

*Оригинальная статья*

УДК 630\*181.7:528.88(470.31)

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6>

## **Определение закономерных связей таксационных показателей с применением данных дистанционного зондирования земли на примере сосновых древостоев Новгородской области**

**А.А. Иванов<sup>1,2</sup>**, andrey.ivanov.1998@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-1411-8222>

**С.В. Коптев<sup>3</sup>**, s.koptev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

<sup>1</sup>*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41, Великий Новгород, 173003, Российская Федерация; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

<sup>3</sup>*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация; e-mail: s.koptev@narfu.ru*

В статье рассматривается проблема актуализации данных лесоустройства, так как настоящее время большая их часть содержит в себе данные, полученные 10 и более лет назад. Также ситуация усугубляется из-за плохой транспортной доступности лесов, что усложняет проведение лесоустройства классическими методами. Нами предложена технология получения таксационных данных (средних высот, диаметров и запасов насаждений) комбинированным способом с применением материалов дистанционного зондирования и использованием устоявшихся закономерных связей между количеством деревьев в насаждении и искомыми показателями, которые были выведены учеными в виде аллометрических уравнений ещё в начале прошлого столетия. Исходные данные дистанционного зондирования Земли были получены с беспилотного летательного аппарата самолетного типа. Благодаря этому в результате обработки данных съемки были получены ортофотопланы сверхвысокого качества (менее 5 см/пиксель), что является важным фактором для повышения точности определения количества деревьев. В данной работе применена методика автоматизированного подсчета количества деревьев, разработанная в среде математического моделирования, которая в настоящий момент проходит апробацию. Для выявления закономерных связей таксационных показателей насаждений были подвергнуты апробации правила Рейнеке, Уоды и Хилми, которые ранее в работах ученых показали сравнительно высокую степень точности определения таксационных данных. По результатам расчетов, проведенных для сосновых насаждений, данные по запасу и среднему диаметру оказались в пределах допустимых погрешностей. Данные по высоте деревьев, имели значительное отклонение, которое можно нивелировать введением дополнительного коэффициента, так как при расчетах для нескольких исследуемых участков ошибки были равными. В работе приведены коэффициенты, применение которых в уравнениях закономерных связей позволяет получать таксационные показатели дистанционным методом. По результатам работы можно прийти к выводам, что дальнейшее развитие технологий дистанционного зондирования Земли, последующее изучение закономерных связей между таксационными показателями деревьев и увеличение выборки исследований позволят разработать методики лесоустройства насаждений, которые помогут сократить издержки и сроки выполнения работ по актуализации лесного фонда России.

**Ключевые слова:** лесоустройство, закономерные связи, число деревьев, запас насаждений, средний диаметр, средняя высота, дистанционное зондирование Земли, аллометрические уравнения, таксационные показатели

**Для цитирования:** Иванов А.А., Коптев С.В. Определение закономерных связей таксационных показателей с применением данных дистанционного зондирования Земли на примере сосновых древостоев Новгородской области // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 95-108. – Библиогр.: с. 105-107 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6>.

*Поступила 23.06.2025. Пересмотрена 12.10. 2025. Принята 30.11.2025. Опубликована онлайн 26.12.2025.*

*Article*

## Determination of natural connections of taxation parameters using remote sensing data on the example of pine stands in the Novgorod region

**Andrey.A. Ivanov<sup>1,2</sup>**, andrey.ivanov.1998@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-1411-8222>

**Sergey.V. Koptev<sup>3</sup>**, s.koptev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

<sup>1</sup>*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Bolshaya Sankt Peterburgskaya st., 41, Velikiy Novgorod, 173003, Russian Federation; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

<sup>3</sup>*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: s.koptev@narfu.ru*

### Abstract

The article deals with the problem of updating forest inventory data, since currently most of them contain data obtained 10 or more years ago. The situation is also aggravated by poor transport accessibility of forests, which complicates the implementation of forest inventory using classical methods. The author proposes a technology for obtaining main taxation parameters (average heights, diameters and stocks of stands) in a combined way using remote sensing materials and well-established relationships between the quantity of trees and the desired parameters, which were derived by scientists into allometric equations at the beginning of the last century. The initial Earth remote sensing data were obtained from an aircraft-type unmanned aerial vehicle. Due to this, ultra-high-quality orthophotoplans (less than 5 cm/pixel) were obtained as a result of processing the survey data, which is an important factor for improving the accuracy of trees number determining. In this paper, we use a technique for automated counting of the trees number, developed in a mathematical modeling environment, which is currently being tested. In order to identify the regular relationships between the main parameters of stands, the Reinecke, Yoda and Hilmi rules were tested, which previously showed a relatively high degree of accuracy in determining the taxation parameters in the works of scientists. According to the results of calculations carried out in pine stands, the data on the growing stock and average diameter turned out to be within the margin of error. The data obtained on the height of the trees had a bigger deviation, which can be offset by introducing an additional coefficient, since the errors were equal when calculating several studied areas. The paper presents coefficients, the use of which in the equations of regular relationships allows to obtain taxation parameters by remote method. Based on the results of the work, it can be concluded that the further development of remote sensing technologies, the subsequent study of the natural relationships between the main taxation parameters of trees and an

increase in the sampling of studies will allow the development of forest inventory methods that will help reduce costs and deadlines for updating the Russian forest fund.

**Keywords:** *forest management, natural connections, counting the quantity of trees, volume stand, mean diameter, mean height, remote sensing of the Earth, allometric equations, regression analysis, cruise indicators*

**For citation:** Ivanov A.A., Koptev S.V. (2025) Determination of natural connections of taxation parameters using remote sensing data on the example of pine stands in the Novgorod region. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 95-108 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6>.

