

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/8>

УДК 630*5:630*52:528.8:519.6(98)



Моделирование таксационных характеристик насаждений сухопутной территории Арктики с использованием аллометрических уравнений и данных дистанционного зондирования

Зинаида А. Харитонова ✉, zvekshina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>
Сергей В. Коптев, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация

Исследование направлено на разработку комплексного подхода к оценке таксационных характеристик (запас, средние диаметр и высота) притундровых насаждений сухопутной территории Арктики. Методология основана на интеграции данных государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) за 2021 год с материалами аэрофотосъёмки высокого разрешения 2022 года. В работе адаптированы классические аллометрические модели Уоды, Рейнеке и Хильми для условий притундровых лесов и редкостойной тайги для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) V класса бонитета. Показатель степени в уравнениях зафиксирован на теоретическом уровне - 0.5, что позволило вычислить региональные константы моделей. Для определения ключевого параметра моделей – густоты древостоя выполнено дешифрирование аэрофотоснимков с использованием стереоскопического анализа в среде PHOTOMOD. Получены адаптированные параметры уравнений: для запаса древостоев ($c_1=3279.63$, $R^2=0.816$), среднего диаметра ($c_2=404.76$, $R^2=0.703$) и средней высоты ($c_3=298.47$, $R^2=0.550$). Апробация модели Уоды на контрольных участках выявила систематическое расхождение с данными ГИЛ, что объясняется необходимостью точного учета полноты насаждений при переходе от данных дистанционного зондирования к таксационным показателям. Практическая значимость работы заключается в создании методической основы для дистанционной инвентаризации лесных ресурсов труднодоступных арктических территорий, позволяющей сократить объём дорогостоящих наземных работ.

Ключевые слова: моделирование, аллометрические модели, аэрофотосъёмка высокого разрешения, таксация леса, сухопутная зона Арктики, таксационные параметры

Финансирование: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 123022800118–4).

Благодарности: авторы благодарят Архангельский филиал ФГБУ «Рослесинфорг» за предоставленные материалы пробных площадей ГИЛ, рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Харитонова, З. А. Моделирование таксационных характеристик насаждений сухопутной территории Арктики с использованием аллометрических уравнений и данных дистанционного зондирования / З. А. Харитонова, С. В. Коптев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 113–126. – Библиогр.: с. 122–125 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/8>.

Поступила 11.02.2025. Пересмотрена 11.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Article

Modeling of the taxation characteristics of tree stands in the Arctic land area using allometric equations and remote sensing data

Zinaida A. Kharitonova ✉, zvekshina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>
Sergey V. Koptev, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

The research is aimed at developing an integrated approach to assessing the taxation characteristics (stock, average diameter and height) of tundra stands in the Arctic land area. The methodology is based on the integration of data from the State Forest Inventory (SFI) for 2021 with high-resolution aerial photography in 2022. The paper adapts the classical allometric models of Woda, Reinecke and Hilmi for the conditions of tundra forests and rare-coniferous taiga for Siberian spruce stands (*Picea obovata* L.) of the V class of bonity. The exponent in the equations is fixed at the theoretical level of -0.5, which made it possible to calculate the regional constants of the models. To determine the key parameter of the models, the density of the stand, aerial photographs were decoded using stereoscopic analysis in the PHOTOMOD program. Adapted parameters of the equations were obtained: for the stand stock ($C_1=3279.63$, $R^2=0.816$), the average diameter ($c_3=404.76$, $R^2=0.703$) and the average height ($c_2=298.47$, $R^2=0.550$). Testing of the Uoda model at control sites revealed a systematic discrepancy with the SFI data, which is explained by the need to accurately account for the relative density of stands when switching from remote sensing data to taxation parameters. The practical significance of the work lies in the creation of a methodological framework for remote inventory of forest resources in hard-to-reach Arctic territories, which makes it possible to reduce the amount of expensive ground work.

Keywords: modeling, allometric models, high-resolution aerial photography, forest taxation, Arctic land area, taxation parameters

Funding: The publication is based on the results of research carried out as part of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution "North Research Institute of Forestry" to conduct applied scientific research in the field of the Federal Forestry Agency (registration number of the topic: 123022800118-4).

Acknowledgments: The authors thank the Arkhangelsk branch of FGBU "Roslesinforg" for providing the Forest sample plots data State Forest Inventory (SFI), authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Kharitonova Z. A., Koptev S. V. (2026). Modeling of the taxation characteristics of tree stands in the Arctic land area using allometric equations and remote sensing data. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 113–126 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/8>.

Received 11.02.2026.

Revised 15.02.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Мониторинг лесных ресурсов сухопутной территории Арктики представляет собой сложную научно-практическую задачу, обусловленную труднодоступностью, низкой продуктивностью и уязвимостью притундровых экосистем.

Согласно лесорастительному районированию [1], леса Архангельской области относятся к 2 зонам и 3 лесным районам. При этом 12,3% их площади занимают притундровые леса и редкостойная тайга [2]. Данная территория входит в состав Арктической зоны РФ [3], что подчеркивает её экологическую ценность и сложность мониторинга из-за труднодоступности.

Специфика притундровых лесов, выражающаяся в замедленных процессах роста, высокой уязвимости и сложности мониторинга, отмечается рядом исследователей [4-6].

