

## ОТЗЫВ

официального оппонента

**на диссертацию Никитиной Алены Дмитриевны «Определение запасов углерода в сосновых древостоях хвойно-широколиственных лесов с использованием данных высокодетальной съёмки», представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.15 – экология (биологические науки)**

Исследования Алены Дмитриевны Никитиной посвящены изучению variability морфометрических и продукционных характеристик сосновых древостоев в подзоне хвойно-широколиственных лесов западной части Русской равнины на базе методов высокодетальной съёмки и разработке методов машинного обучения и нейронных сетей. Результаты их необходимы для сравнительного анализа углеродного баланса и построения прогнозных моделей лесных экосистем в условиях глобального изменения климата и непрерывного антропогенного воздействия. По данной проблеме к настоящему времени накоплен достаточно большой объем информации, но подходы и методы минувших лет не обеспечивают нужную точность данных и не позволяют достоверно выявить региональные особенности углеродного бюджета в лесах. Например, многолетние колоссальные объемы лесостроительных материалов можно использовать лишь для приблизительной оценки функционирования лесных сообществ и прогноза их развития в будущем.

Диссертационная работа четко структурирована. Она состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, семи приложений и списка основных сокращений, употребляемых в тексте. Рукопись изложена на 204 стр., включает 13 таблиц и 56 высокоинформативных иллюстраций (фотоснимки объектов исследований и процесса полевых работ, наглядными картосхемами и диаграммами). Список литературы включает 260 источников, из них 166 опубликованы на иностранном языке.

Во **Введении** (6 стр.) обоснована актуальность темы исследований, раскрыта научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы, объеме и структуре диссертации. Алена Дмитриевна убедительно показала необходимость перехода к использованию высокодетальной съёмки с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) БПЛА, обеспечивающей требуемое качество исследований и позволяющей проводить точный и глубокий анализ структуры древостоев, как основы мониторинга пулов углерода. Ею четко обозначена цель исследований - *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 высокодетальной съёмки*. Поставленной цели полностью соответствуют задачи (3) и защищаемые положения (3). Они конкретны и взаимосвязаны между собой.

Удачным следует признать выбор объектов исследований – сосновая формация самая распространенная в подзоне хвойно-широколиственных лесов и её древостоям присущи значительные запасы фитомассы и закрепленным в Программе биогеоценотических исследований РАН. Объекты исследований подобраны по возрастному принципу – древостои

исследованных насаждений представлены разными классами возраста и все произрастают в сходных условиях – дренированных экотопах.

**Новизна результатов** заключается в определении и анализе запасов углерода в стволовой древесине сосновых лесов разного возраста и происхождения. Эти исследования выполнены впервые на основе разработанного Аленой Дмитриевной метода автоматической сегментации материалов БПЛА-съёмки с использованием нейронной сети и усовершенствованной ею модели Mask R-CNN. Новым является и то, что ею обоснована эффективность использования полученных данных в качестве прогнозных параметров (предикторов) для углеродного баланса и разных био- и морфометрических характеристик сосновых лесов.

**Прикладное значение полученных результатов** определяется их теоретической значимостью – они могут быть полезны в разных смежных направлениях лесных наук: геоботанике, лесной таксации, лесоводстве, лесном ресурсоведении, экологии и др., при мониторинге состояния сосновых лесов других регионов, а также после соответствующей модификации для мониторинга в других лесных формациях и в разных других исследовательских проектах. Конечно, следует учитывать дорогую стоимость использования БПЛА. Поэтому не следует ожидать быстрого внедрения БПЛА-съёмки в производство.

**Достоверность результатов** не вызывает сомнений. Она определяется методологической целостностью работы, большим объемом грамотно проанализированных фактических данных, собранных лично автором, использованием современных средств и методов исследований. Результаты апробированы автором на многочисленных конференциях и форумах разного уровня; опубликованы более чем достаточно – 14 работ, из них 3 входят в список изданий, включённых в Перечень ВАК, 1 – глава в коллективной монографии, 10 публикаций представлены тезисами докладов на всероссийских и международных научных конференциях.

**Глава 1. Экологические исследования сосновых лесов и возможности использования высокодетальной аэрокосмической съёмки** (6 стр.) содержит теоретические предпосылки исследования, базирующиеся на изученности вопроса и собственном видении проблемы. В начале главы диссертант обосновывает важность постановки исследований, подчеркивается экосистемная и биосферная значимость сосновых лесов и их широкая представленность в лесном покрове страны, указаны районы и экотопы исследований. Глава состоит из трех разделов, включающих по 1-4 подраздела. В разделе 1.1. «Леса с преобладанием *Pinus sylvestris* L.: значение, экологическая пластичность и ареал распространения» на основе анализа литературных данных приведена информация о роли и распределении сосновых лесов на планете и в России, их вкладе в поддержании биоразнообразия и биологической устойчивости экосистем (подраздел 1.1.1). Подчеркивается значимость изучения адаптационных характеристик сосны (*Pinus sylvestris*), являющейся одной из главных лесообразующих и экономически-ценных пород страны. Указывается, что сосновые леса обладают большими запасами углерода и служат индикатором динамических процессов в контексте климатических изменений. В особый подраздел (1.1.2) выделена информация о хорологической приуроченности и лесоводственных свойствах сосны, её

отношении к разным факторам среды в процессе онтогенеза; описываются биоморфологические адаптации в разных условиях произрастания; приводятся последние сведения (конец минувшего столетия) о вкладе сосновых древостоев в годичном депонировании углерода и общая оценка углерода в фитомассе.