**Received** 23.06.2025. **Revised** 12.10.2025. **Accepted** 30.10.2025. **Published online** 26.12.2025.

## **Введение**

Согласно обновленному государственному лесному реестру на 2024 год площадь лесов России достигает 1,19 млрд га. В настоящее время общий спрос на актуальные лесоустроительные данные о лесах интенсивного освоения оценивается примерно в 300 млн га. [1]. Лесоустройство включает в себя комплекс мероприятий, одним из которых является оценка таксационных параметров лесных насаждений и должно проводиться на регулярной плановой основе с периодичностью проведения работ в границах земель лесного фонда один раз в 10 лет (для зоны интенсивного освоения лесов). Однако, на территории, составляющей более 80% площади земель лесного фонда Российской Федерации, лесоустройство проводилось более 10 лет назад. Особо следует отметить субъекты Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, где доля материалов лесоустройства давностью более 16 лет достигает 93,3 и 96,6 % соответственно [2, 3].

Таким образом, приведенные данные подчеркивают необходимость проведения масштабной работы по обновлению информации о лесах и созданию актуальной базы данных в том числе с использованием дистанционных методов и моделирования [4].

В данной работе предлагается новый подход к использованию материалов ДЗЗ для оценки таксационных параметров отдельных участков лесных насаждений с применением комбинации технологии автоматизированного расчета количества деревьев и аллометрических связей, определенных по средствам применения

региональных таблиц хода роста насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Для бореальных лесов Европейской части России исследования инвентаризации лесов на основе данных ДЗЗ и моделирования проводились в основном в направлении применения спектральных вегетационных индексов, классификации изображений, особенностей рельефа, для системы государственной инвентаризации лесов. [Черниховский Д.М, 2014, 2015, 2017].

## **Объект и методы исследования**

В качестве объекта исследования был выбран квартал № 62 Пролетарского участкового лесничества, Новгородского лесничества. Фрагмент плана лесонасаждений представлен на рисунке 1.

Свежие данные лесоустройства, которые использовались для сопоставления с полученными результатами и также данные объекты относятся к категории особо защитных участков леса вблизи населенных пунктов, что исключает проведение в них рубок с момента последнего лесоустройства.

Для подтверждения достоверности данных лесоустройства, в 2022 году в границах рассматриваемых выделов были заложены две пробные площади размером 0,25 га. каждая. По результатам сплошного перечета древостоев и инструментальных измерений (мерная вилка, полнотомер, высотомер ЭТ-1М) было выявлено, что результаты достоверно не отличаются от материалов лесоустройства.

# Методика полевых работ и дистанционного анализа

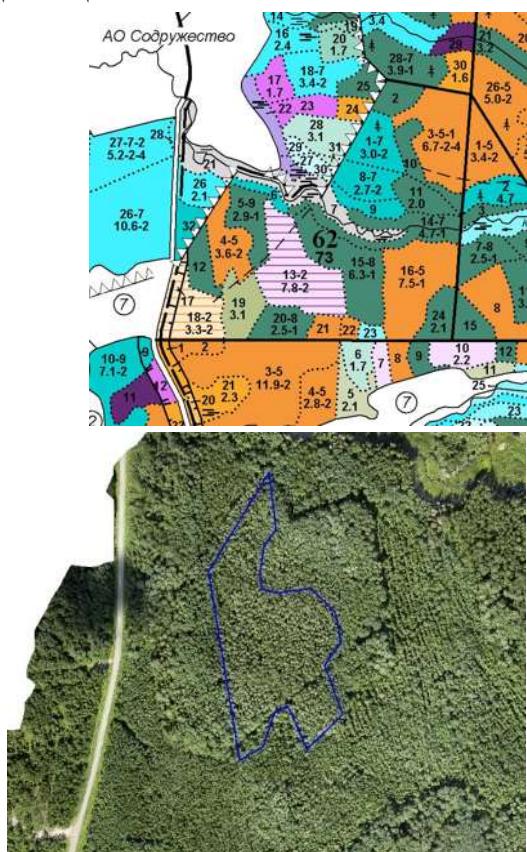


Рис. 1 Фрагмент плана и ортофотоплана лесонасаждений Пролетарского участкового лесничества.

Fig. 1 Fragment of the plan and orthophotoplane of the forest plantations of the Proletarian district forestry

Площадь квартала № 62 составляет 73 га. В качестве опытных объектов были выбраны таксационные выделы № 4 и 22 площадью 3,6 и 0,6 га соответственно. Данный квартал был выбран в связи с тем, что имел породный состав с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*). Характеристики выдела № 4 и 22 по данным лесоустройства 2019 года представлены в таблице 1.

Таблица 1

- Характеристики лесотаксационных выделов № 4 и 22 Пролетарского участкового лесничества
  - Characteristics of stratum № 4 and 22 of the Proletarian district forestry

№ выдела   № stratum	Состав древостоя   Stand structure	Диаметр, см   Diameter, cm	Высота, м   Height, m	Запас, м <sup>3</sup> /га   Stock, m <sup>3</sup> /ha
4	8C1E1Oc+Б	24	25	— 350
22	5C4Oc1Б+E	24	24	— 330

С использованием снимков высокого разрешения проводится подсчет количества деревьев на обследуемых участках с использованием автоматического способа. Данная

методика подсчета количества деревьев имеет аprobацию и сравнительно высокую точность показателей [5].

Материалы аэрофотосъемки были получены в 2022 году с беспилотного летательного аппарата самолетного типа Геоскан Lite оснащенного камерой Sony Alpha 6000 20 mm. Высота съемки составляла 300 метров от поверхности земли. Продольное и поперечное перекрытие снимков составляло 80% и 70% соответственно.

