

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ,  
ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ / FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY,  
LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.44.8>

РЕГИОНАЛЬНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ БАЗИСНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ У  
ХВОЙНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

Научная статья

Плюха Н.И.<sup>1</sup>, Усольцев В.А.<sup>2\*</sup>, Цепордей И.С.<sup>3</sup>, Часовских В.П.<sup>4</sup>, Кох Е.В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-1628-3300;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-4587-8952;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-4747-5017;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0002-9454-9824;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-7040-3380;

<sup>1,2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>3</sup> Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>4,5</sup> Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (v.usoltsev50[at]gmail.com)

**Аннотация**

В исследованиях углеродного цикла и экологии растений полезным показателем является базисная плотность древесины (БП) (basic density) как отношение массы в абсолютно сухом состоянии (при влажности 0%) к «зеленому» объему (объему древесины в состоянии насыщения водой). Данные о БП древесины большинства видов в пределах региона часто недоступны, и используются средние значения на уровне родов или семейств. Однако может наблюдаться значительная филогенетическая и географическая изменчивость БП, и использование ее средних значений на уровне рода возможно лишь при отсутствии региональных данных. Практически все опубликованные данные содержат информацию о БП собственно древесины, без учета коры. Если необходимо рассчитать биомассу стволов в коре по имеющимся данным объемов на основе БП, различающейся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры, а оно различается существенно. Наличие огромных массивов данных о запасах стволовой древесины, накопленных традиционной лесной таксацией, дает возможность оценивать абсолютно сухую биомассу стволов в коре на больших площадях, используя известные значения БП стволов. Цель наших исследований состояла в анализе региональных особенностей БП стволов в коре у хвойных древесных видов Евразии. Используя авторскую базу данных о квалитетрии деревьев лесообразующих видов Евразии, сформирована выборка 3220 деревьев пяти хвойных древесных родов (подродов) Евразии. Применена структура модели смешанного типа, включающая в себя численные (возраст и диаметр ствола) и фиктивные переменные, кодирующие географические регионы. Выполнены два ранжирования по величине БП стволов в коре, а именно, ранжирование регионов в пределах рода (для 5-хвойных сосен – в пределах подрода) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется ель восточная и минимальным – ель аянская. Полученные модели и ранжирования видов по величине БП стволов в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в хвойных древостоях по данным инвентаризации лесов.

**Ключевые слова:** роды *Pinus* L., *Larix* Mill., *Picea* L., *Abies* Mill., подрод *Harpoxylon*, базисная плотность стволов, региональные особенности, регрессионные модели.

REGIONAL RANKING OF BASAL STEMWOOD STOCKING DENSITY IN EURASIAN CONIFEROUS WOODY SPECIES

Research article

Plyukha N.I.<sup>1</sup>, Usoltsev V.A.<sup>2\*</sup>, Tsepordey I.S.<sup>3</sup>, Chasovskikh V.P.<sup>4</sup>, Kokh E.V.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-1628-3300;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-4587-8952;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-4747-5017;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0002-9454-9824;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-7040-3380;

<sup>1,2</sup> Ural State Forestry Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>4,5</sup> Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (v.usoltsev50[at]gmail.com)

**Abstract**

A useful indicator in carbon cycle and plant ecology studies is the basic density (BD) of wood as the ratio of mass in the absolutely dry state (at 0% moisture content) to green volume (wood volume in the water saturated state). Within a region, data on wood BP of most species are often unavailable, and average values at the genus or family level are used. However, there may be considerable phylogenetic and geographic variability in wood BD, and using genus-level averages is only possible if

regional data are not available. Virtually all published data contain information on the BD of wood itself, excluding bark. If it is necessary to calculate stem biomass in bark from available data on the basis of BD that differ between wood and bark, it is impossible to obtain the desired result with sufficient accuracy, because the ratio of wood to bark is unknown in each case, and it differs significantly. The availability of huge amounts of data on stem wood stocks accumulated by traditional forest taxation makes it possible to estimate absolutely dry biomass of trunks in bark over large areas using known values of trunk BD. The aim of our research was to analyse regional specifics of stem bark BD in coniferous tree species of Eurasia. Using the author's database on tree qualimetry of forest-forming species of Eurasia, a sample of 3220 trees of five coniferous tree genera (subgenera) of Eurasia was formed. A mixed model structure including numerical (age and trunk diameter) and dummy variables encoding geographical regions was applied. Two rankings of stem bark BD values were performed, namely, a ranking of regions within the genus (for 5 coniferous pines within the subgenus) and a species-specific ranking, according to which the maximum value is characterized by eastern spruce and the minimum by Ayan spruce. The obtained models and species rankings by the value of stem bark BP can be used in calculations of the carbon pool in coniferous stands according to forest stock inventory data.

