

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию «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 одной из наиболее актуальных проблем современной экологии и климатологии – изучению климатогенной динамики лесотундровых сообществ, произрастающих в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале. Автором предложен комплексный подход, сочетающий наземные измерения, данные дистанционного зондирования при помощи БПЛА и математико-статистическое моделирование для анализа пространственно-временной динамики и депонирования углерода лиственницей сибирской.

Впервые разработана методика определения возрастных поколений лиственницы сибирской по радиусу горизонтальной проекции кроны с использованием оценки плотности вероятности распределения. На основе дешифрирования аэроснимков сверхвысокого разрешения создана картосхема распределения более 88 тысяч деревьев по возрастным поколениям в экотоне верхней границы леса. Также проведена количественная оценка фитомассы и депонирования углерода для всех экземпляров лиственницы на площади более 7 км<sup>2</sup>, включая дифференциацию по возрастным группам, что позволяет судить о вкладе каждого поколения в общий углеродный пул.

Предложенный методологический подход может быть использован для аналогичных исследований в других горных системах. Практическая значимость заключается в возможности применения разработанных моделей

и методик для экологического мониторинга особо охраняемых природных территорий и при реализации лесоклиматических проектов, направленных на оценку связывания углерода при естественном возобновлении на верхней границе леса. Полученные количественные оценки запаса углерода могут быть использованы в региональной системе углеродного учета.

Сформулированные автором положения, выносимые на защиту, отражают ключевые результаты исследования: от обоснования возможности оценки диаметра ствола по радиусу кроны до картосхемы пространственного распределения возрастных поколений и количественной оценки запаса углерода. Все положения логически вытекают из поставленных цели и задач и имеют достаточное эмпирическое и статистическое обоснование.

Научные результаты докладывались и обсуждались на 8 конференциях. Результаты исследований опубликованы в 14 научных работах, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ.

Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, заключение, список сокращений, библиографический список (294 источника, в том числе 41 на иностранных языках) и одно приложение. Текст иллюстрирован 14 рисунками и 3 таблицами.

**В первой главе** диссертации приводится детальный обзор литературы, охватывающий историю развития аэрофотосъемки, применения БПЛА, методов дешифрирования и анализа данных, включая использование спектральных индексов, текстурных характеристик и алгоритмов машинного обучения. Рассмотрены ключевые исследования верхней границы леса в различных горных системах России с акцентом на работы уральской научной школы. Анализируются подходы к оценке фитомассы и депонирования углерода.

**Глава 2** содержит подробную физико-географическую характеристику района исследований. Приведена программа исследований, включающая 8 блоков работ (от анализа литературы до оценки фитомассы).

**Глава 3.** Установлено, что трехпараметрическое распределение Вейбулла наилучшим образом описывает вариабельность радиуса кроны для каждого из трех возрастных интервалов. На основе дешифрирования 88608 крон создана картосхема распределения возрастных поколений, которая наглядно демонстрирует, что молодые особи преимущественно располагаются вокруг деревьев старших возрастных групп, что подтверждает роль последних как источников обсеменения и защиты. Соотношение численности поколений свидетельствует о стабильном уровне естественного возобновления.

**Глава 4** посвящена разработке и сравнению трех регрессионных моделей зависимости диаметра ствола у шейки корня от радиуса кроны. Обоснован выбор параметрической нелинейной модели для экстраполяции за пределы обучающей выборки, что критически важно для масштабирования на всю популяцию. С использованием аллометрических уравнений для надземной и подземной фитомассы и стандартного углеродного коэффициента рассчитаны запасы фитомассы и углерода.

В разделе «Заключение» сосредоточены все основные выводы глав диссертационной работы.

Диссертация представлена на высоком научном уровне в развитии теоретического представления о лиственных лесах, развивающихся в современных условиях меняющегося климата. Однако, при ознакомлении с работой возникли ряд замечаний и вопросов:

1. Во второй главе диссертации указано, что для наземных измерений были заложены пробные площади на трёх трансектах в градиенте густоты древостоев. Из текста неясно: как именно в пределах каждой трансекты выбирались три точки для пробных площадей (случайным образом, равномерно по высотному градиенту или по визуальной оценке сомкнутости крон); учитывались ли при выборе микрорельеф, почвенные условия, снеговой режим, которые могут сильно варьировать в пределах экотона? Без описания этих принципов не исключена возможность субъективного отбора,

что может повлиять на репрезентативность выборочных данных при построении регрессионных моделей.

2. В работе на протяжении всего текста используется термин «верхняя граница древесной растительности», однако его определение отсутствует. Не пояснено, что именно автор считает этой границей на местности. Рекомендуется в подобных работах явно формулировать определение и критерии выделения.

3. В разделе 2.3 автор сообщает, что на пробных площадях проводились измерения высоты деревьев, диаметра ствола у шейки корня, диаметра на высоте 1,3 м, а также диаметра кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Однако в тексте диссертации (включая главу 3, главу 4 и приложение А) не приводятся сводные статистики (средние, дисперсии, объемы выборок). Отсутствие исходных данных затрудняет оценку репрезентативности выборочной совокупности, проверку воспроизводимости результатов и возможность независимого построения альтернативных моделей. Рекомендуется добавлять такие данные в текст диссертации или в отдельное приложение с детальными таблицами.