Актуальность настоящей работы обусловлена комплексом научно-практических задач, связанных с масштабами лесоучетных работ на труднодоступных территориях лесов. В этих условиях традиционные методы наземной таксации становятся экономически нецелесообразными, что актуализирует развитие дистанционных методов оценки лесного фонда. Д.Ю. Капиталинин и др. (2024) [7] отмечают, что материалы спутниковой съёмки демонстрируют значительный потенциал для решения задач таксации леса.

На современном этапе для изучения труднодоступных территорий перспективна интеграция данных государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), спутниковых технологий и наземных наблюдений для моделирования продуктивности, и динамики лесов [8-11].

Информация с постоянных пробных площадей (ППП) служит незаменимым эталоном для калибровки и верификации дистанционных методов. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка моделей, связывающих таксационные показатели с характеристиками, дешифрируемыми по снимкам. Исследования демонстрируют эффективность использования данных аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения и материалов с БПЛА для оценки структуры древостоев. В.К. Хлюстов и др. (2021) [11] отмечает инвентаризацию леса, как один из основных методов получения объективных данных о состоянии лесного фонда России на основе сети ППП, что устанавливает методологическую базу для исследований на основе данных с применением различных методов.

Л.В. Стоноженко и К.А. Жирнова (2021) [12] в своих исследованиях проводили сравнительную оценку методов наземной таксации, инвентаризации и съемки с БПЛА для выделения однородных участков леса, выявляли корреляционные зависимости между размерами кроны и ствола, а также оценивали точность ортофотопланов на основе данных отдельных деревьев. А. Р. Dalla Corte др (2020) [13] доказывает эффективность автоматизированного дешифрирования для оценивания индивидуальных параметров деревьев с высокой точностью, что является основой для перехода к оценке характеристик всего древостоя.

Особое методологическое значение в этом контексте имеют аллометрические модели, устанавливающие количественные связи между различными параметрами деревьев и насаждений.

Классические работы, такие как правило 3/2 (модель Йоды) и производные от него зависимости Рейнеке и Хильми, представляют собой теоретическую основу для оценки запаса, среднего диаметра и высоты по густоте древостоя.

Современные исследования в области лесной биометрии и дистанционного зондирования активно развивают направление интеграции аллометрических уравнений с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для целей крупномасштабной оценки фитомассы и запаса древесины. Так, А. Не и соавторы (2018) [14] на примере бореальных лесов демонстрируют высокую точность разработанных аллометрических уравнений при оценке наземной биомассы кустарникового яруса. В свою очередь, О. Fradette

с коллегами (2021) [15] обосновывают целесообразность использования аллометрических моделей, включающих показатели высоты и диаметра, для повышения точности оценки биомассы ветвей, что особенно значимо при фракционировании фитомассы.

Параллельно ведётся разработка комплексных параметрических моделей, учитывающих множественные связи между диаметром ствола, высотой дерева и шириной кроны, а также прогнозирующих динамику запаса в зависимости от видового состава древостоев. Особого внимания заслуживает подход, предложенный В.А. Усольцевым (2025) [16], который заключается в построении аллометрических зависимостей между параметрами крон деревьев, дешифрируемыми по данным ДЗЗ, и таксационными характеристиками древостоев. Данный подход открывает возможности для оперативного определения таксационных показателей без проведения трудоёмких наземных измерений, что существенно повышает эффективность лесоинвентаризационных работ на региональном уровне.

Y. Wu и др. (2023) [17] подчеркивают перспективность метода оценки запаса древостоя на основе аллометрической модели роста и данных ДЗЗ, который обладает высокой точностью и оперативностью при оценке таксационных показателей на труднодоступных территориях.

D. Djak (2025) [18] рассматривает метод прогнозирования изменений запаса древостоев с учетом видового состава и возрастной динамики, что показывает возможность комплексного подхода к моделированию таксационных характеристик, основанный на данных государственной инвентаризации лесов и подтверждает перспективность оценки запаса на основе аллометрической модели роста и данных ДЗЗ.

Однако для арктических лесов притундровой зоны сохраняется пробел в адаптированных аллометрических моделях и методиках, комплексно связывающих данные с постоянных пробных площадей ГИЛ и ДЗЗ для оценки таксационных характеристик.

Цель исследования – разработка моделей оценки основных таксационных характеристик насаждений (запаса, средних диаметра и высоты) ели сибирской (*Picea obovata* L.) притундровых лесов Арктической зоны Архангельской области на основе интеграции данных ГИЛ и снимков высокого разрешения с применением адаптированных аллометрических моделей.

Задачи исследования:

Сформировать репрезентативную базу таксационных данных на основе материалов ГИЛ для притундровых ельников V класса бонитета.

Адаптировать константы (c_1 , c_2 , c_3) аллометрических моделей Йоды, Рейнке и Хильми для заданных условий.

Выполнить дешифрирование аэрофотоснимков высокого разрешения для определения густоты древостоя на контрольных таксационно-дешифровочных участках.

Разработать алгоритм оценки таксационных показателей, на основе адаптированных аллометрических моделей и данных дистанционного зондирования.

