33	0.82	0.68	0.76	0.63	0.87	0.74
	Средняя высота <i>Pinus sylvestris</i> , м	0.89	0.85	0.86	0.84	0.89	0.81	0.90	0.85
	Средний диаметр <i>Pinus sylvestris</i> , см	0.77	0.70	0.83	0.79	0.85	0.74	0.86	0.73
Продукционные	Объём древесины, м ³ га ⁻¹	0.61	0.50	0.67	0.55	0.78	0.62	0.79	0.62
	Запас углерода в стволовой древесине, т С га ⁻¹	0.58	0.46	0.63	0.48	0.76	0.60	0.79	0.63

*Где красным цветом выделены $R^2 = [>0.4)$, оранжевым – $R^2 = [0.4-0.5)$, жёлтым – $R^2 = [0.5-0.6)$, бледно-зелёным – $R^2 = [0.6-0.7)$, светло-зелёным – $R^2 = [0.7-0.8)$, зелёным $R^2 = [0.8-0.9)$, тёмно-зелёным $R^2 = [0.9-0.99]$.

** $R^2 t$ – коэффициент детерминации для обучающих данных, $R^2 v$ – коэффициент детерминации для валидационных данных.

Биометрические характеристики. Среди биометрических характеристик древостоев сосновых лесов не выявлено значимых отличий в среднем диаметре (табл. 5.1) для всех возрастных групп. Общая средняя высота значимо отличается между всеми объектами с минимальным значением на Куршской косе (12.8 м для средневозрастных и 17.6 м старовозрастных) и максимальным – на ПП Брянского леса (20.3 м и 23.6 м соответственно). При этом средняя высота сосны схожа в средневозрастной группе в Брянском лесу и Смоленском Поозерье (20 м), но значимо меньше на Куршской косе (12.8 м). В средневозрастных лесах Смоленского Поозерья больше, чем на других объектах, вносят вклад другие древесные породы в общее значение биометрических характеристик. Разница между общей средней высотой и высотой сосны практически отсутствует на Куршской

косе и Брянском лесу в средневозрастных древостоях. В старовозрастных лесах Брянского леса сосны достигают значимо большей высоты (29.5 м) по сравнению с другими исследованными территориями. Это объясняется более благоприятными климатическими условиями, включая высокие среднегодовые температуры, по сравнению с НП «Смоленское Поозерье». На Куршской косе олиготрофность местообитаний и сильная ветровая нагрузка могут ограничивать рост древостоя. Старовозрастные леса характеризуются высоким уровнем видового разнообразия, что проявляется в отличиях общих биометрических характеристик и характеристик сосны. Это играет важную роль в адаптивности сообществ, обеспечивая функциональную устойчивость лесных экосистем. Изменчивость деревьев по диаметрам (коэффициент Джини) во всех ООПТ в молодых и средневозрастных сосновых лесах отражает большую выравненность в размерах деревьев. Коэффициент Джини имеет наибольшие значения в старовозрастных лесах НП «Смоленское Поозерье», что характерно для лесов естественного происхождения в связи с увеличением разнообразия видов, подъярусов и поколений.

Данные, полученные с БПЛА, позволяют эффективно оценивать биометрические характеристики, с лучшими результатами при использовании MLP. Однако моделирование возраста древостоев оказалось менее точным независимо от используемого метода (табл. 5.2). В старовозрастных древостоях отмечено занижение предсказанного возраста, в то время как средняя высота лесного полога часто оценивается выше фактической. Высота сосны хорошо оценивается за счёт соответствия с высотой, определённой с БПЛА. Оценки средней высоты наиболее точны для молодых лесов.