В заключительном подразделе (1.1.3) всесторонне рассмотрена история изученности сосновых лесов в подзоне хвойно-широколиственных лесов (Калининградская, Смоленская и Брянская области). Отражены особенности распространения типов леса в пределах ареала сосны, лесистость, значимость разных факторов в сукцессионном процессе сосняков, история интродукции сосны и районирования, и др. Большое внимание уделено методам исследований, сопоставлению наземных данных и спутниковых изображений. Диссертант правильно отмечает, что при высокой точности классические методы: геоботанические и таксационные, более приемлемы для конкретных участков (пробных площадей (ПП), катен малых рек). Не всегда результаты, полученные на их основе, можно интерпретировать на большие территории. Она также указывает на часто высокую степень варьирования наземных данных с данными дистанционного зондирования, что не обеспечивает достаточную точность определения даже таких параметров, как диаметр, высота и возраст древостоев. На основе знаний о состоянии лесов сосновой формации и анализа методов их исследований был сделан вывод о необходимости применения для оценки характеристик лесных сообществ в западной части Русской равнины высокодетальной аэрокосмической съёмки, обеспечивающей получение данных высокого разрешения.

В начале раздела 1.2. *«Изучение лесов с использованием данных спутниковой съёмки сверхвысокого пространственного разрешения»* описаны преимущества спутниковых данных VHR, полученных в оптическом диапазоне, перед другими методами дистанционного зондирования. Диссертант глубоко проработала литературу по высокодетальной космической съёмки, начиная с момента ее использования (80-ые годы) до настоящего времени для мониторинга рубок и состояния лесов, оценки ущерба от пожаров и результатов лесовосстановления на гарях и вырубках, определения видового (породного) разнообразия, структуры лесного полога, запасов углерода и фитомассы и решения других задач. Ею проанализированы разнообразные методы и подходы для обработки снимков со сверхвысоким разрешением. Результаты этого анализа логично представлены в двух подразделах. В первом подразделе 1.2.1. *«Основные источники данных космической съёмки и методы обработки изображений VHR»* описываются космические съёмочные системы (подраздел 1.2.1.1), подходы к обработке данных космической съёмки (подраздел 1.2.1.2), методы сегментации и дальнейшей обработки данных (подраздел 1.2.1.3), (подраздел 1.2.1.4), рассматриваются основные характеристики и отмечаются их преимущества в выполнении конкретных задач исследований. Указываются публикации, в которых можно получить подробную информацию о различных методах машинного обучения, описаны космические съёмочные системы с хронологией их запусков на орбиту и два основных подхода (метода) обработки космических изображений: пиксельный и объектно-ориентированный. Алена Дмитриевна убедительно обосновала преимущества второго подхода, в основе которого лежит сегментация изображения, и описала существующие методы сегментации с определениями многочисленных спектрально-текстурных показателей, используемых для дальнейшей обработки и машинного анализа полученных данных. Ею последовательно

описаны известные методы сегментации, начиная от метода простой пороговой сегментации до комбинированного метода, объединяющего несколько подходов сегментации. Далее, в подразделе 1.2.2. «*Анализ характеристик лесов с использованием данных VHR*», диссертант объясняет, как с использованием данных VHR анализировались разные показатели древостоев, и проводилась сегментация крон, учитывает опыт других исследователей. Лаконично и доступно описаны процесс и методы выделения отдельных крон деревьев (подраздел 1.2.2.1), метод сегментации изображений лесного полога для определения средних высоты, диаметра, возраста и других биометрических показателей древостоев (подраздел 1.2.2.2), продукционных параметров: фитомассы древостоя и запаса углерода (подраздел 1.2.2.3). При этом отмечено высокая эффективность нейронных сетей по сравнению с регрессионным моделированием, и неоднозначность алгоритмов, используемых в нейросети.

В разделе 1.3. «*Применение данных БПЛА в изучении лесов*» приведен обзор многочисленных публикаций, посвященных исследованиям с применением БПЛА в лесных сообществах разных зон и континентов. Описаны достоинства и недостатки разных типов БПЛА, указаны наиболее используемые БПЛА и компании, производящие БПЛА наиболее приемлемые для решаемых задач (подраздел 1.3.1). Отмечена зависимость качества работы алгоритмов от параметров съемки и особенностей снимаемой местности. Описаны приемы и особенности тематической обработки данных БПЛА, в процессе которой определяются разные показатели (спектральные, текстурные, статистические, морфометрические), взаимосвязи между найденными параметрами, анализируется точность цифровых моделей в зависимости от методов обработки и структуры древостоев (подраздел 1.3.2). Подраздел 1.3.3. «*Оценка характеристик лесов по данным БПЛА-съемки*» содержит обзор литературы по использованию результатов выделения с помощью БПЛА отдельных деревьев (подраздел 1.3.3.1) и фрагментов (сегментов) кронового полога древостоя (подраздел 1.3.3.2). Обоснована необходимость разработки методологий и методов, повышающих точность исследований в сложных высокосомкнутых лесах.

Скрупулезный обзор многочисленных разноплановых литературных первоисточников по эколого-лесоводственным вопросам и использованию в исследованиях методов дистанционного зондирования, выполненный Аленой Дмитриевной, свидетельствует о высоком уровне её теоретической подготовки и подтверждает безусловную обоснованность выбора темы, цели и задач исследований.