**Keywords:** genera *Pinus* L., *Larix* Mill., *Picea* L., *Abies* Mill., subgenus *Haploxyton*, basic stem density, regional specifics, regression models.

## Введение

Углерод депонирующая способность лесов имеет важное значение при оценке их роли в стабилизации климата. Поскольку основная масса углерода депонируется в стволах деревьев, точная оценка их биомассы и углерода имеет преобладающее значение. При этом важную роль играет базисная плотность (БП) как отношение абсолютно сухой массы ствола к его объему в свежем состоянии. БП стволовой древесины является одним из основных источников варьирования при оценках биомассы, в расчетах темпов связывания углерода и тесно коррелирует с ключевыми аспектами физиологических характеристик дерева [1], [2].

Во всех современных исследованиях оценивалась БП собственно древесины, без учета коры [3], [4], [5], за исключением лишь одной работы [6]. В литературных источниках показатели БП древесины и коры анализируются отдельно, причем они различаются существенно [7], [8], [9]. Однако современные таксационные нормативы часто оценивают объемы ствола и запасы стволовой древесины вместе с корой. Если необходимо рассчитать биомассу стволов в коре по имеющимся данным объемов на основе БП, различающейся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры. Между тем доля коры в массе ствола может варьировать от 9 до 53% [6]. Наличие огромных массивов данных о запасах стволовой древесины в коре, накопленных традиционной лесной таксацией, дает возможность оценивать абсолютно сухую биомассу стволов в коре на больших площадях, используя известные значения БП стволов на уровне древостоя.

Насколько нам известно, исследования БП стволов в коре для различных древесных видов Евразии в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы был анализ региональных особенностей БП запаса стволовой древесины в коре у хвойных древесных видов Евразии.

Для ее реализации были поставлены задачи:

- разработать регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре, специфичные по регионам и древесным видам;
- выполнить ранжирование древесных видов Евразии по величине БП стволовых запасов по регионам и древесным видам.

## Объекты и методы исследований

Источником исходных материалов для регрессионного моделирования послужила база данных о биомассе и первичной продукции лесов Евразии [10]. Сформирована выборка из 4593 древостоев пяти хвойных древесных родов (подродов). Для обеспечения сопоставимости регионов и древесных видов при их ранжировании по величине БП мы применили структуру модели смешанного типа [11], включающую в себя численные (возраст и число стволов на 1 га) и фиктивные переменные, кодирующие выделенные регионы. Тем самым сопоставление выполняется для древостоев, одинаковых по густоте и возрасту. В отличие от остальных четырех родов, в группу пихт мы включили не только виды рода *Abies* Mill. но также пихту Дугласову (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) и пихту китайскую (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) [11].

В итоге мы приняли следующую структуру регрессионной модели:

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(N) + \sum a_i X_i \quad (1)$$

где  $BD$  – базисная плотность (БП) ствола в коре, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  – возраст древостоя, лет;  $N$  – число стволов на га, тыс. экз.;  $\sum a_i X_i$  – блок фиктивных переменных в количестве  $(i+1)$ ;  $a_0$  – свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных.

Мы не делим исходные данные в пределах региона по происхождению древостоев, поскольку естественные древостой и культуры различаются густотой, а она включена в модель (1) в качестве независимой переменной.

## Результаты и их обсуждение

Результаты расчета моделей (1) показали их высокую адекватность, и все регрессионные коэффициенты значимы на уровне  $t_{95} = 1,96$ . О степени адекватности моделей (1) и отсутствии корреляции остатков можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений БП (см. рисунок 1).