Проведено сравнение результатов регрессионного анализа биометрических характеристик сосновых лесов с использованием данных БПЛА и космической съёмки VHR. Стоит отметить, что сравнение имеет определённые допущения в связи с различиями в источниках целевых параметров и методах анализа: RF на основе текстурно-спектральных параметров космического снимка спутника WorldView-3 и метод MLP с использованием данных БПЛА-съёмки. Показатель R^2 для метода MLP и данных БПЛА значительно выше, чем для метода RF с данными WorldView-3, а ошибки RMSE – ниже, что свидетельствует о лучшей точности модели MLP в оценке биометрических характеристик (табл. 5.3).

Отмечается, что возраст древостоя, независимо от источников съёмки, определяется менее надёжно на новых данных и с большими ошибками в сравнении с другими характеристиками. Результаты показывают значительный потенциал данных БПЛА для количественной оценки биометрических характеристик сосновых древостоев.

Таблица 5.3 – Метрики качества регрессионного анализа характеристик основных лесов по данным WorldView-3 (метод RF) и БПЛА-съёмки (метод MLP)

Характеристики	Регрессионные модели	Обучение			Валидация		
		R^2	RMSE	RMSE, %	R^2	RMSE	RMSE, %
Возраст, лет	WorldView-3, RF	0.47	18.50	18.50	0.32	19.70	23.20
	БПЛА, MLP	0.82	13.62	11.54	0.66	18.94	16.05
Средний диаметр, см	WorldView-3, RF	0.54	4.60	15.20	0.41	5.00	21.00
	БПЛА, MLP	0.89	2.42	8.06	0.72	3.91	13.06
Средняя высота, м	WorldView-3, RF	0.53	2.90	17.10	0.40	3.30	22.10
	БПЛА, MLP	0.87	1.86	8.46	0.73	2.65	12.07

Структурные характеристики значимо отличаются в древостоях средневозрастных и старовозрастных сосновых лесов и отражают влияние возрастных особенностей, различий в управлении лесами и условиях произрастания (табл. 5.1). На Куршской косе в средневозрастных лесах сомкнутость (80%) и густота древостоев (19841 шт га⁻¹) выше и соотносится с более молодым (55 лет) возрастом среди объектов, при этом для группы старовозрастных лесов сомкнутость падает (66 %), что отражает бедную структуру этих лесов без подъярусов. В средневозрастных лесах НП «Смоленское Поозерье» сомкнутость и густота значимо ниже (44 % и 738 шт га⁻¹), чем в ГПБЗ «Брянский лес» (73 % и 1053 шт га⁻¹), где сосняки являются посадками. В старовозрастных лесах этих территорий доля сосны в древостое уменьшается, но наблюдается увеличение сомкнутости за счёт подроста (59% для НП и 77% для ГПБЗ).

Оценка структурных характеристик по данным БПЛА эффективна для параметров густоты методами SVM и MLP (отдельная модель) с лучшими результатами при валидации для MLP и наименьшими ошибками в средневозрастных лесах (табл. 5.2). Сомкнутость прогнозируется хуже, что может быть связано с неточностью при наземном определении параметра.

Объём и запас углерода стволовой древесины. Значимые отличия характеристик между исследуемыми объектами наблюдаются для группы старовозрастных сосновых лесов. В ГПБЗ «Брянский лес» средние значения объёма древесины выше и составляют 576 м³ га⁻¹, что заметно превышает показатели для Куршской косы (418 м³ га⁻¹) и Смоленского Поозерья (398 м³ га⁻¹). При попарном сравнении запасов углерода стволовой древесины значимые отличия сохраняются для Брянского леса и Куршской косы (p-value ≈ 0.05). Различия в объёмах и запасах углерода стволовой древесины могут быть связаны с происхождением, природоохранным статусом объектов, климатическими особенностями и трофностью местообитаний. Несмотря на отличия в природно-климатических условиях и происхождении, для других возрастных групп значимых различий в объёме и запасе углерода стволовой древесины между исследуемыми объектами не обнаружено.