Первоначально выполняется конвертация снимков из формата .RAW в формат с геопространственной привязкой .TIFF, с последующей загрузкой их в программу Agisoft Metashape Professional для дальнейшей обработки. Производится выравнивание снимков в высокой точности и построение плотного облака точек (исходные карты глубины, высокое качество, фильтрация карт глубины мягкая). Затем выполняется построение цифровой модели местности и ортофотоплан обследуемой местности (построение на основе ЦММ). По материалам аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения возможно определение нескольких таксационных показателей, таких как площадь участка, породный состав, средняя высота (по цифровым моделям местности), число деревьев на участке и др. Затем производится контурирование и обрезка выделов в геоинформационной системе MapInfo 17, путем наложения на ортофотоплан привязанного плана лесонасаждений. Затем в программе Adobe Photoshop выполняется обработка снимка, необходимая для дальнейшего его использования в программе SimInTech.

Предлагаемый метод направлен на автоматический подсчет деревьев по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения (4-5 см/пиксель) с увеличенным процентом перекрытия изображений, что позволяет снизить погрешность результатов. Процесс обработки изображений в SimInTech начинается с преобразования исходного кадра. Затем выполняется пороговое преобразование и маска сужения на основе команд разделения цветовых каналов и взвешенной суммы двух массивов. Конечный результат отображается в окне просмотра после выполнения команды слияния цветовых каналов. Автоматический подсчет количества деревьев на участке осуществляется с помощью блока Find contours в SimInTech. Крона каждого дерева выделяется на основе пика яркости и маски сужения.

Количество деревьев составило 438 шт. на 1 га площади исследуемого выдела №4. В выделе №22 количество деревьев составило 234 шт. на 1 га. При сопоставлении полученных данных с показателями, полученными на пробных площадях, было выявлено незначительное превышение значений (не более 3%).

Методы аллометрического моделирования Для определения таксационных показателей древостоев было необходимо вывести коэффициенты по моделям закономерных связей между таксационными параметрами с применением таблиц хода роста нормальных и модальных древостоев. Многочисленные исследования свидетельствуют, что существует взаимосвязь между таксационными параметрами древостоев, такими как средний диаметр, высота и запас, и их относительной полнотой. Поскольку эти параметры меняются со временем и взаимосвязаны друг с другом, были сформулированы закономерности, которые нашли применение во многих отраслях, в том числе и в лесном хозяйстве [6,7,8,9].

Со второй половины прошлого века ученые используют степенные (экспоненциальные) уравнения, основанные на данных об изменениях параметров роста растений. [10,11,12,13,14,15]. Анализ литературы позволил выделить три ключевых аллометрических закономерности, которые описывают взаимосвязь между запасом древостоя, его средним диаметром и высотой, а также густотой.

Так первым было рассмотрена закономерность, открытая Уодой именуемое как «правило 3/2».

• «правило -3/2»

$$M = C_1 \times N^{-\frac{3}{2}}$$

где М - общий (суммарный) запас на единице площади,  $m^3 /ga$ ;

$C_1$  - постоянная, безразмерная величина;

$N$  - число деревьев на единице площади, шт/га.

В своих исследованиях Уода с коллегами, рассматривая зависимость массы растений от их количества, установил правило 3/2. Но поскольку в таблицах хода роста насаждений представлен запас на 1 га, то значение степени в теории должно быть равным 0,5. [16]

В 1944 году значительный отклик получила работа Дж. Киттреджа, который успешно применил аллометрическую формулу для сравнения

фитомассы крон деревьев и древостоев с диаметрами стволов [10].

Понятие аллометрии изначально означало неравномерный рост и относилось к морфологическим признакам. Однако со временем в качестве переменных  $x$  и  $y$  стали использоваться физиологические характеристики организмов [17, 10].

Позже Рейнеке установит зависимость между средним диаметром на высоте груди и числом стволов на единицу площади в сомкнутых насаждениях без ухода [18].

• правило Рейнеке

$$D = C_3 \times N^{-\frac{1}{2}}$$

где  $D$  – средний диаметр, см;

$C_3$  – постоянная, безразмерная величина;

$N$  – число деревьев на единице площади, шт./га.

Также интересно было рассмотреть правило Г.Ф. Хильми, описывающее зависимость между средней высотой древостоя и его густотой [11].

• правило Хильми

$$H = C_2 \times N^{-\frac{1}{2}}$$

где  $H$  – средняя высота, м;

$C_2$  – постоянная, безразмерная величина;

$N$  – число деревьев на единице площади, шт./га.

Постоянные величины определялись путем проведения регрессионного анализа на основе региональных таблиц хода роста сосновых древостоев зоны смешанных лесов Европейской части РФ [19]. Рассмотрению были подвергнуты зависимости среднего запаса, средней высоты и среднего диаметра от числа стволов на 1 га.

## Расчетная часть

Следующим этапом исследования является определение постоянных  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  для рассмотренных ранее аллометрических зависимостей.

Определение постоянных проводилось путем построения моделей зависимости друг от друга рассматриваемых величин. Для расчета показателей были использованы общие и региональные таблицы хода роста нормальных и модальных сосновых насаждений для подзон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской части РФ. Новгородское лесничество располагается на стыке данных зон. [20, 21, 22]

Рассмотрим графики зависимости модальных сосновых насаждений. Графики

зависимости запаса от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 2). Значения полученных параметров приведены в таблице 2. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень у зависимости отклоняется к проективной (0,5), что может говорить об увеличении степени отклонений получаемых показателей при использовании данных коэффициентов. Для их минимизации необходимо проводить анализ с закрепленной степенью 0,5

Рассмотрим графики зависимости среднего диаметра от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 3). Значения полученных параметров приведены в таблице 3. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень у зависимости близка к проективной (0,5), что может говорить о достоверности получаемых показателей при использовании данных коэффициентов.