В главе 2. «**Объекты исследования**» (15 стр.) описаны сосняки, произрастающие на трех особо охраняемых территориях. Это два национальных парка («Куршская коса», и «Смоленское Поозерье») и природный биосферный заповедник «Брянский лес». Выбор этих ООПТ отражает типологическое разнообразие сосняков дренированных местообитаний в западной части Русской равнины и разную степень антропогенного воздействия. Природоохранный статус выбранных территорий позволяет использовать их для изучения естественных процессов в лесных экосистемах. В разделе 2.1. «*Географическая характеристика ООПТ*» для каждой ООПТ указываются административные границы ООПТ, описываются геологическая история и история антропогенного воздействия, климат, ботанико-лесоводственные особенности лесных формаций, приводятся названия преобладающих видов для всех ярусов фитоценозов на каждой территории. Подчеркивается,

что исследованные территории различаются между собой по разным параметрам. На Куршской косе (подраздел 2.1.1) в результате военных действий и многолетней хозяйственной деятельности сильно изменилась структура лесного покрова. В нем преобладают молодые и средневозрастные насаждения сосны. Прибрежное положение с преобладанием дюнных массивов обуславливает повышенную уязвимость лесных сообществ и требует повышенного внимания к их сохранности. Для парка «Смоленское Поозерье» (подраздел 2.1.2) тоже характерна высокая антропогенная нарушенность, обусловленная пожарами и хозяйственной деятельностью. При этом отмечается наличие в парке полного исходного комплекса типов леса и дубняков, пребывающих на разных восстановительных стадиях, а наибольшее разнообразие лесного покрова с доминирующей формацией сосняков отмечено в заповеднике (подраздел 2.1.3).

В разделе 2.2. «Сосновые леса ООПТ» описан метод непосредственного подбора насаждений для изучения; указываются придержки для выделения групп типов леса, возрастных групп древостоев; приводятся характеристики насаждений каждого объекта исследований, включая перечни доминирующих видов нижних ярусов. Вполне логичен подход к последующему группированию всех классов возрастов в три основные группы: молодые (до 40 лет), средневозрастные (40-80 лет) и старовозрастные (80+ лет) леса. Это, как указывает диссертант, позволяет с одной стороны снизить сложность и времеемкость исследований, а с другой – обеспечить детализацию, необходимую для выявления общих закономерностей функционирования сосновых фитоценозов и закономерностей лесообразовательного процесса в онтогенезе с учетом условий произрастания. 43 ПП (24 – на Куршской косе, 13 – в Смоленском Поозерье и 6 – в Неруссо-Деснянском полесье) в полном объеме отражают типологическое разнообразие сосняков дренированных местообитаний в подзоне хвойно-широколиственных лесов на западе Русской равнины.

**Глава 3. Методы исследования** (33 стр.). Алена Дмитриевна в самом начале главы излагает суть и цель выбранных методов, объясняет, почему для проведения исследований выбран летний сезон. Сбор материала осуществлялся четыре года – с 2017 по 2021 гг.

Лесоводственно-таксационные описания (подраздел 3.1.1 раздела 3.1. «Наземные обследования»), как и камеральная обработка данных (подраздел 3.1.2), выполнялись хорошо апробированными классическими методами и нареканий не вызывают. Нет претензий и к определению объемных запасов древесины и запасов древесины. В тексте приведены формулы расчетов с наглядными примерами по каждому показателю, что позволяет при желании воспользоваться этими методами другим исследователям.

В разделе 3.2. «Аэрофотосъемка БПЛА» описан метод сбора точных высокодетальных данных с помощью БПЛА. Указаны преимущества и технические характеристики используемых аппаратов, программа моделирования полетного задания, приведен пример непосредственного выполнения БПЛА-съемки и её оптимальные параметры (подраздел 3.2.1). Приведены рекомендации по организации работ с учетом сложности рельефа, высоты лесного полога и высоты полета, погодных условий в разное время суток и др. Поэтапно описан процесс обработки изображений от загрузки снимков в приложение до экспорта цифровых моделей местности (ЦММ) и ортофотопланов в растровые форматы (подраздел 3.2.2). Описаны тонкости работы с фотоизображениями и приемы, исключая неточности и

погрешности, способы выравнивания изображений. Диссертантом большое внимание уделялось методам оценки точности натуральных обследований. Для получения объективного представления о структуре древостоев разного состава Аленой Дмитриевной была проведена съёмка 14 дополнительных участков с ПП. Поражает объем собранных фактических данных – более 20 тыс. фотоизображений со средним расчетным разрешением ортофотоплана 5.9 см/пиксель и ЦММ 23.6 см/пиксель, площадь съёмки – не менее 800 га! Для всех ПП определены координаты и зафиксированы реперные точки для корректировки границ.

Самый большой раздел главы – 3.3. *«Автоматическая сегментация ортофотопланов и характеристики древостоев сосновых лесов, полученные с использованием БПЛА-съёмки»* (25 стр.). Такая неравномерность в соотношении подразделов и глав в целом вполне обоснована. Если классические лесоводственно-таксационные методы разработаны давно и широко известны, детально изложены в программных монографиях и многих учебниках, терминология устоялась, то цифровые методы изучения лесов с применением беспилотных летательных аппаратов и математического моделирования еще не получили должного распространения. Единицы современных исследователей обладают глубокими знаниями одновременно в лесных науках и в применении цифровой техники для оценки разных параметров лесных экосистем. К ним относится и А.Д. Никитина. Описывая метод сегментации крон, она подробно, шаг за шагом, рассматривает весь цикл обработки высокочастотных изображений, включающий визуальное дешифрирование (подраздел 3.3.1), создание и настройку алгоритма автоматической сегментации (подраздел 3.3.2) с перечислением этапов работы данного метода. Применяя модель Mask R-CNN для распознавания границ объектов на изображениях, она пришла к выводу о необходимости дообучения нейронной сети и успешно выполнила перенастройку нужных параметров. Ею подобран необходимый набор входных данных для обучения модели (подраздел 3.3.2.1) и подробно описана последовательность этапов и параметры нейронной сети (подраздел 3.3.2.2). Второй включает ещё семь подразделов: 3.3.2.1. *«Создание набора данных для обучения модели»*, 3.3.2.2. *«Обучение модели нейронной сети Mask R-CNN»*, 3.3.2.3. *«Обработка данных, полученных моделью»*, 3.3.2.4. *«Метрики качества модели»*, 3.3.2.5. *«Фильтрация данных сегментации»*, 3.3.2.6. *«Создание итогового векторного слоя»*, 3.3.2.7 *«Результаты автоматической сегментации»*