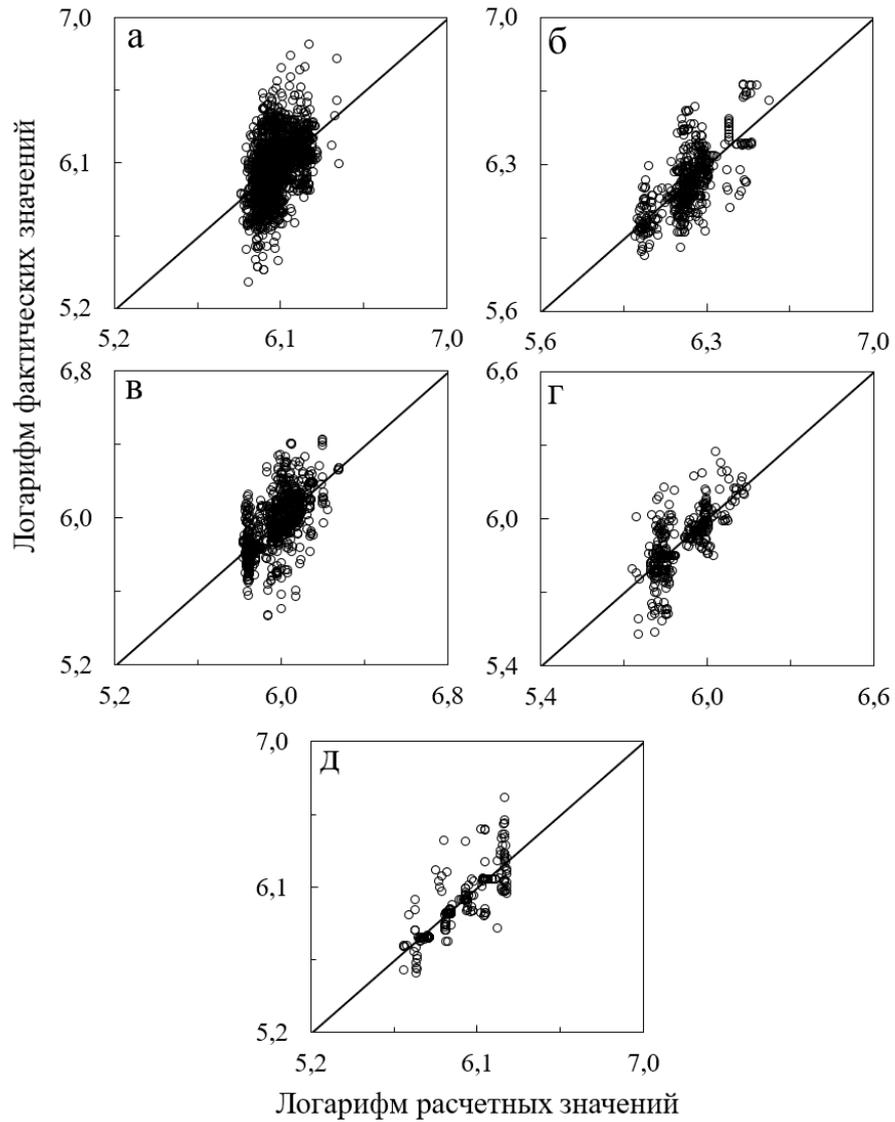


Рисунок 1 - Соотношение расчетных и фактических значений БА согласно модели (1):  
 а – *Pinus*; б – *Larix*; в – *Picea*; г – *Abies*; д – *Haploxyton*  
 DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.44.8.1>

Путем графической интерпретации моделей (1) выполнено ранжирование регионов по величине БА стволов в коре (см. рисунок 2). Предварительно в модели (1) введены значения среднего возраста древостоев ( $A = 80$  лет) и их средней плотности ( $N = 7,4$  тыс. экз./га), рассчитанные по исходным данным.