Рассмотрим графики зависимости средней высоты от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 4). Значения полученных параметров приведены в таблице 4. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень у зависимости близка к проективной (0,5), что может говорить о достоверности получаемых показателей при использовании данных коэффициентов. Но из-за того, что при расчете коэффициентов закономерных связей, в угоду максимальной корреляции между показателями, имеются отклонения от проективной степени, было принято решение о применении иных степеней. За основу были взяты степени из расчета зависимостей показателей и округлены до целых. Так для расчета показателей запаса и диаметра древостоя применялась степень -0,6, а для расчета высоты древостоя -0,5.

Затем были выполнены расчеты по ранее рассмотренным уравнениям аллометрических закономерностей с применением полученных коэффициентов и определенным по материалам АФС количеством деревьев по выделам. Результаты вычислений представлены в таблице 5.

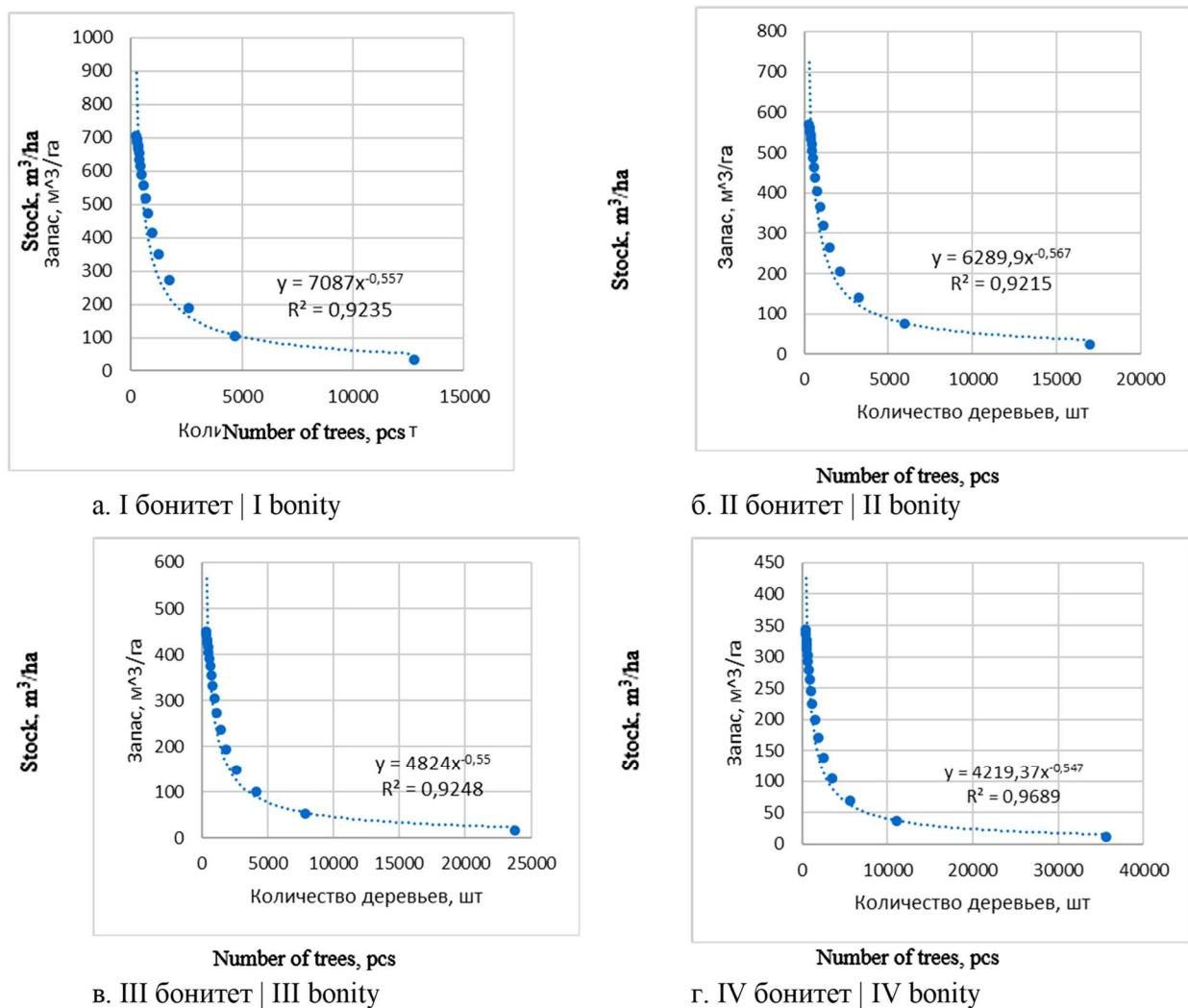


Рис. 2 Зависимость запаса модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)  
Fig. 2 The dependence of the stock of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's own composition

Таблица 2  
Table 2

Значения параметров аллометрического уравнения Уода  
Values of the parameters of the allometric equation of the Yoda

Класс бонитета   Bonitet class	Искомый коэффициент   The required coefficient	Коэффициент детерминации   Coefficient of determination	Степень функции   Degree of function
I	7087	0,9230	-0,557
II	6289	0,9210	-0,567
III	4824	0,9248	-0,550
IV	4219	0,9689	-0,547
V	3549	0,9486	-0,550