Провести предварительную верификацию разработанной методики дистанционной оценки таксационных характеристик насаждений, на основе адаптированных аллометрических моделей и данных аэрофотосъемки высокого разрешения путём сравнения расчётных значений с эталонными данными государственной инвентаризации лесов (ГИЛ).

Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны насаждения Архангельской области сухопутной зоны Арктики. К этой зоне отнесен Мезенский муниципальный район.

Исследуемые притундровые насаждения представлены ненарушенными коренными сообществами. Они формируют смешанные по составу древостои. При доминировании в нем ели сибирской (*Picea obovata* L.), присутствуют всегда сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), береза пушистая (*Betula pubescens* L.), реже лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.).

Древостои средне- и низкопродуктивные. Они относятся, в основном, к IV-Va классам бонитета. Относительная полнота находится в диапазоне 0,4-0,6. Число растущих деревьев ели в древостоях различных типов леса изменяется в пределах 120-450 шт/га.

В качестве предмета исследования были выбраны характеристики (средняя высота, средний диаметр насаждений, определенный по числу стволов на единице площади, запас) насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) и их связь с параметрами аллометрических моделей и данными ДЗЗ.

В качестве исходных данных использовались материалы ГИЛ, полученные на территории Мезенского лесничества в 2021 году. Из общего массива была сформирована выборка, включающая 131 постоянную пробную площадь (ППП) и 38 таксационно-дешифровочных участков (ТДУ), соответствующих критерию: наличие в составе древостоя ели сибирской (*Picea obovata* L.) в качестве преобладающей или сопутствующей породы. Для каждого объекта из базы ГИЛ были извлечены базовые таксационные показатели: запас

(M), сумма площадей сечения (G), относительная полнота (p), средняя высота (h), средний диаметр (d). Данная выборка составила эмпирическую основу для последующего моделирования.

Для оценки таксационных характеристик по густоте древостоя была применена система аллометрических моделей, основанная на правиле самоизреживания (правило 3/2). В его частных формах это правило выражается зависимостями Йоды (для запаса), Рейнке (для среднего диаметра) и Хильми [19] (для средней высоты) от количества деревьев на единице площади.

Исследования А.А. Михайловой (2018) [20] с использованием данной закономерности систематически подвергались экспериментальной проверке, которые подтвердили ее основополагающую корректность с учетом статистически незначимых расхождений с теоретически прогнозируемыми величинами.

В нашем исследовании система аллометрических уравнений, 3/2 (модель Йоды), предполагает аллометрическую зависимость, которая связывает число деревьев и общий (суммарный) запас на единице площади.

Параметры древостоя, с преобладанием ели сибирской (*Picea obovata* L.) были отобраны и сгруппированы по типам леса, бонитету и классам возраста. На основе отобранных данных по ели сибирской (*Picea obovata* L.) была проверена зависимость для расчета общего запаса на единице площади (M) вида:

$$M = c_1 N_{\text{ст}}^{-1/2}, \quad (1)$$

где M – общий запас на единице площади, м³/га;
 c_1 – константа, новая постоянная, безразмерная величина, множитель;
 N – количество деревьев, шт./га.

Густота, рассчитанная по данным с пробных площадей, используется для калибровки моделей. Расчет густоты для каждой площади проводился по формуле (2) на основе суммы площадей сечения и средней площади сечения ствола.

Поскольку данные ГИЛ не содержат прямых измерений количества деревьев на каждом участке, густота (N) для калибровки моделей была рассчитана через сумму площадей сечений исредней площади сечения ствола по известным в таксации формулам (2,3):

$$N_{\text{ст}} = \frac{G_{\phi}}{g_m}, \quad (2)$$

где N – число стволов на 1 га, шт./га;
 G_{ϕ} – фактическая сумма площадей сечений, м²/га;
 g_m – средняя площадь сечения, м².

В этом случае фактическая полнота насаждения определялась через относительную полноту и сумму площадей сечений при полноте 1,0.

$$G = pG_{1,0}, \quad (3)$$

где G – сумма площадей сечений;
 p – относительная полнота насаждения;
 $G_{1,0}$ – сумма площадей сечений, при полноте 1,0, м²/га.

Чтобы исключить существенные отклонения от истинных значений, рассмотренные параметры аллометрических моделей, полученных на основе пробных площадей ГИЛ было необходимо сделать уточнения с учетом теоретических степеней для нормальных насаждений. Полученные параметры были приведены к условиям нормального древостоя, с использованием формул приведения и учета бонитета.

В рамках общей теории, связанной с правилом 3/2, можно выделить два важных частных следствия, которые выражаются через правила Рейнеке и Хильми, устанавливающие связь между плотностью древостоя и его средними таксационными показателями - высотой и диаметром.

Так как данные пробных площадей и таксационно-дешифровочные участки ГИЛ получены инструментальным методом с фиксацией координат деревьев, что позволяет получить расчетные параметры древостоев (плотность и другие) с достаточной точностью.

При обработке данных показатель степени (α) в аллометрических зависимостях был зафиксирован на уровне -0.5 в соответствии с их теоретической основой (правило 3/2). Фиксация этого параметра позволила вычислить искомые региональные коэффициенты c_1 , c_2 и c_3 методом регрессионного анализа. Показатель степени в моделях устанавливался путем проведения регрессионного анализа на основании набора исходных данных в исследовании. Таким образом, были определены параметры уравнения Йоды для расчёта запаса и уравнения Хильми для оценки средней высоты нормальных древостоев по данным о густоте.