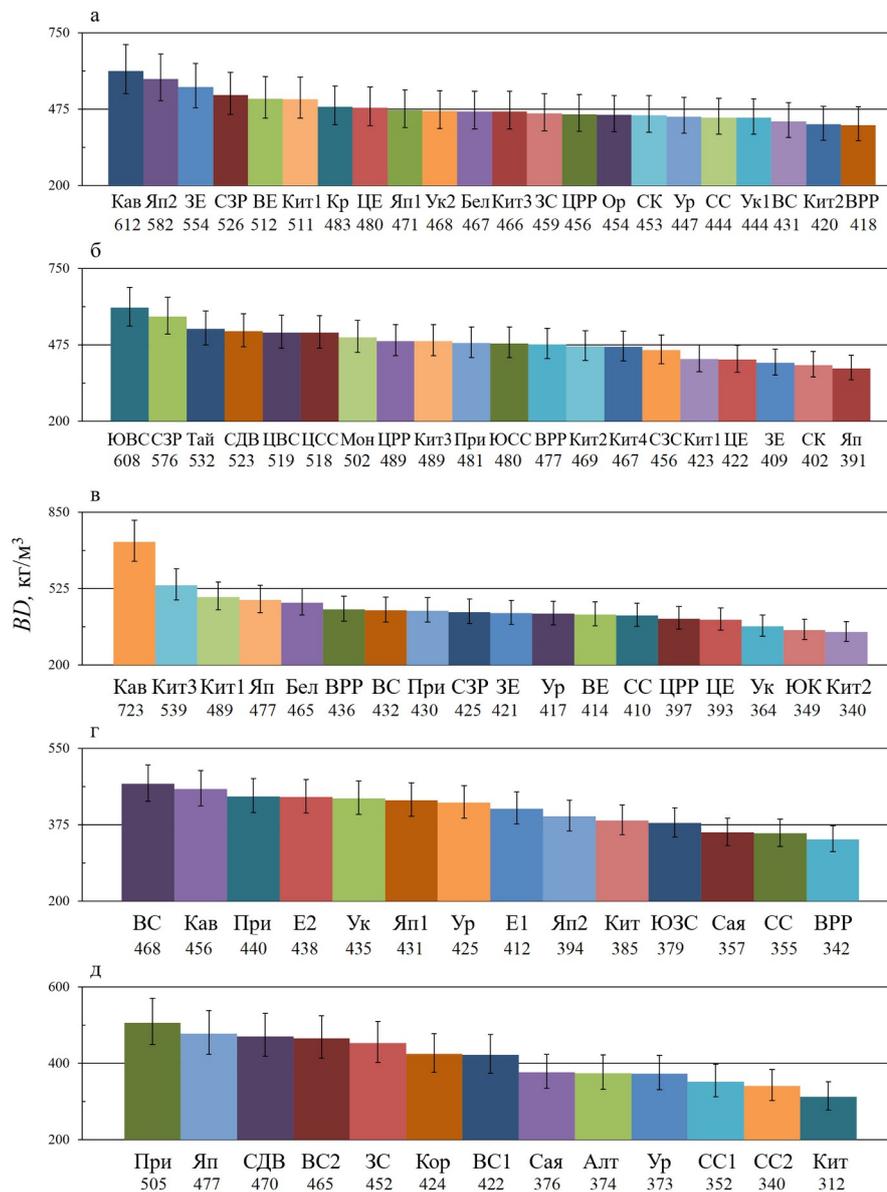


Рисунок 2 - Ранжирование принятых регионов по величине БП стволов в коре в убывающей последовательности для 5 хвойных родов (подродов):

*a* – *Pinus*; *б* – *Larix*; *в* – *Picea*; *г* – *Abies*; *д* – *Haploxyton*

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.44.8.2>

Аббревиатура регионов в алфавитном порядке: Алт – Алтай; Бел – Белоруссия; ВЕ – Восточная Европа; ВРР – восток Русской равнины; ВС – Восточная Сибирь; Е – Европа; ЗЕ – Западная Европа; Кав – Кавказ; Кит – Китай; Кор – Корея; Кр – Крым; Мон – Монголия; Ор – Оренбуржье; При – Приморье; Сая – Саяны; СДВ – север Дальнего Востока; СЗР – северо-запад России; СЗС – север Западной Сибири; СК – Северный Казахстан; СС – Средняя Сибирь; Тай – Таймыр; Ук – Украина; Ур – Урал; ЦВС – центр Восточной Сибири; ЦЕ – Центральная Европа; ЦРР – центр Русской равнины; ЦСС – центр Средней Сибири; ЮВС – юг Восточной Сибири; ЮК – Южный Казахстан; ЮСС – юг Средней Сибири; Яп – Японские острова.

При анализе рисунка 2 можно видеть, что у двуххвойных сосен ряд ранжирования БП начинается с сосны Сосновского на Кавказе (612 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается сосной обыкновенной на востоке Русской равнины (418 кг/м<sup>3</sup>). У лиственниц последовательность ранжирования начинается с лиственницы Чекановского в Восточной Сибири (608 кг/м<sup>3</sup>), и заканчивается лиственницей Кемпфера на Японских островах (391 кг/м<sup>3</sup>). У елей ряд начинается с ели восточной на Кавказе (723 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается елью аянской в Китае (340 кг/м<sup>3</sup>). У пихт ряд начинается с пихты сибирской в Восточной Сибири (468 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается пихтой сибирской на востоке Русской равнины (342 кг/м<sup>3</sup>). Ряд 5-хвойных сосен начинается и заканчивается кедром корейским, соответственно БП равна 505 кг/м<sup>3</sup> в российском Приморье и 312 кг/м<sup>3</sup> в Китае.