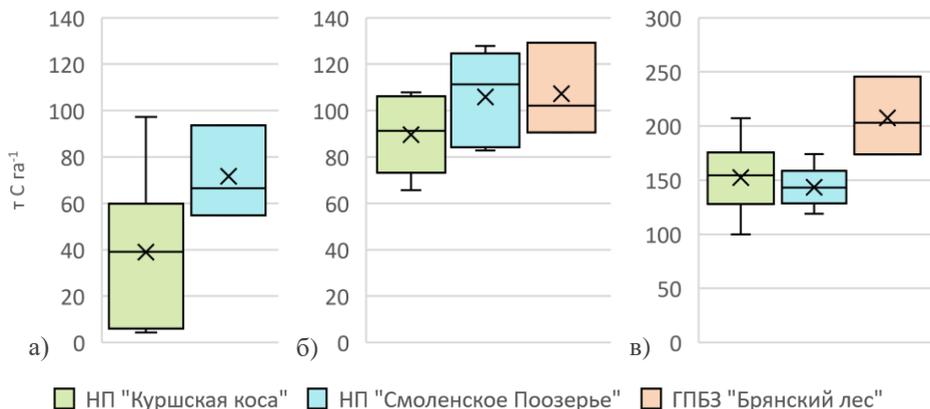


Рисунок 5.1 – Запас углерода в стволовой древесине ($t C ga^{-1}$) сосновых древостоев исследуемых ООПТ по возрастным группам, где (а) – молодые, (б) – средневозрастные, (в) – старовозрастные леса.

Изучение запасов углерода в стволовой древесине сосновых древостоев подзоны хвойно-широколиственных лесов выявило значительный разброс значений в разных возрастных группах. В молодых лесах (10-40 лет) запасы углерода варьируют от 4 до 97 $t C ga^{-1}$, со средним значением около 50 $t C ga^{-1}$. В средневозрастных лесах (40-80 лет) запасы составляют от 66 до 129 $t C ga^{-1}$ с более низким разбросом данных. Старовозрастные леса (старше 80 лет) закономерно обладают наибольшими запасами углерода, от 100 до 246 $t C ga^{-1}$, со средним около 158 $t C ga^{-1}$. Вариабельность запасов углерода стволовой древесины внутри возрастных групп, а также различия в биометрических и структурных характеристиках, указывают на необходимость учёта локальных и региональных особенностей для точной оценки углеродного баланса лесов.

Получены надёжные оценки запаса углерода в стволовой древесине и объёма древесины общей моделью и отдельными моделями MLP. Отмечается, что с увеличением возраста неопределённость в оценке характеристик объёма и запаса углерода стволовой древесины моделью возрастает. Чаще характеристики в старовозрастных лесах недооцениваются, что может быть связано с увеличением сложности вертикальной структуры лесных сообществ и видового разнообразия, что не учитывается морфометрическими характеристиками, определёнными по RGB-ортофотоплану.

Широкий диапазон анализируемых характеристик позволил создать регрессионные модели, которые надёжно определяют характеристики сосновых лесов, включая запас углерода, на основе высокодетальных данных с БПЛА, что значительно увеличивает эффективность экологического мониторинга лесных территорий.

ВЫВОДЫ

Диссертация представляет собой комплексное исследование сосновых лесов дренированных местообитаний в подзоне хвойно-широколиственных лесов на западе Русской равнины, направленное на изучение запасов углерода стволовой древесины, биометрических и структурных характеристик с использованием данных наземных обследований, аэрофотосъёмки БПЛА и космической съёмки сверхвысокого пространственного разрешения.