Совершенное и доскональное знание цифровых технологий, грамотное владение литературным языком, творческий подход к анализу разных методов позволили Алене Дмитриевне лаконично и доходчиво изложить в перечисленных подразделах весь сложный процесс обработки данных БПЛА-съёмки. Описанные ею многие тонкости и приемы обработки данных, объяснение достоинств и недостатки разных методов, несомненно, пригодятся другим исполнителям, планирующим подобные исследования. Так, анализируя качество модели, она обращает внимание на необходимость сбалансированности оценки точности нейронной сети и полноты, подчеркивает важность фильтрации данных, необходимой для исключения проблемы краевых эффектов и крон с неправильной формой, приводит пример расчета алгоритма для удаления повторяющихся крон. Ею разработана последовательная фильтрация, включающая критерии площади (порог = 15) и уровня достоверности (порог = 0.629), с последующими повторами сегментов (порог = 0.5), сокращающая до минимума потерю полноты данных.

Диссертантом показана высокая эффективность применения алгоритма фильтрации при переводе пиксельных координат сегментов в географические с учетом метаданных. Сделан вывод, что после фильтрации полученная модель демонстрирует стабильно высокое качество сегментации для всех возрастных групп сосновых древостоев. Однако, в разных возрастных группах в силу их закономерных различий улучшение качества результатов сегментации после фильтрации неодинаково – в старовозрастных сосняках оно выше, чем в молодняках и средневозрастных. Нередко одновременно с описанием методов, диссертант приводит результаты собственных исследований, сопровождая их сравнительным анализом данных и наглядным иллюстративным материалом, и на их примере показывает преимущество сверточной нейронной сети Mask R-CNN перед другими моделями.

Завершается раздел методов автоматической сегментации описанием методов определения параметров насаждений, полученных с помощью БПЛА-съемки. К ним относятся высоты, число и густота деревьев, сомкнутость, средняя площадь и периметр кроны на ПП, т.е. параметры, которые видимы на ортофотопланах. Они необходимы для последующих расчетов регрессионных моделей основных лесоводственно-таксационных показателей древостоев.

При определении средней высоты диссертант рассмотрела два подхода. Первый, основанный на поиске локального минимума, менее энерго- и времеемкий, не учитывает разнообразия рельефа местности. Алена Дмитриевна обосновала выбор второго – метода, с использованием ЦМР, построенной по плотному облаку, исключая влияние фактора рельефа. Он позволяет обрабатывать снимки как в ручном режиме, так и в автоматическом, а для построения полигональной модели используются только точки земной поверхности.

Также творчески подошла диссертант и к определению числа (густоты) деревьев. Ею были выбраны и подробно описаны два метода: на основе анализа цифровой модели местности и на основе визуальной разметки и автоматической сегментации. Второй метод включает два подхода. При первом подходе моделью учитываются все сегменты (кроны) на ПП. Это приводит к ошибке – учитываются даже деревья, растущие за пределами ПП, но проекции их крон частично заходят на ПП. Для исключения данной погрешности диссертант ввела коэффициент расчета, определяемый как отношение площади доли кроны, заходящей на ПП ко всей площади кроны. Этот метод назван методом сглаженного подсчёта деревьев, а число деревьев в пересчете на 1 га – сглаженной густотой. Сомкнутость и средние площадь и периметр кроны рассчитывались аналогично тому, как они рассчитываются при обычных таксационных исследованиях.

Правильность выбранных современных методов исследований, колоссальный объем полученных данных и выполненной работы по их обработке (визуальное дешифрирование, стратификация и подготовка данных, обучение нейронной сети Mask R-CNN, обработка данных сегментации, оценка качества модели и фильтрация полученных результатов с последующим преобразованием в векторный формат, и многое другое) и статистическому анализу обеспечили высокую точность и достоверность результатов исследований Алены Дмитриевны. Это подтвердила и их статистическая обработка.

В последнем и важном разделе 3.4. «*Статистические методы*» диссертантом описаны используемые методы корреляционного, дисперсионного и регрессивного анализов. Для оценки взаимосвязей между биометрическими параметрами сосновых насаждений ею выбран

коэффициент корреляции Спирмена (подраздел 3.4.1). Для сравнения характеристик различных возрастных групп деревьев внутри и между исследуемыми объектами с целью выявления статистически значимых различий между группами – критерии Манна-Уитни и Краскелла-Уоллиса (подраздел 3.4.2). На завершающем этапе Алена Дмитриевна выполнено регрессионное моделирование (подраздел 3.4.3), позволяющее оценить в количественных показателях запасы углерода, а также основных биометрических и структурных характеристик древостоев, рассчитанных по данным БПЛА-съёмки. В подразделах обоснованы и описаны все использованные подходы и методы статистических анализов, приведены формулы расчетов статистических показателей. В итоге доказана высокая эффективность выбранной и переученной модели Mask R-CNN. Модель продемонстрировала высокое качество сегментации всех возрастных групп, предварительно прошедших фильтрацию данных. Для повышения качества обучающего набора данных Аленой Дмитриевной обосновала снижение высоты полета БПЛА.