Выделенные регионы территориально заполнены фактическими данными неравномерно, и представленные ранжирования (рисунок 2) характеризуются множеством «белых пятен». Для заполнения этих «белых пятен» при оценках биомассы стволов в коре на соответствующих пробных площадях мы приводим ранжирование средних видоспецифичных значений БП, когда данные всех регионов объединены в пределах вида (см. рисунок 3).

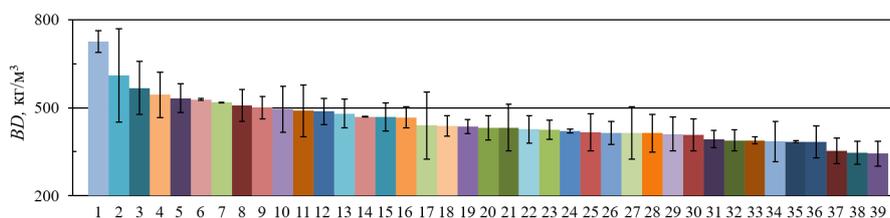


Рисунок 3 - Диаграмма распределения 39 лесообразующих видов Евразии по величине БП стволов в коре:  
 1 – *Picea orientalis* (L.) Link; 2 – *Pinus sosnowskyi* Nakai; 3 – *Larix czekanovskii* Szafer; 4 – *Larix sukaczewii* Dylis; 5 – *Larix cajanderi* Mayr; 6 – *Picea purpurea* Mast.; 7 – *Larix olgensis* A. Henry; 8 – *Pinus thunbergii* Parl.; 9 – *Larix komarovii* Kolesn.; 10 – *Larix Principis-Rupprechtii* Mayr.; 11 – *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.; 12 – *Larix decidua* Mill.; 13 – *Larix sibirica* Ledeb.; 14 – *Pinus pumila* (Pall.) Regel; 15 – *Picea koraiensis* Nakai; 16 – *Pinus tabuliformis* Carr.; 17 – *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.; 18 – *Abies nordmanniana* (Steven) Spach; 19 – *Pinus pallasiana* Lamb.; 20 – *Picea ajanensis* Fisch. & Carrière; 21 – *Pinus sylvestris* L.; 22 – *Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.; 23 – *Pinus densiflora* S.&Z.; 24 – *Pinus nigra* J.F. Arnold; 25 – *Pinus massoniana* Lamb.; 26 – *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière; 27 – *Picea schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey; 28 – *Picea obovata* Ledeb.; 29 – *Picea sitchensis* (Bong.) Carr.; 30 – *Picea abies* (L.) H. Karst.; 31 – *Abies alba* Mill.; 32 – *Abies veitchii* Lindl.; 33 – *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; 34 – *Pinus sibirica* Du Tour; 35 – *Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.; 36 – *Pinus taiwanensis* Hayata; 37 – *Abies sibirica* Ledeb.; 38 – *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; 39 – *Picea jezoensis* Siebold & Zucc  
 DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2024.44.8.3>

Ряд ранжирования (рисунок 3) начинается ель восточная (725 кг/м<sup>3</sup>) и завершает ель аянская (344 кг/м<sup>3</sup>).

### Заключение

На основе разработанных регрессионных моделей смешанного типа для базисной плотности запаса стволовой древесины в коре пяти хвойных родов выполнены два ранжирования по величине базисной плотности стволов в коре, а именно, ранжирование регионов в пределах рода (для 5-хвойных сосен – в пределах подрода) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется ель восточная и минимальным – ель аянская.