Были адаптированы и апробированы частные случаи аллометрического правила-зависимости Рейнеке (для среднего диаметра), которая выражается уравнением (4) и Хильми (для средней высоты) от числа стволов на единицу площади ($N_{ст}$), уравнение (5).

$$h = c_2 N_{ст}^{-1/2} \quad (4)$$

$$d = c_3 N_{ст}^{-1/2}, \quad (5)$$

где c_2 и c_3 – соответствующие константы.

С использованием инструментов регрессионного анализа в MS Excel по массиву данных для ельников V класса бонитета были оценены константы c_1 , c_2 , c_3 в уравнениях (1), (4), (5). В результате для запаса, средней высоты и среднего диаметра получены адаптированные значения констант, характеризующие специфику роста ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровых условиях. Графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рисунках 2-4.

Полученные теоретические зависимости были апробированы на материалах аэрофотосъемки. Основной задачей на этом этапе стала экспериментальная проверка применимости правила 3/2 для оценки запаса насаждений через показатель густоты. Для этого потребовалось определить количество деревьев на единицу площади непосредственно по снимкам. В работе использовались аэрофотоснимки высокого разрешения 2022 года.

Обработка материалов аэрофотосъемки и создание ортофотоплана выполнены в программе ScanEx IMAGE Processor. Обработка стереоизображений на изучаемую территорию проведена в программе PHOTOMOD 8.

Анализируемая площадь представляет собой небольшую территорию, поэтому основные таксационные характеристики исследуемой территории были установлены дешифровочным методом в стереорежиме. Был составлен проект в PHOTOMOD с ортофотопланом изучаемой территории и импортированы геопривязанные ППП, которые представлены на рисунке 1.

Для апробации полученных параметров уравнения Йоды были использованы таксационные данные деревьев с нескольких пробных площадей ГИЛ.

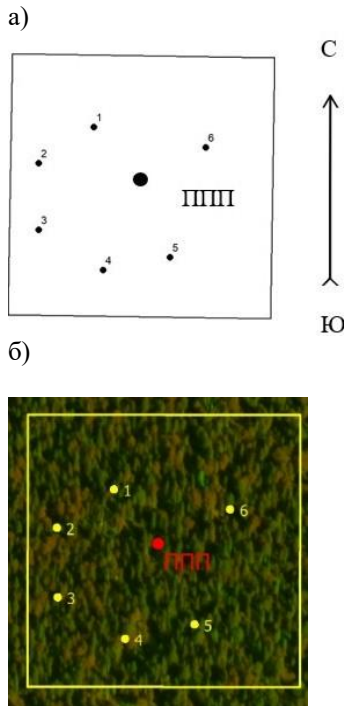


Рисунок 1. Схема размещения таксационно-дешифровочных участков на пробной площади: а) схематический чертеж, б) геопривязанное размещение со снимком высокого разрешения в координатах WGS-84

Figure 1. The layout of the taxation and decryption sites on the test area: a) schematic drawing, b) geo-linked placement with a high-resolution image in coordinates WGS-84

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Дешифрирование данного аэрофотоснимка заключалось в сверке с данными пробных площадей ГИЛ и последующее определение густоты насаждения на каждой из них.

Существует множество способов для определения густоты древостоя [21]. В рамках нашего исследования для определения количества деревьев по каждой пробной площади производился сплошной подсчет деревьев, расположенных в границах геопривязанных площадок. Выполнена верификация подсчёта на часть участков по стереомодели по наземным данным.

В таблице 4 представлен фрагмент результатов перечета деревьев по ортофотоплану, на основании которых проводилась апробация полученных параметров уравнения Йоды.

В последующем определялась густота древостоя на 1 га, путем деления полученного количества деревьев на площадь ТДУ.

Рассчитанные по предлагаемой методике величины общего запаса насаждений на единице

площади были сравнены с данными пробных площадей о густоте насаждения, определенной по аэрофотоснимку.

Важным этапом исследования являлось определение относительной полноты насаждений для каждой пробной площади. Для ее определения использовали при дешифрировании стереорежим. Последовательность действий по определению относительной полноты в программе PHOTOMOD предусмотрена инструкцией для дешифрирования насаждений. Выделим ключевые моменты методики. В процессе дешифрирования выполняется визуальная оценка относительной площади, занимаемой проекциями крон деревьев на общую площадь таксационного дешифровочного ТДУ. Анализ подлечат свободные от проекций крон участки, видимые на изображении.

Сомкнутость полога определялась автоматически в среде PHOTOMOD путем наложения регулярной сетки точек и расчета доли точек, попавших в проекции крон. В притундровых насаждениях наличие в пологе остроконечных крон (ель) создает эффект более низкой полноты. Так как еловым насаждениям свойственна разновысотность и некоторые кроны еловых насаждений на изображении могут быть скрыты берёзой. Недочет скрытых на снимках деревьев может приводить к ошибкам. Переход от сомкнутости полога к относительной полноте осуществлялся с помощью эмпирического коэффициента, полученного по данным обучающей выборки.

Поэтому важным элементом методики является обязательное использование наземных данных обучающей выборки с пробных площадей для установления локальных эмпирических поправок, связывающих дешифрируемые признаки с реальными таксационными показателями.