Таким образом, А.Д. Никитиной выбраны и при необходимости доработаны до требуемого уровня имеющиеся (базовые) и разработаны свои методы обработки данных, полученных с использованием БПЛА-съёмки. Они обеспечивают высокую точность определения продукционных характеристик сосновых лесов разных возрастных групп в западных районах их распространения. Несомненно, что этот опыт может и должен быть распространен в других регионах и лесных формациях России.

**В главе 4. Связь характеристик сосновых лесов по данным наземных измерений и БПЛА-съёмки** (9 стр.) интерпретируются связи морфометрических и продукционных показателей в исследованных сосняках, определенных разными методами. Такой анализ необходим для оценки и эффективности примененных методов и выбора из них наиболее перспективных для исследований на больших территориях и в других лесных формациях. Глава состоит из двух разделов.

В первом разделе 4.1. *«Соответствие характеристик сосновых лесов по данным наземных измерений и визуального дешифрирования ортофотопланов»* Алена Дмитриевна анализирует результаты связи между важными таксационными показателями (диаметры стволов и число деревьев), измеренными в натуре, и показателями древостоев на ортофотопланах после визуального дешифрирования. Объект исследований – пробные площади в сосняках всех возрастных групп в парке «Смоленское Поозерье». Диссертантом выявлена тесная связь между диаметрами стволов и площадями крон (подраздел 4.1.1. *«Характеристики отдельных деревьев»*). Она более высокая в насаждениях с меньшей густотой. Высказано мнение, что среднюю площадь кроны можно рекомендовать, как один из надежных показателей для моделирования характеристик сосновых фитоценозов. Такой же вывод диссертант делает и в отношении периметра крон, четко отражающего особенности форму и структуру кроны и, как следствие, породный состав древостоя. Анализ связи числа деревьев выполнен в двух вариантах (подраздел 4.1.2 *«Число деревьев»*). Вначале, значения этого показателя, определенные по данным подеревного перечета, сравнивались с его значениями, полученными на основе ЦММ, а затем – на основе визуальной (ручной) разметки БПЛА-съёмки. В расчёте числа деревьев с использованием данных ЦММ диссертант выявила наличие существенной ошибки и наметила пути для поиска решения проблемы в дальнейшем.



Во втором варианте связь значений этого показателя оказалась высокой. Причем, связь между числом деревьев *Pinus sylvestris* оказалась выше (0,81), чем у общего числа деревьев (0,71). Как поясняет Алена Дмитриевна, причина этого заключается в том, что деревья сосны в одинаковых условиях произрастания обладают сходной структурой крон в любом возрасте. Связи других показателей: средней высоты (подраздел 4.2.3) и сомкнутости древостоя (подраздел 4.2.4), рассчитанными методом наземной таксации и с помощью БПЛА тоже оказались высокими для всех возрастных групп, особенно у молодых. Диссертант объясняет этот факт закономерным усложнением структуры крон с увеличением возраста.

В разделе 4.2 «Согласованность результатов визуального дешифрирования и автоматической сегментации Mask R-CNN» выполнен анализ связи таксационных показателей древостоев *Pinus sylvestris* двумя методами: визуального дешифрирования и на основе метода автоматической сегментации моделью Mask R-CNN. Диссертант, используя коэффициент корреляции Спирмена ( $r_s$ ), установила наличие очень высокой связи для всех ключевых показателей с данными, рассчитанными через сегментацию Mask R-CNN:  $r_s$  для числа деревьев самая высокая – 0,97, для средних площади и периметра 0,96 и 0,93 соответственно. Существенно меньшая, но тоже достаточно высокая корреляция у показателя сомкнутости ( $r_s=0,73$ ). При этом она предостерегает от использования коэффициента корреляции Спирмена для прогноза трансформаций лесного сообщества, поскольку это показатель отражает степень связи только между двумя наборами данных и не учитывает воздействия на древостой множества других факторов.

На основании анализа полученных результатов Алена Дмитриевна выявила высокую эффективность метода автоматической сегментации с использованием Mask R-CNN и обосновала целесообразность его использования для инвентаризации и мониторинга лесов.

**Глава 5. Запасы углерода стволовой древесины и структурно-биометрические характеристики древостоев сосновых лесов** (32 стр.). В главе приведены основные результаты изучения вариабельности биометрических (средние высота, диаметр и возраст), структурных (густота и сомкнутость) и продукционных (объем стволов и запас углерода в стволовой древесине) характеристик в возрастных группах сосняков каждой ООПТ. Цель – сравнить показатели, полученные традиционными методами изучения лесов и современными методами регрессионного анализа, основанными на использовании данных БПЛА. Для множественного сравнения применен непараметрический критерий Краскелла-Уоллиса, для попарного сравнения групп – критерий Манна-Уитни. Кроме того, в главе представлены результаты регрессионного моделирования характеристик сосновых древостоев с применением методов MLR, SVM, MLP. Анализ мультиколлинеарности проводился диссертантом с использованием коэффициентов VIF, и он показал, что средняя площадь и средний периметр кроны имеют высокие значения VIF. Поэтому фактор «средний периметр кроны» с наибольшим VIF для множественной линейной регрессии был исключен. В качестве предикторов использовались средняя площадь и периметр кроны, густота, сомкнутость, а также высота, полученная по ЦММ. Дополнительно было рассмотрено моделирование густоты, среднего диаметра и средней высоты для доминирующей породы – *Pinus sylvestris*.