Полученные модели и ранжирования видов по величине базисной плотности запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в хвойных древостоях по данным инвентаризации лесов.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

### Funding

The study was carried out under the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

- Holdaway R.J. Propagating uncertainty in plot-based estimates of forest carbon stock and carbon stock change / R.J. Holdaway, S.J. McNeill, N.W. Mason et al. // *Ecosystems*. — 2014. — 17. — p. 627-640. — DOI: 10.1007/s10021-014-9749-5.
- MacFarlane D.W. Functional Relationships Between Branch and Stem Wood Density for Temperate Tree Species in North America / D.W. MacFarlane // *Frontiers in Forests and Global Change*. — 2020. — 3. — DOI: 10.3389/ffgc.2020.00063.
- Billard A. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components / A. Billard, R. Bauer, F. Mothe et al. // *Annals of Forest Science*. — 2020. — 77. — DOI: 10.1007/s13595-020-00999-1.
- McKinley R. Variation in whole-tree basic wood density for a range of plantation species grown in New Zealand / R. McKinley, C.J.A. Shelbourne, J.M. Harris et al. // *New Zealand Journal of Forestry Science*. — 2000. — 30. — p. 436–446.
- Marden M. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand / M. Marden, S. Lambie, L. Burrows // *New Zealand Journal of Forestry Science*. — 2021. — 51. — DOI: 10.33494/nzjfs512021x121x.
- Nygård R. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso / R. Nygård, B. Elfving // *Annals of Forest Science*. — 2000. — 57. — p. 143–153.

7. Sagang B.T. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data / B.T. Sagang, S.T. Momo, M.B. Libalah et al. // *Forest Ecology and Management*. — 2018. — 424. — p. 519–528. — DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.054.
8. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: monograph / V. A. Usoltsev. — Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University: Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. — URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (accessed: 09.03.2024). — DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.28-46
9. Усольцев В.А. Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей // *Сибирский лесной журнал*. — 2022. — 3. — с. 59–68.
10. Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии: монография: электронная база данных / В.А. Усольцев. — Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН: Уральский государственный лесотехнический университет, 2023.
11. Li C.M. Modeling dominant height for Chinese fir plantation using a non-linear mixed-effects modeling approach / C.M. Li, H.R. Zhang // *Scientia Silvae Sinicae*. — 2010. — 46. — p. 89–95.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Holdaway R.J. Propagating uncertainty in plot-based estimates of forest carbon stock and carbon stock change / R.J. Holdaway, S.J. McNeill, N.W. Mason et al. // *Ecosystems*. — 2014. — 17. — p. 627–640. — DOI: 10.1007/s10021-014-9749-5.
2. MacFarlane D.W. Functional Relationships Between Branch and Stem Wood Density for Temperate Tree Species in North America / D.W. MacFarlane // *Frontiers in Forests and Global Change*. — 2020. — 3. — DOI: 10.3389/ffgc.2020.00063.
3. Billard A. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components / A. Billard, R. Bauer, F. Mothe et al. // *Annals of Forest Science*. — 2020. — 77. — DOI: 10.1007/s13595-020-00999-1.
4. McKinley R. Variation in whole-tree basic wood density for a range of plantation species grown in New Zealand / R. McKinley, C.J.A. Shelbourne, J.M. Harris et al. // *New Zealand Journal of Forestry Science*. — 2000. — 30. — p. 436–446.
5. Marden M. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand / M. Marden, S. Lambie, L. Burrows // *New Zealand Journal of Forestry Science*. — 2021. — 51. — DOI: 10.33494/nzjfs512021x121x.
6. Nygård R. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso / R. Nygård, B. Elfving // *Annals of Forest Science*. — 2000. — 57. — p. 143–153.
7. Sagang B.T. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data / B.T. Sagang, S.T. Momo, M.B. Libalah et al. // *Forest Ecology and Management*. — 2018. — 424. — p. 519–528. — DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.054.
8. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: monograph / V. A. Usoltsev. — Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University: Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. — URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (accessed: 09.03.2024). — DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.28-46
9. Usoltsev V.A. Geograficheskie zakonomernosti izmenenija bazisnoj plotnosti drevesiny i kory lesoobrazujuschih porod Evrazii [Geographical patterns of changes in the basic density of wood and bark of forest-forming species of Eurasia] / V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordej // *Siberian Journal of Forest Science*. — 2022. — 3. — p. 59–68. [in Russian]
10. Usoltsev V. A. Biomassa i pervichnaya produkcija lesov Evrazii: monografiya: elektronnaya baza dannyh [Forest biomass and primary production database for Eurasia: monograph: CD-version] / V. A. Usoltsev. — Yekaterinburg: Botanical Garden of Ural Branch of RAS: Ural State Forest Engineering University, 2023. [in Russian]
11. Li C.M. Modeling dominant height for Chinese fir plantation using a non-linear mixed-effects modeling approach / C.M. Li, H.R. Zhang // *Scientia Silvae Sinicae*. — 2010. — 46. — p. 89–95.