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

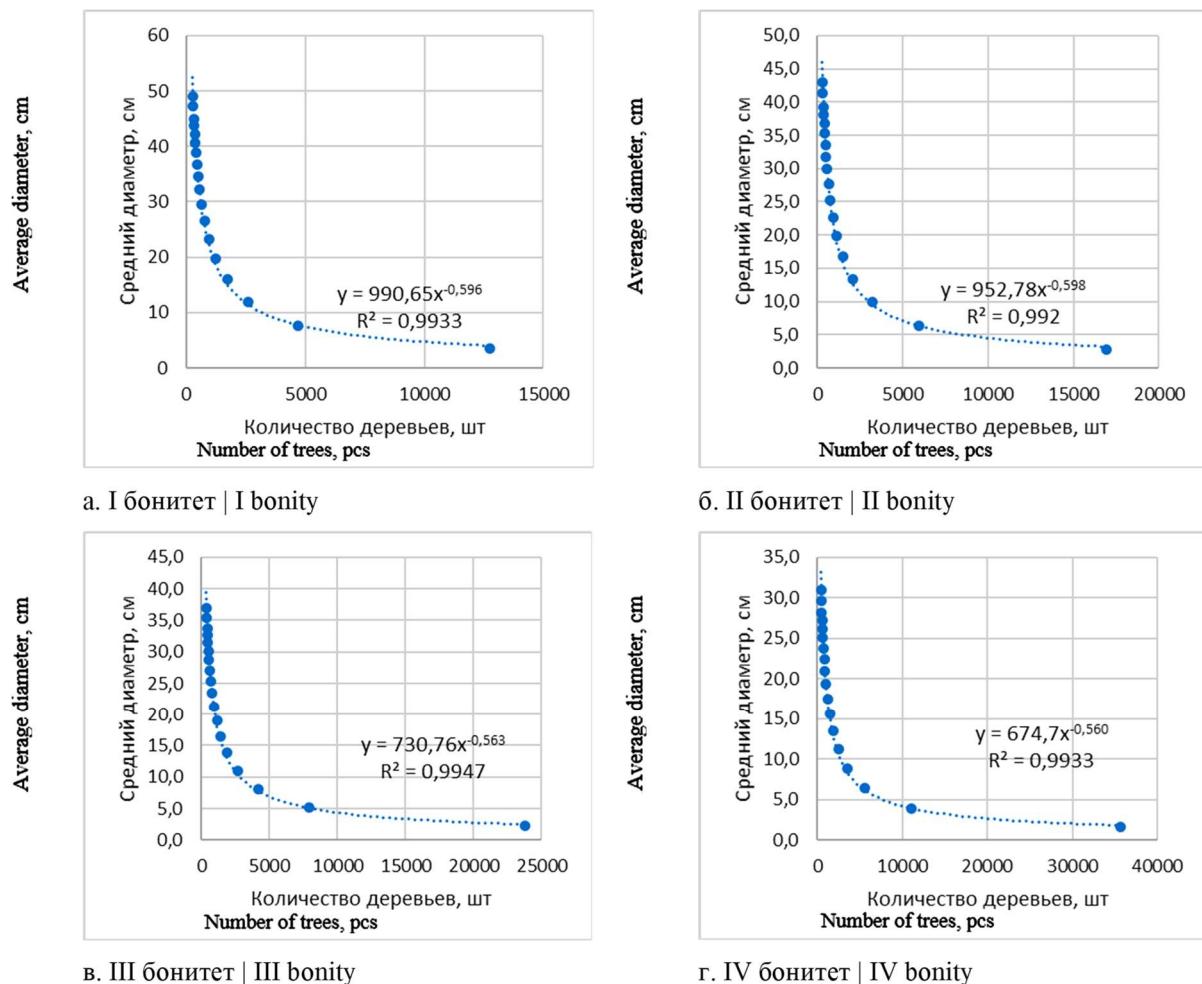


Рис. 3 Зависимость диаметра модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)  
Fig. 3 The dependence of the diameter of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)

Таблица 3  
Table 3

Значения параметров аллометрического уравнения Рейнеке  
Values of the parameters of the allometric Reineke equation

Класс бонитета   Bonity class	Искомый коэффициент   The required coefficient	Коэффициент детерминации   Coefficient of determination	Степень функции   Degree of function
I	990,65	0,9933	-0,596
II	952,78	0,9920	-0,598
III	730,76	0,9947	-0,563
IV	674,7	0,9933	-0,560
V	613,21	0,9805	-0,561