Для оценки различных моделей характеристик сосновых лесов были рассчитаны коэффициенты детерминации ( $R^2$ ), абсолютная (RMSE) и относительная (RMSE, %) ошибки.

среднеквадратичные ошибки для обучающих и валидационных данных.

Глава состоит из трех разделов. Раздел 5.1. «*Биометрические характеристики древостоев сосновых лесов*» содержит детальные характеристики каждой возрастной группы и анализ методов и эффективности моделей в зависимости от возраста и видового состава насаждения. В подразделе 5.1.1. «*Вариабельность биометрических характеристик древостоев сосновых лесов*» последовательно для каждого объекта исследований приводятся описания лесов с подробным перечислением характеристик биометрических показателей (состав, возрастные пределы и медианный возраст, средние диаметр и высота древостоев) отмечаются особенности распределения древостоя внутри возрастных групп и видовой состав древостоев разного возраста на всех исследованных территориях. Рассматривается вклад сосны в биометрические показатели каждой возрастной группы. Диссертант отмечает, что все показатели сосны значимо выше общих для групп, в которых этот вид присутствует. Анализируя видовое разнообразие в возрастных группах лесов, диссертант подчеркивает большое значение многопородности старовозрастных лесов для поддержания биологической устойчивости экосистем и биоразнообразия региона.

С помощью коэффициента Джини диссертант выявила особенности неравенства деревьев по диаметрам (в молодых и средневозрастных лесах оно меньше по сравнению со старовозрастными) и объяснила причину увеличения коэффициента. Она заключается в том, что лесам естественного происхождения с возрастом свойственно увеличение разнообразия видов и дифференциация структуры фитоценозов на разновозрастные поколения и подъярусы.

Интересные данные получены по биометрическим показателям старовозрастных лесов. Диссертант отмечает, что в «Смоленском Поозерье» разница значений средней высоты всего древостоя и древостоя сосны значительно, чем на «Куршской косе», а в аналогичной группе в «Брянском лесу» она ещё выше.

Сравнение результатов оценки биометрических характеристик сосновых лесов, полученных различными методами регрессионного анализа (5.1.2. «*Оценка биометрических характеристик по данным БПЛА-съёмки*») показало высокую эффективность использованных моделей. При этом в оценке возраста лучше всех показала себя отдельная модель множественной линейной регрессии (MLP). Для оценки высоты сосны высокоэффективными оказались все, использованные диссертантом, методы, поскольку данные, полученные с помощью БПЛА, обеспечивают точное отображение высоты верхнего полога, в котором доминирует в основном сосна обыкновенная. При этом диссертант отмечает, что точность оценки зависит от возраста, поэтому важна адаптация моделей к возрастным особенностям исследуемых насаждений.

Предсказание средней высоты оказывается наиболее точным для молодых лесов ( $RMSE = 1$  м), в то время как старовозрастные древостои характеризуются максимальным разбросом. Эти особенности подчёркивают важность адаптации моделей к возрастному разнообразию лесных насаждений. Для повышения точности количественной оценки биометрических параметров при обучении модели необходима представленность различных возрастных групп, а также учёт вариабельности характеристик в пределах схожих возрастных категорий. Алена Дмитриевна провела тщательный анализ использованных методов для всех биометрических

показателей, в том числе с учетом валидации, и показала высокую воспроизводимость результатов, сведенных ею в информативные таблицы.

Интересные выводы сделала диссертант, сравнивая данные космической съемки с данными, полученными с использованием съемки БПЛА (подраздел 5.1.3 «Сравнение результатов определения биометрических характеристик сосновых лесов с использованием данных БПЛА и космической съёмки VHR»). Эти исследования имеют особую актуальность, поскольку при анализе космоснимков используются лесоустроительные материалы. Этим материалов за годы лесоустройства в стране накоплены огромные массивы. Использование их в качестве предикторов при анализе космоснимков имеет большое практическое значение. Разные объемы выборок, разные методы получения исходных данных и разные методы анализа результатов высокодетальной космосъемки и съемки с использованием БПЛА, потребовали от исследователей поиска разных подходов и допущений. В конечном итоге на основе более 250 выделов сосновых насаждений «Куршской косы» были разработаны модели, выявившие высокую тесноту связи между параметрами сосновых лесов, полученными по данным лесоустройства, и их спектрально-текстурными признаками на космических снимках. Это модели средней высоты, среднего диаметра и среднего возраста. Корректность сравнимости результатов обеспечило использование данных БПЛА-съёмки сосновых древостоев разных возрастных групп на территории Куршской косы. Методом «случайного леса» (RE) проведена оценка корреляций между данными визуального дешифрирования крон деревьев и текстурно-спектральными характеристиками лесного покрова, полученными из космоснимков, и выявлена высокая связь между величиной средней площади кроны и характеристиками спутниковых данных.