4. В диссертации все ключевые математико-статистические модели — зависимость диаметра ствола от радиуса кроны и распределение Вейбулла для возрастных интервалов — построены на основе наземных измерений, выполненных на 9 круговых пробных площадях (радиусом 11 м каждая). Автор не приводит общее количество учтённых на них экземпляров лиственницы. Это вызывает вопрос о статистической обоснованности и точности такой экстраполяции.

5. Использование единого массива данных для построения регрессионных моделей и распределения Вейбулла, не проверяя, есть ли систематические различия между площадями внутри трансект. Если такие различия существенны, то простое объединение данных без учёта стратификации может исказить параметры моделей и завязать степень обобщения на всю территорию. Неизвестно, попали ли в выборку

экстремальные по размерам кроны дерева (как аномально крупные, так и карликовые формы), которые могут существенно влиять на параметры нелинейной регрессии. Отсутствие анализа того, насколько выборка репрезентирует всё пространство признаков (радиус кроны, возраст, диаметр), снижает доверие к экстраполяции.

6. В диссертации основным источником данных о пространственном распределении лиственницы сибирской служат аэроснимки сверхвысокого разрешения, полученные с беспилотного летательного аппарата в 2018 г. Однако в работе полностью отсутствует анализ разновременных спутниковых изображений (например, серии Landsat или Sentinel-2), которые позволили бы провести ретроспективную оценку многолетней динамики верхней границы древесной растительности. Между тем в первой главе диссертации приведён обширный обзор использования спутниковых данных для мониторинга верхней границы леса в разных регионах. Отсутствие сравнения разновременных спутниковых снимков приводит к невозможности количественно оценить скорость смещения верхней границы в прошлые десятилетия – работа даёт лишь современный «срез» без привязки к более ранним этапам потепления (например, к его активизации в 1970–1980-е гг.). Не проводится калибровка возрастных поколений по архивным снимкам – автор реконструирует возраст деревьев только по радиусу кроны на момент 2018 г., но не сверяет эти данные с реальной динамикой появления новых особей на более ранних изображениях (например, на космоснимках 1990-х или 2000-х гг., которые могли бы зафиксировать молодые деревья, в настоящее время достигшие возраста 11–40 лет).

Указанное замечание не перечёркивает ценности разработанной методики картирования по БПЛА, но снижает полноту анализа пространственно-временной динамики, заявленной в теме диссертации.

7. Оценка углерода выполняется путём последовательного расчёта: радиус кроны – диаметр шейки корня – надземная и подземная фитомасса – масса углерода. Ошибка каждой модели накапливается, но итоговые

интервальные оценки в таблице 4.2 («нижний порог» и «верхний порог») приведены без пояснения метода их получения. Неясно, учитывают ли эти интервалы только стандартную ошибку конечной модели или включают неопределённости всех предшествующих этапов, включая ошибку дешифрирования крон и ошибку определения возраста (при распределении по поколениям).

8. В таблице 4.2 значения фитомассы приведены как пример – 1355,2 т, с интервальными оценками от 1257,4 до 1457,3. При этом в тексте (стр. 75 заключения) указано «1355,2 ± 0,1». Очевидно, погрешность не может составлять ±0,1 т при объёмах фитомассы более тысячи тонн и при всех источниках ошибок. Вероятно, ±0,1 – это опечатка или результат неверного округления. Следовало бы указать реалистичную погрешность.

9. Вся территория исследований имеет площадь 7,32 км<sup>2</sup>. Запасы фитомассы и углерода представлен для объекта исследования площадью 7,32 км<sup>2</sup>. Однако нигде не представлены запасы в переводе на гектар. Отсутствие данного перевода затрудняет сравнение с другими исследованиями углеродного пула в аналогичных экотонах. Рекомендуется дополнительно представить удельные показатели на единицу площади.

Данные замечания не опровергают основных результатов диссертации, носят дискуссионный характер, и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Е.М. Агапитова «Пространственно-временная динамика и депонирование углерода лиственницей сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале в условиях современного изменения климата» является завершённым, самостоятельно выполненным научным исследованием, содержащим решение актуальной научной задачи – разработки методического подхода к индивидуальной оценке возрастной структуры и углерододепонирующей функции лиственничных редколесий на основе комбинации наземных измерений, данных БПЛА и математического моделирования. Полученные результаты

имеют существенное значение для лесоведения, экологии и климатической политики.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, объему и достоверности полученных результатов диссертация соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Агапитов Егор Михайлович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата биологических наук по специальности 4.1.6 – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация.

Отзыв подготовил: Вьюхин Сергей Олегович, кандидат сельскохозяйственных наук (4.1.6 «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»), научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий ФГБУН Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта д. 202, т. 89826027789, sergey.vyuhin@mail.ru

Вьюхин С.О.

Я, Вьюхин Сергей Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

06.05.2026 г.

Согласие Вьюхина С.О. заверено  
Начальник отдела кадров ИЭРиЖ  
06.05.2026