1. Запасы углерода стволовой древесины сосновых древостоев хвойно-широколиственных лесов, оцененные по данным наземных обследований на территориях ООПТ НП «Куршская коса», «Смоленское Поозерье» и ГПБЗ «Брянский лес», варьируют в широких пределах. Наиболее ярко варьирование выражено в молодняках (до 40 лет) – от 4 до 97 т С га⁻¹, в средневозрастных (40-80 лет) и старовозрастных (старше 80 лет) лесах запасы углерода в стволовой древесине варьируют в более узких диапазонах – от 66 до 129 т С га⁻¹ и от 100 до 246 т С га⁻¹, соответственно. Выявлены значимые различия между объектами для биометрических и структурных характеристик в группах средневозрастных (40-80 лет) и старовозрастных (от 80 лет) сосновых лесов. Запасы углерода в стволовой древесине молодых и средневозрастных древостоев сосновых лесов различного происхождения, формирующихся в различных природно-климатических условиях, сопоставимы, тогда как в старовозрастных лесах различия в запасах углерода в этом основном пуле становятся выраженными. Наибольшие значения характерны для сосновых лесов ГПБЗ «Брянский лес».

2. Автоматическая сегментация RGB-ортофотопланов БПЛА на основе нейронной сети Mask R-CNN продемонстрировала высокие показатели точности ($F1 = 0.83$) и позволила эффективно извлекать морфометрические параметры, такие как площадь и периметр кроны, густота и сомкнутость.

3. Показана эффективность использования морфометрических параметров автоматической сегментации сосновых древостоев по данным БПЛА-съёмки для оценки ключевых характеристик древостоев, непосредственно связанных с аккумуляцией углерода в сосновых лесах. Отдельные модели многослойного перцептрона (MLP) показывают лучшую согласованность результатов на валидационных данных. Биометрические параметры сосновых древостоев предсказываются с высокой степенью точности ($R^2 = 0.82 - 0.9$), а среди структурных характеристик лучше оцениваются показатели густоты ($R^2 = 0.93 - 0.95$). Точность оценки объёма и запаса углерода стволовой древесины также высокая ($R^2 = 0.76 - 0.79$), что подтверждает эффективность используемых методов оценки. Сравнительный анализ применения данных космической съёмки WorldView-3 и БПЛА в задаче оценки биометрических характеристик показывает высокий потенциал данных БПЛА-съёмки.

Выявленная вариабельность запасов углерода стволовой древесины, а также отличия в биометрических и структурных характеристиках древостоев сосновых лесов, формирующихся в одной подзоне, подчёркивают важность учёта локальной специфики и региональных факторов для уменьшения расхождений при оценках способности лесов поглощать парниковые газы. При этом целесообразно использовать широкие возможности данных сверхвысокого пространственного разрешения космической и БПЛА-съёмки для проведения непрерывной, высокоточной пространственной оценки.

Дальнейшие перспективы исследования направлены на совершенствование модели автоматической сегментации Mask R-CNN, включая интеграцию данных о рельефе и функций классификации для определения видового состава и возраста лесов. Результаты диссертационного исследования вносят вклад в область экологии и лесоведения, предоставляя данные для улучшения понимания структуры и функций сосновых лесов с использованием современных технологий дистанционного зондирования, нейронных сетей и машинного обучения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах

1. Князева С.В., **Никитина А.Д.**, Гаврилюк Е.А., Тихонова Е.В., Королева Н.В. Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэросъёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – № 6. – С. 93-107. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-93-107. (ВАК, РИНЦ, Scopus)
2. Князева С.В., **Никитина А.Д.**, Белова Е.И., Плотникова А.С., Подольская Е.С., Ковганко К.А. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съёмки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне // Лесоведение. – 2021. – № 6. – С. 1-28. DOI: 10.31857/S0024114821060073 (ВАК, РИНЦ, Scopus)
3. Кузнецова А.И., Горнов А.В., Горнова М.В., Тебенькова Д.Н., **Никитина А.Д.**, Кузнецов В.А. Оценка выноса углерода с почвенными водами в доминирующих типах леса Брянского Полесья // Почвоведение. – 2022. – № 9. – С. 1086-1097. DOI: 10.31857/S0032180X2209012X. (ВАК, РИНЦ)