На завершающем этапе для каждой пробной площади на основе данных инвентаризации были определены возраст насаждений и класс бонитета (по средней высоте и возрасту). Итоговый расчет общего запаса проводился с использованием правил 3/2, Рейнеке и Хильми, а также табличных данных (таблицы 1-3).

Результаты

В результате регрессионного анализа данных ППП государственной инвентаризации лесов для притундровых насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) Архангельской области были получены адаптированные параметры уравнений: для запаса древостоев ($c_1=3279.63$, $R^2=0.816$), среднего диаметра ($c_2=404.76$, $R^2=0.703$) и средней высоты ($c_3=298.47$, $R^2=0.550$), которые связывают таксационные показатели с густотой древостоя для 5 класса бонитета (таблицы 1-3).

Полученные эмпирические уравнения статистически значимы ($p < 0.05$) и позволяют адекватно оценивать таксационные показатели в исследованном диапазоне количества деревьев на единицу площади (200–1000 дер./га), которые представлены на рисунках 2-4.

Наилучшее соответствие эмпирическим данным, согласно коэффициенту детерминации, R^2 , демонстрирует модель для диаметра ($R^2=0.7028$). Для запаса и высоты дисперсия составила 0.663 и 0.550 соответственно. Модель для объема дерева показала средний уровень зависимости от густоты ($R^2=0.663$).

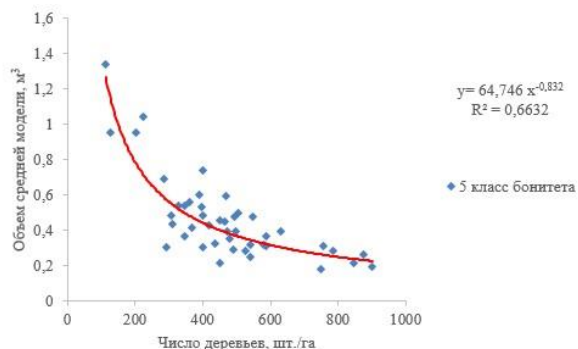


Рисунок 2. Зависимость объема средней модели дерева от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 2. Dependence of the volume of the average tree model on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

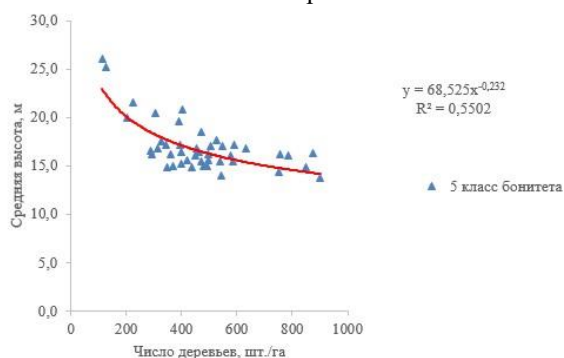


Рисунок 3. Зависимость среднего диаметра от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 3. Dependence of the average diameter on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

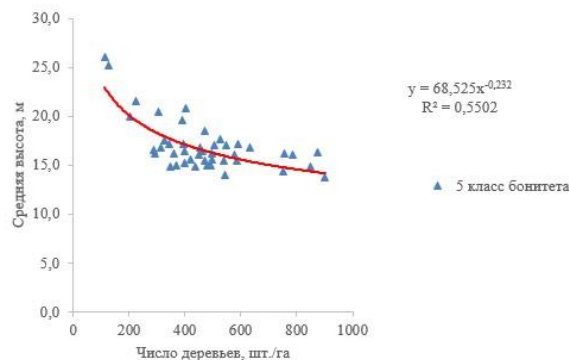


Рисунок 4. Зависимость средней высоты от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 4. Dependence of the average height on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

Таблица 1

Параметры аллометрической модели Йоды ($\alpha = -0.5$) для оценки общего запаса нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 1

Parameters of the Yoda allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating total stock of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_1	R_2
V	3279	0,816

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 2

Коэффициенты аллометрической модели Рейнеке ($\alpha = -0.5$) для оценки среднего диаметра нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 2

Coefficients of the Reineke allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating mean diameter of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_3	R_2
V	405	0,703

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 3

Коэффициенты аллометрической модели Хильми ($\alpha = -0.5$) для оценки средней высоты нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 3

Coefficients of the Hilmi allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating mean height of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_2	R_2
V	298	0,550

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Результаты пересчета деревьев на ТДУ по аэрофотоснимку

Table 4

Results of tree counting on TDU based on aerial photographs

Номер пробы Sample number	Количество деревьев, шт. Number of trees, pcs
12335001	481
12404301	755
12406701	396
12417101	490
12402101	632

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Сравнение таксационных показателей, рассчитанных по аллометрическим моделям на основе данных ДЗЗ, с эталонными данными ГИЛ

Table 5

Comparison of stand characteristics calculated from allometric models based on remote sensing data with the ground truth data of the State Forest Inventory