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

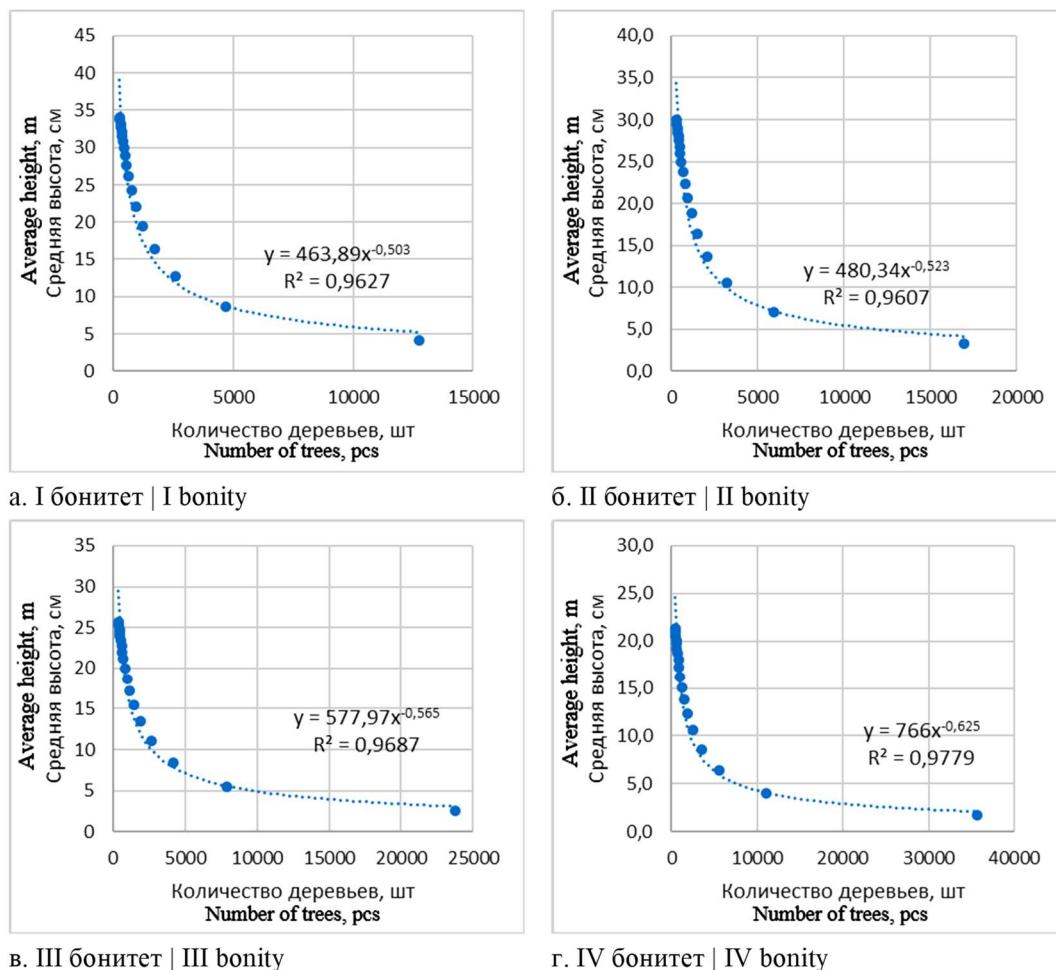


Рис. 4 Зависимость высоты модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)  
 Fig. 4 The dependence of the height of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's own composition

Таблица 4  
 Table 4

Значения параметров аллометрического уравнения Хилми  
 Values of the parameters of the Hilmi allometric equation

Класс бонитета   Bonity class	Искомый коэффициент   The required coefficient	Коэффициент детерминации   Coefficient of determination	Степень функции   Degree of function
I	463,89	0,9627	-0,503
II	480,34	0,9607	-0,523
III	577,97	0,9687	-0,565
IV	766	0,9779	-0,625
V	1347,4	0,9873	-0,744

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

Таблица 5  
Table 5Результаты моделирования и отклонения  
Modeling results and deviations

Параметры   Parameters	Запас, м <sup>3</sup> /га   Stock, m <sup>3</sup> /ha	Высота, м   Height, m	Диаметр, см   Diameter, cm
выдел 4			
Результаты моделирования   Modeling results	301	23	25
Таксационные показатели   Taxation parameters	350	25	24
Отклонение   Deviation	-14%	-8%	4%
выдел 22			
Результаты моделирования   Modeling results	315	24	26
Таксационные показатели   Taxation parameters	330	24	24
Отклонение   Deviation	-5%	0%	8%

## Обсуждение

По итогам проведенного исследования можно утверждать о том, что по результатам моделирования основных таксационных параметров были получены корректные данные в соответствии с допустимыми отклонениями, отраженными в лесоустроительной инструкции. Для смешанного по составу насаждения получены значения таксационных параметров более близкие к лесоустроительным данным. Результаты, полученные по закономерности Хилми, показали наименьшие отклонения от контрольных показателей. При этом, в расчетах зависимости показателей, в угоду высокому показателю коэффициента корреляции, программа автоматически выставляла степень. Она была близка к проектному показателю (-0,5) но в случае расчета высот наблюдалось максимальное отклонение относительно остальных случаев (до -0,7). Исходя из этого пришлось отойти от фиксированной степени -0,5. Благодаря этому, результаты, полученные по закономерностям Уоды, Рейнеке и Хилми показали значения с погрешностью, не выходящей за рамки лесоустроительной инструкции. Расхождения модельных значений с таксационными могут быть связаны также с возможной ошибкой при подсчете количества деревьев. Отклонения, в

большей степени, зависят от сомкнутости полога насаждений. В низкополнотных насаждениях система автоматического подсчета может помимо крон основного полога выделять также подрост и подлесок, что может завышать количественные показатели, что за собой влечет погрешность в результатах (завышение запаса, и снижение средней высоты насаждения).

## Заключение

В целом, предложенный метод позволяет наиболее точно определять основные таксационные показатели для одноярусных сомкнутых насаждений. На основе разработанных аллометрических моделей показана возможность определения таксационных показателей с погрешностью по определению запаса древостоев не более 15%, средних высот и диаметра древостоев - не более 8%. Данные значения не превышают установленные значения точности определения основных таксационных показателей лесоустроительной инструкцией. Применяя данную аллометрическую модель можно рассчитать показатели для большинства пород, произрастающих на территории РФ, с использованием соответствующих региональных таблиц хода роста древостоев. При наличии авиапарка и достаточного количества операторов БПЛА можно увеличить периодичность проведения наземных лесоустроительных работ. Своевременное

получение данных о характеристиках лесных насаждений позволит оперативно реагировать на последствия природных бедствий, таких как

ветровалы, пожары, что позволит иметь постоянную актуальную информацию в лесоустроительных данных.