В разделе 5.2. «Структурные характеристики древостоев сосновых лесов» Алена Дмитриевна провела анализ общей густоты древостоя, густоты сосны обыкновенной, и сомкнутости в разных возрастных группах «Куршской косы», «Смоленского Поозерья» и «Брянского леса» и выявила много интересных закономерностей (подраздел 5.2.1. «Вариабельность структурных характеристик древостоев сосновых лесов»). Так, она установила, что густота древостоя на «Куршской косе» в молодой возрастной группе варьирует в широких пределах, отражая разницу в условиях произрастания. При этом она значительно выше, чем в средне- и старовозрастной группах, но уступает им по величине сомкнутости в «Смоленском Поозерье», где структура лесов отражает долгую историю антропогенного воздействия. Молодые сосновые леса «Смоленского Поозерья» обладают самой высокой сомкнутостью крон (78%), а средневозрастные характеризуются большой разреженностью – их сомкнутость составляет 59 и даже 44% при густоте менее 750 деревьев на гектар. Это значимо меньше по сравнению с лесами аналогичной группы возраста на «Куршской косе» и в «Брянском лесу». Несколько большее значение сомкнутости у старовозрастных древостоев. Диссертант вполне логично объясняет этот факт: с одной стороны с возрастом происходит увеличение плотности и размеров крон основного яруса древостоя, а с другой – увеличение числа деревьев второго яруса. Лесам культурного происхождения тоже присуща бо́льшая сомкнутость, чем естественным. В диссертации не только констатируются приводимые факты, но и объясняются причины различий с учетом экологических условий и позиций онтогенетического развития сообществ.

В подразделе 5.2.2. «*Оценка структурных характеристик по данным БПЛА-съёмки*» диссертант описывает разные методы регрессионного анализа, примененные ею для оценки разных показателей, определенных ею по БПЛА-снимкам. Сравнивая полученные результаты, она пришла к выводу, что не все они и не для каждого показателя обладают высокой эффективностью. Для густоты деревьев самым эффективным оказался метод опорных векторов (SVM). Хорошие результаты показал и многослойный перцептрон с отдельными моделями (MLP); причем лучшими, в том числе и для сосны, оказались оценки MLP с использованием валидационных данных. Со значительными трудностями Алена Дмитриевна столкнулась при оценке сомкнутости деревьев, т.к. сомкнутость методами наземной таксации определяется визуально. Чтобы исключить ошибку, ею была выполнена оценка сомкнутости на ортофотопланах, полученных с помощью дронов. Она пришла к выводу, что такой способ определения сомкнутости вполне самостоятелен и допустим для экологического моделирования. Проанализировав структурные показатели в разных возрастных группах на ключевых объектах, убедительно обосновала преимущества и недостатки всех методов.

В частности, Алена Дмитриевна выявила, что густота деревьев эффективно моделируется с использованием морфометрических параметров, получаемых с помощью БПЛА. Высокую точность в оценке густоты продемонстрировали метод опорных векторов (SVM) и методы множественной линейной регрессии (MLP). Оценка сомкнутости деревьев с помощью MLP показала умеренные результаты, однако она представляет определённые сложности из-за возможной субъективности наземных измерений и может допускать значительные погрешности. Анализируя наблюдаемые и предсказанные значения структурных характеристик сосновых лесов, диссертант пришла к выводу, что модели MLP чаще переоценивают сомкнутость и имеют различные уровни точности в прогнозировании густоты древостоев. Наименьшие ошибки характерны для средневозрастных лесов.

Последний раздел главы – 5.3. «*Объём и запас углерода стволовой древесины древостоев сосновых лесов*» можно считать самым важным. Он состоит из двух подразделов. В подразделе 5.3.1. «*Вариабельность объёма и запаса углерода стволовой древесины древостоев сосновых лесов*» Алена Дмитриевна приводит и сравнивает расчетные значения объемов стволов и запасов углерода в стволовой древесине, анализирует и объясняет причины вариабельности этих характеристик в возрастных группах на каждой из исследованных территорий. Она указывает, что на пробных площадях Куршской косы они варьируют в широких пределах из-за большой разницы в возрасте и разной структуры насаждений, причем в молодняках и старовозрастных леса разброс значений выше, чем в средневозрастных. В «Смоленское Поозерье» возраст молодняков и средневозрастных сосняков более однородный, чем на Куршской косе, и варьирование объемов и запасов углерода в них выражено меньше. Аналогичные тенденции прослеживаются и в госзаповеднике «Брянский лес». Наряду с возрастными особенностями сосновых лесов диссертант рассматривает все возможные причины, влияющие на вариабельность объёма и запаса углерода древесины сосняков. Это и природно-климатические условия исследуемых территорий, и история их освоения с учетом современной хозяйственной деятельности до и после придания охранного статуса, и особенности видовой и пространственной структуры насаждений с учетом их локализации, и влияние сукцессионных процессов. Все рассуждения Алены Дмитриевны логичны, убедительны, подкрепляются статистическими показателями, наглядно демонстрируются на

диаграммах и не дают ни малейшего повода усомниться в обоснованности выводов, как в отношении причин значительного варьирования показателей продуктивности в пределах исследованных территорий, так и в наличии высокого потенциала поглощения углерода лесами в подзоне хвойно-широколиственных лесов Русской равнины.

В начале второго подраздела 5.3.2. «Оценка объёма и запаса углерода стволовой древесины по данным БПЛА-съёмки» сведены в таблицу результаты оценки объёма и запаса углерода стволовой древесины на стадии обучения моделей и при валидации. В поиске метода регрессионного анализа, наиболее эффективного для оценки объёма древесины и запаса углерода в древесине диссертант, как и для других параметров древостоев, опробовала несколько разных методов и пришла к выводу, что наиболее точным оказался многослойный перцептрон с отдельными моделями. Для комплексных экспресс-оценок по мнению диссертанта перспективна и общая модель MLP.

Данная глава, как и все предыдущие, завершается заключением, в котором сжато и четко обобщается содержание главы. И здесь, и во всей работе красной нитью проходит «призыв» диссертанта к тому, что в инвентаризации лесного фонда России необходимо переходить к новым методам учета лесных ресурсов: «...Для повышения точности оценок и сохранения возможности проведения непрерывной пространственной оценки (в отличие от точечных оценок наземных обследований) следует использовать данные высокой детализации, такие как данные спутниковой съёмки VHR и съёмки 145 БПЛА. Это позволит проводить более точную и всестороннюю оценку лесных экосистем на различных территориях...» С этим выводом нельзя не согласиться!