Данные ГИЛ data from the State forest inventory	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м ³ /га Plant stock, m ³ /ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
		м ³ /га m ³ /ha	%	см cm	%	м m	%
	12402101	125,3		18,8		14,8	
	12404301	70,4		15,0		13,0	
	12406701	121,3		18,4		15,2	
	12417101	164,5		19,2		14,8	
Результаты расчетов	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м ³ /га Plant stock, m ³ /ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
		м ³ /га m ³ /ha	%	см cm	%	м m	%
	12402101	119,2		20,1		13,1	
	12404301	74,9		13,7		11,4	
	12406701	132,6		20,0		14,6	
	12417101	154,8		20,5		16,3	
Отклонения по запасу, средним по диаметру и высоте	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м ³ /га Plant stock, m ³ /ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
		м ³ /га m ³ /ha	%	см cm	%	м m	%
	12402101	6,1	-4,9	1,3	6,9	1,7	-11,5
	12404301	4,5	6,4	1,3	-8,7	1,6	-12,3
	12406701	11,3	9,3	1,6	8,7	0,6	-3,9
	12417101	9,7	-5,9	1,3	6,8	1,5	10,1

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Обсуждение

Проведённое исследование позволило адаптировать классические аллометрические модели (Йоды, Рейнке, Хильми) для оценки таксационных характеристик низкопродуктивных ельников V класса бонитета сухопутной зоны Арктики по данным ГИЛ. Апробация методики на контрольных участках выявила как её потенциал, так и систематические источники погрешности, требующие детального рассмотрения.

Сравнение расчётных значений с эталонными данными ГИЛ, представленными в таблице 5 показывает, что модель наиболее точно оценивает запас: абсолютные отклонения составили 4,5–11,3 м³/га (–5,9...+9,3%). Для среднего диаметра ошибки находятся в диапазоне 1,3–1,6 см (–8,7...+8,7%), что коррелирует с наибольшим коэффициентом детерминации ($R^2=0,703$) среди адаптированных зависимостей.

Наибольшие относительные расхождения характерны для оценки средней высоты (до $\pm 12,3\%$), что подтверждается низкой объясняющей способностью модели Хильми ($R^2=0,550$). Это указывает на специфику роста деревьев в экстремальных климатических условиях Арктики. Зависимости демонстрируют, что высота деревьев в притундровых насаждениях в меньшей степени регулируется внутривидовой конкуренцией

Заключение

Таким образом, получены адаптированные константы (c_1 , c_2 , c_3), которые количественно отражают сниженную продуктивность северных лесов, а предложенный алгоритм демонстрирует перспективность для предварительной оценки запаса.

Однако для оперативного применения методики необходимы: учёт смешанного состава (породное дешифрирование или введение

(густотой) и в большей – возрастом и условиями местопрорастания.

Показатель степени в уравнениях был зафиксирован эмпирически -0.5 для обеспечения сопоставимости с классическими работами и сохранения биологического смысла правила 3/2.

Отметим ключевое ограничение, что исследуемые насаждения формируют смешанные по составу древостои, в которых доминирует ель сибирская (*Picea obovata* L.), присутствует всегда сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), береза пушистая (*Betula pubescens* L.), реже лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.). Адаптированные модели были выведены для ели, однако дешифрирование густоты по снимкам проводилось для всего древостоя. Это напрямую влияет на все рассчитываемые по моделям параметры, так как густота является ключевой переменной в уравнениях. Это приводит к систематическому завышению входного параметра в уравнения (1, 4, 5) и, как следствие, к смещению оценок.

Модели калиброваны для нормальных (полнотных) древостоев, в то время как реальная относительная полнота исследуемых насаждений составляет 0,4–0,6. Применение моделей для данных насаждений без поправки на полноту закономерно приводит к ошибке.

поправочных коэффициентов); разработка более точной модели перехода от сомкнутости к полноте для данного типа насаждений; апробация на существенно расширенной выборке контрольных участков для статистически значимой.

Перспективы развития данного подхода связаны с его дальнейшим совершенствованием и всесторонней апробацией на расширенной выборке данных притундровых лесов сухопутной зоны Арктики.

Список литературы

1. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации от 18.08.2014 № 367 (ред. от 02.08.2023) // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/ff850d27514bc742e55aa77db5c6ac1998f0a75e/ (дата обращения: 15.01.2026). – Текст: электронный.
2. Об утверждении Лесного плана Архангельской области: Указ Губернатора Архангельской области от 14.12.2018 № 116-у (ред. от 15.12.2021) // Официальный интернет-портал правовой информации Архангельской области. – URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=123136569&page=1&rdk=1#I0 (дата обращения: 30.01.2025). – Текст: электронный.
3. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 (ред. от 05.03.2020) // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/ (дата обращения: 15.01.2026). – Текст: электронный.

4. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Производительность и возобновление насаждений притундрового леса в Республике Коми // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2022. – № 6(58). – С. 71-77. – DOI: <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2022-6-71-77>.
5. Гаврильева Л.Д. Воздействие геологоразведочных работ на растительность подзоны притундровых лесов // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 5. – С. 28-31. – DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-28-31>.
6. Богданов А.П., Третьяков С.В., Цветков И.В. Оценка точности определения запаса в молодняках и средневозрастных древостоях по результатам наблюдений на стационарных объектах в Мурманской области различными способами // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 5. – С. 13-18. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38035>.
7. Капиталинин Д.Ю., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 251. – С. 62-77. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.62-77>.
8. Бердов А.М., Федоров С.В., Приставко А.А. Анализ результатов первого цикла государственной инвентаризации лесов и предложения по совершенствованию методики ее проведения во втором цикле // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 3. – С. 67-80. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06>.
9. Порядок проведения государственной инвентаризации лесов (утвержден приказом Минприроды России от 14.11.2016 – № 592). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420383930> (дата обращения: 12.01.2026).
10. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов (утверждены приказом Рослесхоза от 10.11.2011 № 472, в редакции приказа Рослесхоза от 15.03.2018 № 173). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902325555> (дата обращения: 12.01.2026).
11. Хлюстов В.К., Ганихин А.М., Хлюстов Д.В. Новая методика и аналитическая система дистанционной инвентаризации лесов // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 2. – С. 51-63. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37574>.
12. Стоноженко Л.В., Жирнова К.А. Синхронизация наземных и дистанционных методов исследования лесных насаждений // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 3(50). – С. 62-68. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561163>.
13. Dalla Corte A.P., Souza D.V., Rex F.E., Sanquetta C.R., Mohan M., Silva C.A., Zambrano A.M.A., Prata G., Almeida D.R.A., Trautenmüller J.W., Klauberg C., Moraes A., Sanquetta M.N., Wilkinson B. & Broadbent E.N. *Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes*. Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
14. He A., McDermid G.J., Rahman M.M., Strack M., Saraswati S. & Xu B. *Developing Allometric Equations for Estimating Shrub Biomass in a Boreal Fen*. Forests. 2018; 9 (9): 569. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090569>.
15. Fradette O., Marty C., Tremblay P., Lord D. & Boucher J.-F. *Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in Afforested Open Woodlands with Black Spruce and Jack Pine, in the Eastern Canadian Boreal Forest*. Forests. 2021; 12 (1): 59. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12010059>.
16. Усольцев В.А. *Модели для оценки диаметра стволов деревьев и древостоев лесообразующих видов Северной Евразии по морфометрии крон и полога*. Лесоведение. – 2025.- Т.3.- С. 304–320. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114825030022>.
17. Wu Y., Mao Z., Guo L., Li C. & Deng L. *Forest Volume Estimation Method Based on Allometric Growth Model and Multisource Remote Sensing Data*. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023; 16: 8900–8912. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3313251>.
18. Dijk J. *Predicting Timber Board Foot Volume Using Forest Landscape Model and Allometric Equations Integrating Forest Inventory Data*. Forests. 2025; 16 (3): 543. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030543>.

19. Хильми Г.Ф. Теоретическая биогеофизика леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 205 с.
20. Михайлова А.А., Вагизов М.Р. Методика обработки данных дистанционного зондирования земли с применением информационных технологий и аллометрических зависимостей для определения лесотаксационных показателей древостоев // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 4. – С. 80-85. – URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36729>.
21. Руководство по таксации лесов дешифровочным способом: метод. положения лесного стереоскопического дешифрирования аэрокосмических изображений (снимков) / сост.: В.И. Архипов, В.И. Басков, В.А. Белов, В.И. Березин, Д.М. Черниковский; под общ. ред. Д.М. Черниковского. – Санкт-Петербург: ООО «Леспроект», 2021. – Ч. 1–4. – [2] 99 с.

References

1. On approval of the List of Forest Vegetation Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 367 dated 18.08.2014 (ed. 02.08.2023). ConsultantPlus. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/ (accessed: 15.01.2026).
2. On approval of the Forest Plan of the Arkhangelsk Region: Decree of the Governor of the Arkhangelsk Region No. 116-u dated 14.12.2018 (ed. 15.12.2021). Official Internet Portal of Legal Information of the Arkhangelsk Region. http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=123136569&page=1&rdk=1#10 (accessed: 30.01.2025).
3. On the Land Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation: Presidential Decree No. 296 dated 02.05.2014 (ed. 05.03.2020). ConsultantPlus. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/ (accessed: 15.01.2026).
4. Pakhuchiy, V. V., & Pakhuchaya, L. M. (2022). Proizvoditel'nost' i vozobnovlenie nasazhdeniy pritundrovogo lesa v Respublike Komi [Productivity and regeneration of forest-tundra forest stands in the Komi Republic]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 6(58), 71–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2022-6-71-77>.
5. Gavrilieva, L. D. (2022). Vozdeystvie geologorazvedochnykh работ na rastitel'nost' podzony pritundrovyykh лесов [Impact of geological exploration on vegetation of the forest-tundra subzone]. *Problemy regional'noy ekologii*, 5, 28–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-28-31>.
6. Bogdanov, A. P., Tretyakov, S. V., & Tsvetkov, I. V. (2023). Otsenka tochnosti opredeleniya zapasa v molodnyakakh i srednevozrastnykh drevostoyakh po rezul'tatam nablyudeniya na stacionarnykh ob'yektakh v Murmanskoy oblasti razlichnymi sposobami [Accuracy assessment of determining the growing stock in young and middle-aged stands based on observations at stationary plots in the Murmansk region by various methods]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 5, 13–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.38035>.
7. Kapitalinin, D. Yu., Sidorenkov, V. M., & Achikolova, Yu. S. (2024). Otsenka kachestva taksatsii po rezul'tatam lesotaksatsionnogo deshifirovaniya dannykh sputnikovoy s'yemki Sentinel-2 [Quality assessment of forest inventory based on results of forest inventory interpretation of Sentinel-2 satellite imagery data]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 251, 62–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.62-77>.
8. Berdov, A. M., Fedorov, S. V., & Pristavko, A. A. (2020). Analiz rezul'tatov pervogo tsikla gosudarstvennoy inventarizatsii лесов i predlozheniya po sovershenstvovaniyu metodiki ee provedeniya vo vtorom tsikle [Analysis of the results of the first cycle of the state forest inventory and proposals for improving the methodology for its implementation in the second cycle]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 3, 67–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06>.
9. Poryadok provedeniya gosudarstvennoy inventarizatsii лесов [Procedure for Conducting State Forest Inventory] (approved by Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 592 dated 14.11.2016). ConsultantPlus. <https://docs.cntd.ru/document/420383930> (accessed: 12.01.2026).

10. Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu gosudarstvennoy inventarizatsii lesov [Methodological Recommendations for Conducting State Forest Inventory] (approved by Order of the Federal Forestry Agency No. 472 dated 10.11.2011, as amended by Order No. 173 dated 15.03.2018). ConsultantPlus. <http://docs.cntd.ru/document/902325555> (accessed: 12.01.2026).
11. Khlustov, V. K., Ganikhin, A. M., & Khlustov, D. V. (2021). Novaya metodika i analiticheskaya sistema distantsionnoy inventarizatsii lesov [New methodology and analytical system for remote forest inventory]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2, 51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37574>.
12. Stonozhenko, L. V., & Zhirnova, K. A. (2020). Sinkhronizatsiya nazemnykh i distantsionnykh metodov issledovaniya lesnykh nasazhdeniy [Synchronization of ground and remote methods for studying forest stands]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 8(3), 62–68. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561163>.
13. Dalla Corte, A. P., Souza, D. V., Rex, F. E., Sanquetta, C. R., Mohan, M., Silva, C. A., Zambrano, A. M. A., Prata, G., Almeida, D. R. A., Trautenmüller, J. W., Klauber, C., Moraes, A., Sanquetta, M. N., Wilkinson, B., & Broadbent, E. N. (2020). Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
14. He, A., McDermid, G. J., Rahman, M. M., Strack, M., Saraswati, S., & Xu, B. (2018). Developing Allometric Equations for Estimating Shrub Biomass in a Boreal Fen. *Forests*, 9(9), 569. <https://doi.org/10.3390/f9090569>.
15. Fradette, O., Marty, C., Tremblay, P., Lord, D., & Boucher, J.-F. (2021). Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in Afforested Open Woodlands with Black Spruce and Jack Pine, in the Eastern Canadian Boreal Forest. *Forests*, 12(1), 59. <https://doi.org/10.3390/f12010059>.
16. Usoltsev, V. A. (2025). Modeli dlya otsenki diametra stvolov derev'ev i drevostoev lesobrazuyushchikh vidov Severnoy Evrazii po morfometrii kron i pologa [Models for estimating stem diameter of trees and stands of forest-forming species in Northern Eurasia based on crown and canopy morphometry]. *Lesovedenie*, 3, 304–320. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114825030022>.
17. Wu, Y., Mao, Z., Guo, L., Li, C., & Deng, L. (2023). Forest Volume Estimation Method Based on Allometric Growth Model and Multisource Remote Sensing Data. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 8900–8912. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3313251>.
18. Dijak, J. (2025). Predicting Timber Board Foot Volume Using Forest Landscape Model and Allometric Equations Integrating Forest Inventory Data. *Forests*, 16(3), 543. <https://doi.org/10.3390/f16030543>.
19. Khil'mi, G. F. (1957). Teoreticheskaya biogeofizika lesa [Theoretical Biogeophysics of the Forest]. Izdatel'stvo AN SSSR. (In Russ.).
20. Mikhailova, A. A., & Vagizov, M. R. (2018). Metodika obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli s primeneniem informatsionnykh tekhnologii i allometricheskikh zavisimostei dlya opredeleniya lesotaksatsionnykh pokazatelei drevostoev [Methodology for processing remote sensing data using information technologies and allometric dependencies to determine forest taxation indicators of stands]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 4, 80–85. (In Russ.). <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36729>.
21. Arkhipov, V. I., Baskov, V. I., Belov, V. A., Berezin, V. I., & Chernikhovskiy, D. M. (Comp.). (2021). Rukovodstvo po taksatsii lesov deshifrovochnym sposobom: metodicheskie polozheniya lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovaniya aerokosmicheskikh izobrazheniy (snimkov) [Guidelines for Forest Inventory by Interpretation Method: Methodological Provisions for Forest Stereoscopic Interpretation of Aerospace Images]. Part 1–4. OOO «Lesproekt». (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Харитоновна Зинаида Александровна* – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», ул. Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID:<https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>, e-mail: zvekshina@mail.ru.

Коптев Сергей Викторович – доктор с.-х. наук, зав. кафедрой лесоводства и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», ул. Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Zinaida A. Kharitonova* – post graduate student of department of silviculture and forest management, Arkhangelsk North (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>, e-mail: zvekshina@mail.ru.

Sergey V. Koptev – Dr. Sci. (Agric.), Head of silviculture and forest management department, Arkhangelsk North (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author