## **Список литературы**

1. Сведения государственного лесного реестра на 2022 год. URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/6679/>
2. Краскова А.Н. К вопросу о финансировании мероприятий по лесоустройству // Сибирский юридический вестник. – 2024. – № 3(106). – С. 25-32. – DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.25.
3. Алексеев А.С., Михайлова А.А., Черниховский Д.М., Березин В.И. Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения // Трубы Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2017. – № 2. – С. 67-77. – DOI: 10.21178/2079-6080.2017.2.67.
4. United Nations Strategic Plan for Forests 2017–2030. URL: <https://www.un.org/esa/forests/documents/un-strategic-plan-for-forests-2030/index.html>
5. Иванов А.А., Лукашик Е.Е. Метод автоматизированного определения количества деревьев в лесном насаждении на основе цифрового анализа материалов аэрофотосъемки // Цифровые технологии в лесном секторе: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. – СПб., 2022. – С. 35-38.
6. Kittredge, J. (1944). Estimation of the amount of foliage on trees and stands. *Journal of Forestry*, 42(12), 905–912. <https://doi.org/10.1093/jof/42.12.905>
7. Pretzsch, H. (2002). A unified law of spatial allometry for woody and herbaceous plants. *Plant Biology*, 4, 159–166. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25732>
8. Pretzsch, H. (2005). Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 36(3), 98–107.
9. Pretzsch, H. (2006). Species-specific allometric scaling under self-thinning: evidence from long-term plots in forest stands. *Oecologia*, 146(4), 572–583. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0126-0>
10. Cabrera, M., Samboni-Guerrero, V., & Duivenvoorden, J.F. (2018). Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. *Applied Vegetation Science*, 21(3), 477–487. <https://doi.org/10.1111/avsc.12381>
11. Conti, G., Enrico, L., Casanoves, F., & Diaz, S. (2013). Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. *Annals of Forest Science*, 70(5), 515–524. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0285-9>
12. Oliveras, I., Van der Eynden, M., Malhi, Y., Cahuana, N., Menor, C., Zamora, F., & Haugaaen, T. (2014). Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecology*, 39, 408–415. <https://doi.org/10.1111/aec.12098>
13. Porté, A.J., Samalens, J.C., Dulhoste, R., Ducros, R.T., Bosc, A., & Meredieu, C. (2009). Using cover measurements to estimate aboveground understorey biomass in Maritime pine stands. *Annals of Forest Science*, 66, 307. <https://doi.org/10.1051/forest/2009005>
14. Schulze, I.-M., Bolte, A., Schmidt, W., & Eichhorn, J. (2009). Phytomass, litter and net primary production of herbaceous layer. In R. Brumme & P.K. Khanna (Eds.), *Functioning and Management of European Beech Ecosystems* (pp. 155–181). Springer. [https://doi.org/10.1007/b82392\\_11](https://doi.org/10.1007/b82392_11)
15. 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>
16. Михайлова А.А. Моделирование таксационных характеристик насаждений с использованием аллометрических правил и аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – СПб., 2017. – 28 с.

17. Голуб В.Б., Николайчук Л.Ф. Л.Г. Раменский и аллометрия растений (история и современное состояние проблемы) // Разнообразие растительного мира. – 2021. – № 1(8). – С. 30-50. – DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50
18. West, P. (2021). Using Reineke's model to quantify the maximum density of a tree stand. *Academia Letters*, Article 973. <https://doi.org/10.20935/AL973>
19. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., & Nilsson, S. (2008). Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials) (2nd ed.). Federal Agency of Forest Management of Russia and International Institute for Applied Systems Analysis. URL: [https://www.researchgate.net/publication/241703708\\_Tables\\_and\\_models\\_of\\_growth\\_and\\_productivity\\_of\\_forests\\_of\\_major\\_forest\\_forming\\_species\\_of\\_Northern\\_Eurasia\\_standard\\_and\\_reference\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/241703708_Tables_and_models_of_growth_and_productivity_of_forests_of_major_forest_forming_species_of_Northern_Eurasia_standard_and_reference_materials)
20. Chave, J., Rejou-Mechain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martinez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pelissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the above-ground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
21. Coefficient of Determination: How to Calculate It and Interpret the Result. URL: <https://www.investopedia.com/terms/c/coefficient-of-determination.asp>
22. Pottier, J., & Jabot, F. (2017). Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: A transferable method between contrasted environments. *Ecological Indicators*, 72, 769–776. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.030>

## References

1. Svedeniya gosudarstvennogo lesnogo reestra na 2022 god. [Data of the state forest register for 2022]. URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/6679/>
2. Kraskova A.N. K voprosu o finansirovaniyu meropriyatiy po lesoustroystvu. [On the issue of financing forest management measures]. *Sibirskij yuridicheskij vestnik* = Siberian Legal Bulletin. 2024;3(106):25-32. (In Russ.). DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.25
3. Alekseev A.S., Mihajlova A.A., Chernihovskij D.M., Berezin V.I. Metod opredeleniya taksacionnyh harakteristik nasazhdenij po aerofotosnimkam sverhvysokogo razresheniya. [Method for determining forest inventory characteristics of stands using ultra-high resolution aerial photographs]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva* = Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry. 2017;2:67-77. (In Russ.). DOI: 10.21178/2079-6080.2017.2.67
4. United Nations Strategic Plan for Forests 2017–2030. URL: <https://www.un.org/esa/forests/documents/un-strategic-plan-for-forests-2030/index.html>
5. Ivanov A.A., Lukashik E.E. Metod avtomatizirovannogo opredeleniya kolichestva derev'ev v lesnom nasazhdenii na osnove cifrovogo analiza aerofotos"emki. [Method for automated determination of the number of trees in a forest stand based on digital analysis of aerial photography materials]. *Cifrovye tekhnologii v lesnom sektore: Materialy III Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii-vebinara* = Digital technologies in the forest sector: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference-Webinar. Saint Petersburg; 2022:35-38. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49615672>
6. Kittredge J. Estimation of the amount of foliage on trees and stands. *Journal of Forestry*. 1944;42(12):905-912. DOI: 10.1093/jof/42.12.905
7. Pretzsch H. A unified law of spatial allometry for woody and herbaceous plants. *Plant biology*. 2002;4:159-166. DOI: 10.1055/s-2002-25732
8. Pretzsch H. Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 2005;36(3):98-107. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=zcFDgrgAAAAJ&cstart=600&pagesize=100&s\\_ortby=pubdate&citation\\_for\\_view=zcFDgrgAAAAJ:DUooU5lO8OsC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=zcFDgrgAAAAJ&cstart=600&pagesize=100&s_ortby=pubdate&citation_for_view=zcFDgrgAAAAJ:DUooU5lO8OsC)