**Выводы диссертации** аргументированы, изложены обстоятельно, четко. В них отражены все поставленные задачи и основные результаты исследований, показана несомненная научная и практическая ценность работы. Они свидетельствуют о том, что основные положения диссертации, вынесенные на защиту, доказаны и подтверждены фактическими данными.

Диссертация и автореферат написаны хорошим литературным языком. Текст легко и интересно читается. Опечатки и стилистические неточности в ней единичны. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, таблицы и рисунки прекрасно оформлены, не перегружены лишними цифрами и деталями, наглядно дополняют рассуждения и выводы автора. Все диаграммы и картосхемы четкие, выполнены в едином стиле, расположены там, где следует. Библиографический список и анализ первоисточников более чем достаточен.

Рукопись дополнена приложениями, в которых содержится колоссальный объем информации. Они оформлены с таким же высоким качеством, что и рукопись диссертации, и вполне могут быть опубликованы в виде Базы данных по сосновым лесам европейской части России и будут полезны для хозяйственного освоения природных ресурсов региона. Научный материал, результаты исследований и выводы существенно дополняют имеющуюся информацию по соснякам России, имеют большое практическое значение. Они представляют интерес для ученых в области экологии растений, лесоведения, преподавателей вузов, и школ.

#### *Замечания и предложения*

- в главе 1 нигде не сказано, что в ней описывается история изученности проблемы;

- последний абзац подраздела 1.1.2. «Экологические особенности сосны обыкновенной» надо перенести в подраздел, где приводится информация о сосновых лесах или назвать подраздел «Эколого-продукционные особенности сосны и сосняков».

- в разделе 2.2 следует выделить подразделы (по аналогии с подразделом 2.1.1) для описаний типов леса на исследуемых территориях, или одинаково выделить начало текста в первых абзацах описаний этих территорий: подчеркиванием, разрядкой или курсивом (... на территории НП «Куршская коса» были заложены ..., Пробные площади НП «Смоленское Поозерье» включают ..., В ГПБЗ «Брянский лес» заложено 6 ПП, ...

- название главы 4 лучше бы изменить на «Анализ связи между характеристиками сосновых лесов по данным наземных измерений и БПЛА-съёмки»

- таблица 4.1. Первую ячейку первого столбца следует назвать «Возрастные группы»

- непонятно, почему в подразделе 3.4.3 вместо рубрикации (3.4.3.1, 3.4.3.2 и т.д.), как в предыдущих подразделах такого ранга, названия более мелких подразделов выделены жирным шрифтом и подчеркиванием.

- учитывая, что защищается диссертант по дисциплине Экология, следовало бы в начало рукописи или в виде разделов в главу «Методы...» включить словарь с формулировкой специальных терминов и понятий (патч, ортофотоплан, валидация, переселекция, предиктор и др.) или при первом упоминании приводить его объяснение. То же самое касается и списка сокращений – его следует перенести в начало (можно составить общий для терминов и сокращений, назвав его «Список терминов и сокращений»). В тексте при первом упоминании приводить полное название показателя, а затем в скобках давать его аббревиатуру.

- значения лесоводственно-таксационных показателей в главе 5 лучше представить в виде таблицы; в текстовом варианте суть авторских разъяснений воспринимается лишь после повторного прочтения

*В тексте очень мало, но есть опечатки.*

- список литературы содержит 166 источников опубликованных на иностранном языке, а во Введении (стр. 8) указано меньше – 161.

- на стр. 72 указано разное число крон в тексте и на диаграмме. Величина валидационного набора крон в тексте равна 1337, на диаграмме № 3.11 – 1334. Так и должно быть?

- вероятно, следует считать опечатками и нумерацию подразделов 4.1.3 и 4.1.4: вместо 1 поставлено 2.

Желательно узнать идеи или наброски диссертанта по разработке методов ДЗЗ и получению VHR с использованием БПЛА для лесных фитоценозов со сложной вертикальной структурой и высокой сомкнутостью крон.

Замечания по диссертации несущественны на фоне очень большой, интересной, обстоятельной и нужной работы и не умаляют достоинств диссертанта.

**Заключение.** Диссертация А.Д. Никитиной «Определение запасов углерода в сосновых древостоях хвойно-широколиственных лесов с использованием данных высокодетаальной съёмки» является законченной научно-исследовательской работой. Диссертант удачно подобрала объекты и обосновала методы исследований, правильно

определила цель и решила все поставленные задачи, показав умение творчески и вдумчиво осмысливать и анализировать полученные данные. Высокий уровень профессиональной подготовки Алены Дмитриевны позволяет ей на должном уровне проводить научные исследования и интерпретировать любой из полученных результатов, подтверждая биологические закономерности математически, а математические – с экологических позиций.

Диссертационная работа Алены Дмитриевны Никитиной соответствует всем критериям, изложенным в пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама автор, безусловно, заслуживает присвоения искомой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.15 – экология (биологические науки)

Официальный оппонент:

доктор биол. наук (03.00.05 – ботаника),

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

690022, г Владивосток,

проспект 100-летия Владивостоку

e-mail: tat.moskaluk@mail.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»:

<https://biosoil.ru>

« 26 » августа 2024 г.

Москалюк Татьяна Александровна

Подпись Москалюк Т.А. заверяю  
Ученый секретарь  
ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН  
к.б.и. А.П. Тюнин