Публикации в других научных изданиях

4. **Никитина А.Д.**, Князева С.В., Королева Н.В., Гаврилюк Е.А., Эйдлина С.П. Применение метода пороговой сегментации изображений для определения параметров древесной растительности по спутниковым данным сверхвысокого пространственного разрешения // Материалы Международной научно-практической конференции «Геоматика: образование, теория и практика». – Беларусь, Минск. – 2019. – С. 114-118.
5. **Никитина А.Д.**, Князева С.В., Королева Н.В., Эйдлина С.П. Определение биометрических параметров древесной растительности по спутниковым

- данным Ресурс-П1/Геотон-Л1 на основе метода пороговой сегментации изображений // Доклады VII Всероссийской (с международным участием) конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (памяти выдающегося ученого-лесоведа, академика А.С. Исаева). – Москва. – 2019. – С. 82-84.
6. Гаврилюк Е.А., Князева С.В., **Никитина А.Д.** Оценка биометрических и морфоструктурных характеристик древостоев НП «Куршская коса» по спутниковым данным PlanetScore // Доклады VII Всероссийской (с международным участием) конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (памяти выдающегося ученого-лесоведа, академика А.С. Исаева). – Москва. – 2019. – С. 25-26.
 7. Гаврилюк Е.А., **Никитина А.Д.**, Князева С.В. Оценка биометрических и морфоструктурных характеристик древостоев НП «Куршская Коса» по спутниковым данным Sentinel-2, PlanetScore и WorldView-3 // Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва, ИКИ РАН. – 2019.
 8. Белова Е.И., Ершов Д.В., **Никитина А.Д.**, Князева С.В. Сравнение алгоритмов определения границ кроны деревьев и межкрупных пространств на ортофотоснимках БПЛА // Доклады VII Всероссийской (с международным участием) конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (памяти выдающегося ученого-лесоведа, академика А.С. Исаева). – Москва. – 2019. – С. 25-26.
 9. Гаврилюк Е.А., **Никитина А.Д.**, Тихонова Е.В., Каганов В.В., Ершов Д.В. Использование материалов разносезонной фото- и мультиспектральной беспилотной аэросъемки для распознавания породной структуры в смешанных лесах Европейской части России // Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». – Москва, ИКИ РАН. – 2020.
 10. **Никитина А.Д.**, Тихонова Е.В., Князева С.В., Данилов М.С. Возможности использования съемки БПЛА для определения характеристик древостоев на примере сосняков национального парка «Смоленское Поозерье» // Материалы Всероссийской научной конференции «Научные основы устойчивого управления лесами». – 2020. – С. 82-84.
 11. Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И., **Никитина А.Д.** Определение породной структуры лесного участка по ортофотопланам беспилотной аэрофотосъемки // Актуальные проблемы современного лесоводства. Вторые Международные чтения памяти Г.Ф. Морозова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ». – 2020. – С. 141-152.
 12. **Никитина А.Д.** Возможности использования цифровой модели местности БПЛА для определения некоторых характеристик сосновых древостоев //

Сборник материалов участников XVII Большого географического фестиваля, посвященного 195-летию российского кругосветного путешествия Ф.П. Литке (1826-1829 гг.). СПб. – 2021. – С. 503-506.

13. Князева С.В. **Никитина А.Д.**, Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В., Белова Е.И., Плотникова А.С., Подольская, Е.С. Обзор дистанционных подходов и методов оценки ресурсного потенциала, экологического состояния и экосистемного разнообразия лесов // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. – Москва: Наука. – 2021. – С. 176-194.
14. **Никитина А.Д.**, Кузнецова А.И., Князева С.В., Горнов А.В. Определение объема атмосферных выпадений по аэрофотосъемке БПЛА на примере модельных объектов ГПБЗ Брянский лес // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами», посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН. – Москва, ЦЭПЛ РАН. – 2022. – С.185-187.

Никитина А.Д.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ
ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОЙ СЪЁМКИ

Автореферат

Подписано в печать 00.00.24. Формат 60x84.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж ... экз. Изд. ...

Отпечатано в типографии