9. Pretzsch H. Species-specific allometric scaling under self-thinning: evidence from long-term plots in forest stands. *Oecologia*. 2006;146(4):572-583. DOI: 10.1007/s00442-005-0126-0
10. Cabrera M., Samboni-Guerrero V., Duivenvoorden J.F. Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. *Applied Vegetation Science*. 2018;21(3):477-487. DOI: 10.1111/avsc.12381
11. Conti G., Enrico L., Casanoves F., Diaz S. Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. *Annals of Forest Science*. 2013;70(5):515-524. DOI: 10.1007/s13595-013-0285-9
12. Oliveras I., Van der Eynden M., Malhi Y., Cahuana N., Menor C., Zamora F., Haugaasen T. Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecology*. 2014;39:408-415. DOI: 10.1111/aec.12098
13. Porté A.J., Samalens J.C., Dulhoste R., Ducros R.T., Bosc A., Meredieu C. Using cover measurements to estimate aboveground understorey biomass in Maritime pine stands. *Annals of Forest Science*. 2009;66:307. DOI: 10.1051/forest/2009005
14. Schulze I.-M., Bolte A., Schmidt W., Eichhorn J. Phytomass, litter and net primary production of herbaceous layer. In: Brumme R., Khanna P.K. (Eds). *Functioning and Management of European Beech Ecosystems*. 2009;208:155-181. DOI: 10.1007/bf2392\_11
15. Bogdanov A.P., Tret'yakov S.V., Cvetkov I.V. Ocenka tochnosti opredeleniya zapasa v molodnyakah i srednevozrastnyh drevostoyah po rezul'tatam nablyudenij na statsionarnyh ob"ektah v Murmanskoy oblasti razlichnymi sposobami. [Accuracy assessment of stock determination in young and middle-aged stands based on observations at stationary sites in the Murmansk region by various methods]. *Uspehi sovremennoego estestvoznanija = Advances in Current Natural Sciences*. 2023;5:13-18. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.38035
16. Mihajlova A.A. Modelirovanie taksacionnyh harakteristik nasazhdenij s ispol'zovaniem allometricheskikh pravil i aerofotos"emki sverhvysokogo razresheniya. [Modeling of forest inventory characteristics of stands using allometric rules and ultra-high resolution aerial photography]. Abstract of PhD thesis. Saint Petersburg; 2017. 28 p. (In Russ.). URL: [https://spbftu.ru/uploads/disser/dissertations/18\\_Mihajlova%20Anna%20Arkad%60evna/Avtoreferat.pdf](https://spbftu.ru/uploads/disser/dissertations/18_Mihajlova%20Anna%20Arkad%60evna/Avtoreferat.pdf)
17. Golub V.B., Nikolajchuk L.F. L.G. Ramenskij i allometriya rastenij (istoriya i sovremennoe sostoyanie problemy). [L.G. Ramensky and plant allometry (history and current state of the problem)]. *Raznoobrazie rastitel'nogo mira = Plant Diversity*. 2021;1(8):30-50. (In Russ.). DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50
18. West P. Using Reineke's model to quantify the maximum density of a tree stand. *Academia Letters*. 2021:Article 973. DOI: 10.20935/AL973
19. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., & Nilsson, S. (2008). Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials) (2nd ed.). Federal Agency of Forest Management of Russia and International Institute for Applied Systems Analysis. URL: [https://www.researchgate.net/publication/241703708\\_Tables\\_and\\_models\\_of\\_growth\\_and\\_productivity\\_of\\_forests\\_of\\_major\\_forest\\_forming\\_species\\_of\\_Northern\\_Eurasia\\_standard\\_and\\_reference\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/241703708_Tables_and_models_of_growth_and_productivity_of_forests_of_major_forest_forming_species_of_Northern_Eurasia_standard_and_reference_materials)
20. Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. Improved allometric models to estimate the above-ground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*. 2014;20:3177-3190. DOI: 10.1111/gcb.12629
21. Coefficient of Determination: How to Calculate It and Interpret the Result. URL: <https://www.investopedia.com/terms/c/coefficient-of-determination.asp>
22. Pottier J., Jabot F. Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: A transferable method between contrasted environments. *Ecological Indicators*. 2017;72:769-776. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.08.030

## Сведения об авторах

*Иванов Андрей Алексеевич* – ведущий техник-технолог лаборатории беспилотных систем и цифровой инженерии ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», ул. Большая Санкт-Петербургская д. 41, г. Великий Новгород, Российская Федерация, 173003; аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1411-8222>, e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru

*Коптев Сергей Викторович* – доктор с/х наук, доцент, зав. кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru

## Information about the authors

*Andrey.A. Ivanov* – Leading Technology Technician at the Laboratory of Unmanned Systems and Digital Engineering Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Bolshaya Sankt Peterburgskaya st., 41, Velikiy Novgorod, Russia, 173003, Postgraduate Student; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1411-8222>, e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru

*Sergey.V. Koptev* – Doctor of Agricultural Science, Professor; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru