

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Агапитова Егора Михайловича «Пространственно-временная динамика и депонирование углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале в условиях современного изменения климата», представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Диссертационная работа посвящена количественной оценке пространственно-временной структуры популяции лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и её роли в депонировании углерода в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале с использованием наземных измерений и данных дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения. Верхняя граница леса на Полярном Урале является классическим полигоном для изучения раннего отклика древесной растительности на современное изменение климата, и переход от качественных оценок динамики к количественным оценкам фитомассы и запасов углерода представляет несомненный научный и практический интерес.

Таким образом, выполненная работа логично продолжает многолетние исследования климатогенной динамики верхней границы леса на Полярном Урале и заполняет важный пробел, связанный с оценкой фитомассы и депонирования углерода лиственничных древостоев на основе индивидуального учёта деревьев и данных БПЛА.

Новизна диссертации заключается в создании и валидации методического комплекса (от полевых измерений до ГИС-картографирования и углеродных расчётов), который впервые позволил получить детальные количественные характеристики возрастной структуры и оценку запасов фитомассы и углерода в насаждениях лиственницы сибирской в высокоширотном горном экотоне на основе данных БПЛА. Предложенная методика позволяет оперативно оценивать фитомассу и запас углерода лиственничных древостоев без сплошной таксации. Картосхема возрастных поколений и пространственного распределения деревьев даёт инструмент для отслеживания продвижения лиственницы в тундру и оценки темпов лесообразовательного процесса во времени в результате климатических изменений.

Методологическая основа работы представляет собой хорошо продуманную комбинацию полевых биометрических измерений, дендрохронологических данных, фотограмметрической обработки аэрофотоснимков и математико-статистического моделирования. В целом методика представляется современной, целостной и тщательно проработанной.

Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, заключение, список сокращений, библиографический список (294 источника, включая 41 иностранный) и приложение. Структура работы соответствует требованиям к кандидатским диссертациям и логично отражает ход исследования.

Во **введении** обоснована актуальность исследований реакции верхней границы леса на современное изменение климата, обозначены «белые пятна» в области количественных оценок фитомассы и депонирования углерода в экотоне,

сформулированы цель и четыре взаимосвязанные задачи, чётко выделены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой широкий обзор литературы, охватывающий историю развития аэрофотосъёмки и дистанционных методов (от первых опытов Надара до современных БПЛА и нейросетей). Рассмотрены подходы к изучению верхней границы леса в разных регионах (Урал, Алтай, Кавказ, Саяны, Альпы), вклад уральской научной школы. Отдельно освещены методы количественной оценки фитомассы и аллометрические модели.

Во **второй главе** детально охарактеризован район исследований, его геологическое строение, климат, растительный покров. Описана программа работ, включающая закладку 9 круговых пробных площадей, наземные измерения биометрических параметров лиственницы (высота, диаметр шейки корня, диаметр кроны, возраст), а также аэросъёмку с БПЛА DJI Phantom 4. Подробно изложена фотограмметрическая обработка в Agisoft Metashape, создание ортофотоплана и процедура валидации ручного дешифрирования крон с участием четырёх операторов (с применением ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002). Методический аппарат полностью соответствует современному уровню и адекватен поставленным задачам. Особую ценность представляет проработка вопросов воспроизводимости и согласованности дешифрирования. Эта глава диссертации демонстрирует хорошее владение современным инструментарием.

Третья глава посвящена реконструкции возрастных поколений популяции лиственницы на основе анализа распределения радиусов крон и статистического выделения трёх возрастных интервалов. Автор последовательно выводит параметры распределений для групп 1–10, 11–40 и >40 лет. Установлено, что трехпараметрическое распределение Вейбулла наилучшим образом описывает вариабельность данного признака в рамках каждого из трех выделенных возрастных интервалов (1–10, 11–40, более 40). С использованием этих порогов по ортофотоплану дешифрировано 88 608 экземпляров лиственницы и построена картосхема распределения возрастных поколений. Показано, что молодое поколение (1–10 лет) активно заселяет горную тундру, но концентрируется вокруг взрослых деревьев (источников семян и защиты). Глава отличается высокой степенью новизны – впервые предложен и верифицирован вероятностный метод отнесения деревьев к возрастным группам по аэроснимкам, а также указаны особенности использования дешифровки данных с БПЛА.

В **четвёртой главе** реализован комплексный подход: на основе радиуса кроны по нелинейной регрессионной модели рассчитан диаметр шейки корня для каждого из 88 608 деревьев, затем – надземная и подземная фитомасса по опубликованным региональным аллометрическим уравнениям. С использованием углеродного коэффициента 0,5 и пересчёта в CO₂-эквивалент получены суммарные показатели для участка исследований: запасы общей фитомассы и запасов углерода в лиственнице. Впервые выполнено распределение накопленного углерода по возрастным поколениям: деревья старше 40 лет (22,5% от числа особей) аккумулируют 93,37% углерода, что имеет прямое прикладное значение для оценки бюджета углерода в древесных видах в различных климатических и эдафических условиях. Глава завершается обсуждением ограничений моделей машинного обучения и обоснованием выбора параметрической регрессии для экстраполяции.

Полученные результаты доказывают, что разработанный комплекс методик обеспечивает объективный и количественный переход от выборочных наземных

измерений к сплошной оценке возрастной структуры и запасов углерода в листовидных редколесий в экотоне верхней границы леса.

В заключении сформулированы выводы, соответствующие цели работы и поставленным задачам. Они логично вытекают из содержания работы и хорошо подкреплены фактическим материалом.

Автореферат в полной мере отражает цели, задачи, структуру и основные результаты диссертационной работы и соответствует ее содержанию.

В целом диссертационная работа производит впечатление методически выверенного и содержательно завершенного исследования. Вместе с тем по существу работы возникает ряд вопросов и замечаний, которые преимущественно носят дискуссионный характер и касаются, главным образом, способов представления и интерпретации полученных данных.

В частности, в названии и формулировке цели используется термин «депонирование углерода», в то время как в расчётной части фактически оценивается текущий запас углерода в биомассе лиственницы. Это не снижает ценности полученных результатов, однако при дальнейшем развитии темы целесообразно чётче разграничивать термины «запас углерода» и «депонирование» как процесс его накопления во времени.

Цель заявлена как анализ пространственно-временной динамики и депонирования углерода «в условиях современного изменения климата», однако в приведённой диссертации не видно использования реальных климатических рядов и строгой статистической увязки с ними (корреляции, регрессии, анализ чувствительности). В результате акцент смещается к детальному описанию пространственной структуры и запасов углерода, а климатогенный аспект (как именно изменение климата количественно отражается в динамике популяции и углеродного запаса) остаётся преимущественно качественным.

Обзор литературы избыточно перегружен историческими деталями и недостаточно сфокусирован на трёх ключевых для диссертации направлениях – современных методах БПЛА-таксации, аллометрии и углеродном балансе верхнегорных лесов и строгой климатической интерпретации динамики лиственницы или других древесных пород, произрастающих на верхней границе леса. Автор перечисляет множество работ, но почти не даёт их сравнительной оценки. Какие методы лучше решают задачу реконструкции возрастных поколений? Каковы типичные ошибки при дешифрировании крон в экотоне? Какие модели фитомассы наиболее адекватны для лиственницы в суровых условиях?

В конце обзора литературы также отсутствует проблемно-ориентированного резюме – не сформулирован явный перечень нерешённых вопросов, которые и привели автора к постановке цели и задач. Это снижает методологическую ценность обзора.

Вопрос по объёму и репрезентативности полевой выборки. 9 площадок радиусом 11 м – это суммарно ~0,34 га, тогда как анализируется 886 га по БПЛА. Это нормальный порядок для аллометрии, но создаёт риск того, что модель радиус–диаметр и возрастная структура «натянуты» на большие площади с неоднородными условиями (микротопография, экспозиция, влажность). Насколько эти 9 площадок покрывают весь спектр условий внутри 886 га (экспозиции, плотность, микрорельеф и т.д.)?

Как автор обосновывает использование упрощённого углеродного коэффициента 0,5 (50% от фитомассы), если в диссертации указано, что для

лиственницы в зависимости от возраста коэффициент варьирует от 0,423 до 0,523? В работе не проведён анализ чувствительности итоговых оценок запаса углерода к выбору этого коэффициента, хотя применение фиксированного значения может давать погрешность порядка $\pm 10\%$.

В диссертации, несмотря на детальное описание процедуры межоператорной валидации ручного дешифрирования крон (по ГОСТ Р ИСО 5725-2) и приведённые показатели согласованности операторов, отсутствует анализ того, как вариабельность распознавания крон (по числу деревьев и размерам крон) влияет на итоговые оценки фитомассы и запаса углерода. Соответственно отсутствует расчёт разброса запасов углерода в древостоях по результатам дешифрирования разными операторами и/или сценарный анализ чувствительности (например, при пропуске части деревьев или систематическом изменении радиуса крон), что не позволяет количественно оценить вклад ошибок дешифрирования в общую неопределённость расчётов запасов углерода.

В таблице 4.2 главы 4 не показаны доверительные интервалы для оценок фитомассы и углерода, особенно по возрастным группам и для всей совокупности деревьев. Для задач углеродного учёта это критично.

В диссертации отсутствует сравнение полученных оценок фитомассы/углерода с результатами применения других аллометрических моделей. Соответственно возникает вопрос насколько разработанная модель лучше остальных?

Выводы, представленные в заключении диссертации избыточно подробны и многочисленны. Часть выводов имеет описательный характер и во многом повторяет формулировки методики, тогда как для усиления научной составляющей целесообразно было бы в большей степени акцентировать количественные результаты и выявленные закономерности.

Высказанные вопросы, замечания и комментарии носят преимущественно дискуссионный характер и не снижают высокого научного и методического уровня диссертации Агапитова Егора Михайловича. Представленная работа является завершённым научным исследованием и вносит значительный вклад в развитие подходов к количественной оценке популяционной структуры и запасов углерода в лиственничных древостоях на верхней границе леса Полярного Урала. Полученные результаты создают методическую и фактическую основу для дальнейшего изучения пространственно-временной динамики лиственничных сообществ в условиях текущего изменения климата, включая количественный анализ вертикального и горизонтального продвижения верхней границы леса. Предложенные подходы открывают возможности для совершенствования методов дистанционной оценки запасов фитомассы и углерода в древостоях горных и приполярных территорий, что имеет большое значение для мониторинга климатогенных перестроек экосистем.

Материалы диссертации были неоднократно апробированы на научных конференциях. Основные результаты исследования опубликованы в 14 научных работах, в том числе три статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и (или) Scopus.

Таким образом, диссертационная работа «Пространственно-временная динамика и депонирование углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале в условиях современного изменения климата» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским

диссертациям Положением о присуждении ученых степеней (пп. 9–11, 13, 14), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2021 г. № 426, а её автор Агапитов Егор Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация.

Официальный оппонент:

Доктор биологических наук,
заведующий лабораторией
геоботаники и растительных ресурсов
Уфимского Института биологии –
обособленного структурного
подразделения Федерального
государственного бюджетного
научного учреждения Уфимского
федерального исследовательского
центра Российской академии наук.

Докторская диссертация защищена по
специальности 1.5.9 – Ботаника.

Почтовый адрес – 450054 г. Уфа,
проспект Октября, 69; телефон/факс:

+7 (347) 235-62-47; E-mail:

shirpa@mail.ru;

сайт: <http://ufaras.ru>

Павел Сергеевич Широких

24.04.2026 г.

Подпись Широких П.С. заверяю
Ведущий специалист ОК

Саттарова С.П.

