

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2023. № 3 (72). С. 121–127.

Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philipov. 2023;3(72):121–127.

Научная статья

УДК 630*52

doi: 10.34655/bgsha.2023.72.3.014

АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ КУЛЬТУР СОСНЫ

**Ольга Николаевна Тюкавина¹, Денис Николаевич Клевцов²,
Николай Александрович Неверов³**

^{1,2}Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

³Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия

¹o.tukavina@narfu.ru

²d.klevtsov@narfu.ru

³na-neverov@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования заключалась в выявлении аллометрических закономерностей, описывающих зависимость высоты дерева, фитомассы различных фракций деревьев от диаметра ствола на высоте груди. Исследования проведены в молодых сосняках лишайниковых, брусничных и черничных возрастного периода от 10 до 40 лет Бабаевского лесничества Балтийско-Белозерского лесного района. Установлены лесоводственно-таксационные параметры искусственных сосняков. Определена надземная фитомасса сосновых культур по фракциям: живые ветви, древесная зелень, сухие сучья, кора и древесина ствола с помощью электронного безмена с точностью ± 50 г. Выявлены аллометрические зависимости диаметра ствола на высоте груди и высоты дерева. Участие в уравнении доли протяженности кроны от высоты дерева позволяет нивелировать влияние лесорастительных условий на аллометрические закономерности и повысить их точность. Выявлена высокая значимая корреляция между биомассой фракций дерева (массой ветвей с хвоей, древесиной ствола, коры) и диаметром ствола на высоте 1,3 м. Прогнозная оценка биомассы различных фракций деревьев позволит экономически обоснованно и рационально использовать древесную зелень, кору и непосредственно древесину.

Ключевые слова: сосна, лесные культуры, фитомасса, аллометрия, модель.

Original article

ALLOMETRIC PATTERNS OF PHYTOMASS CHANGES OF SCOTS PINE

Olga N. Tyukavina¹, Denis N. Klevtsov², Nikolay A. Neverov³

^{1,2}Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

³N.P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

o.tukavina@narfu.ru

²d.klevtsov@narfu.ru

³na-neverov@yandex.ru

Abstract. The aim of the study was to identify allometric patterns describing the dependence of tree height, phytomass of various tree fractions on trunk diameter at breast height (DBH). The research was carried out in young pine forests of lichen, cowberry and blueberry growing conditions of the age period from 10 to 40 years old in the Babaevsky forestry of the Baltic-Belozersky forest district. Forestry and taxation parameters of artificial pine forests were established. The aboveground phytomass of pine crops was determined by fractions: live branches, wood greens, dead branches, bark and trunk wood - using an electronic exchange with an accuracy of ± 50 g. Allometric dependences of trunk diameter at breast height and tree height were revealed. Usage in the equation of the proportion of the length of the crown from the height of the tree makes it possible to neutralize the influence of forest conditions on allometric patterns and increase their accuracy. A high significant correlation was revealed between the biomass of tree fractions (the mass of branches with needles, trunk wood, bark) and the trunk diameter at a height of 1.3 m. A forecast estimation of the biomass of various tree fractions will allow economically reasonable and rational use of wood greens, bark and wood itself.

Keywords: pine, plantation, phytomass, allometry, model.

Введение. В условиях истощения лесосырьевой базы наиболее остро возникает необходимость рационального использования лесных древесных ресурсов. Решение данной задачи возможно при наличии качественной и полной лесотаксационной информации, актуальных баз данных, которые могут быть дополнены и усовершенствованы применением математических моделей, которые адекватно описывают зависимость параметров биопродуктивности от простых таксационных показателей. При этом предпочтение отдается упрощенным, доступным для анализа моделям [1]. Регрессионный метод позволяет успешно прогнозировать развитие деревьев и формирование стволов [2]. Большинство лесотаксационных нормативов оценивают, в основном, ресурсы стволовой древесины. Но новые вызовы, в частности в ракурсе лесоклиматической повестки, актуализируют модели и таблицы биопродуктивности насаждений, позволяющие учитывать пофракционную оценку динамики накопления живого органического вещества, депонирования углерода, чистой первичной продукции древостоев [3]. Прогнозная оценка биомассы различных фракций деревьев позволяет экономически обоснованно и рационально использовать древесную зелень, кору и непосредственно древесину, что, например, определит рентабельность первых приемов рубок ухода и расчистку горельников. Актуальность исследований фитомассы возрастает [4-8].

Цель исследования – выявление аллометрических закономерностей, описывающих зависимость высоты дерева, фитомассы различных фракций деревьев от диаметра ствола на высоте груди.

Объекты и методы. Исследования проведены в Бабаевском лесничестве Балтийско-Белозерского лесного района. Объектами исследований являлись разновозрастные культуры сосны обыкновенной в лишайниковом, брусничном и черничном типах условий местопроизрастания (табл. 1). Культуры сосны были созданы посевом семян. Уходы за культурами не проводились. На временных пробных площадях устанавливали лесоводственно-таксационные параметры искусственных сосняков.

Затем в пределах всего диапазона варьирования размеров деревьев на пробной площади отбирали по 10 модельных деревьев без патологий, у которых измеряли диаметр ствола на высоте 1,3 м, высоту дерева, протяженность кроны. После валки каждое модельное дерево разделяли на фракции: живые ветви, древесная зелень, сухие сучья, кора и древесина ствола, которые взвешивали с помощью электронного безмена с точностью ± 50 г.

Результаты исследования. Наибольший интерес исследователей вызывают модели взаимосвязи высот деревьев и их диаметров на высоте 1,3 м [9-13]. Данные модели позволяют перейти от диаметра к высоте дерева. Измерение

Таблица 1 – Таксационная характеристика культур сосны

Тип леса	Возраст, лет	Состав	Средние		Количество деревьев, шт./га	Отн. полнота	Запас, м ³ /га
			Д, см	Н, м			
Лишайниковый	13	10С	менее 2	2,4	3429	0,3	6
	22	10С	3,4	4,1	4440	0,4	18
	30	10С	3,7	4,4	9050	0,9	40
	40	10С	6,0	7,4	5160	1,0	82
Брусничный	12	10С	менее 2	2,3	5520	0,4	8
	22	10С	4,1	6,0	10650	1,1	73
	30	10С	6,2	8,6	5360	1,0	106
	40	10С	9,7	12,3	3250	1,0	171
Черничный	30	10С	9,5	10,4	2950	1,0	139
	40	9С1Б	14,7	16,6	1225	0,8	199

диаметра на высоте груди проще, точнее и дешевле, чем измерение высоты дерева [11]. Теснота связи между диаметром ствола на высоте груди и высотой деревьев высокая, очень высокая значимая: сосняк лишайниковый $r = 0,9 - 0,94$ при $t =$

16 – 25; сосняк брусничный $r = 0,88 - 0,92$ при $t = 13 - 19$; сосняк черничный $r = 0,85 - 0,91$ при $t = 10 - 17$. Зависимость высоты дерева от диаметра на высоте груди можно описать полиномиальной функцией (табл. 2).

Таблица 2 – Регрессионные модели зависимости высоты дерева от его диаметра ствола на высоте 1,3 м

Условия местопроизрастания	Уравнение	Коэффициент детерминации
Сосняк лишайниковый	$y = 0,0022 \cdot x^3 - 0,0762 \cdot x^2 + 1,3454 \cdot x + 0,6339$	0,86
Сосняк брусничный	$y = 0,0037 \cdot x^3 - 0,1318 \cdot x^2 + 1,9707 \cdot x + 0,5273$	0,83
Сосняк черничный	$y = 0,0048 \cdot x^3 - 0,193 \cdot x^2 + 2,7437 \cdot x - 0,6569$	0,75

Модели соотношения высоты и диаметра представляют ценную информацию для оценки запаса древесины, роста насаждений, а также для исследований дистанционного зондирования, которые позволяют получить информацию по вы-

сотам, но диаметр деревьев с их помощью не может быть измерен [14, 15]. Зависимость диаметра ствола на высоте груди от высоты дерева можно описать полиномиальной функцией (табл. 3).

Таблица 3 – Регрессионные модели зависимости диаметра на высоте груди от высоты дерева

Условия местопроизрастания	Уравнение	Коэффициент детерминации
Сосняк лишайниковый	$y = 0,0142 \cdot x^3 - 0,2668 \cdot x^2 + 2,7412 \cdot x - 3,912$	0,85
Сосняк брусничный	$y = 0,0104 \cdot x^3 - 0,2259 \cdot x^2 + 2,5199 \cdot x + 4,5654$	0,80
Сосняк черничный	$y = -0,0195 \cdot x^3 + 0,5584 \cdot x^2 - 3,6448 \cdot x + 0,6497$	0,65

Программа Table Curve 3D позволяет подобрать более точные уравнения, описывающие зависимость диаметра ствола на высоте груди от высоты деревьев с учетом доли протяженности кроны в ней,

повысив коэффициент детерминации до 0,9 - 0,94. Участие в уравнении доли протяженности кроны от высоты дерева позволяет нивелировать влияние лесораспростительных условий на аллометрические

закономерности и объединить выборки разных типов леса. Диаметр на высоте груди в культурах сосны можно определить по регрессионному уравнению:

$$Z = 4,52 - 0,64 \cdot x - 0,121 \cdot y + 0,03 \cdot x^2 + 0,0006 \cdot y^2 + 0,025 \cdot x \cdot y,$$

$$R^2 = 0,92,$$

где Z – диаметр на высоте 1,3 м, см;
 x – высота дерева, м; y – доля протяженности кроны от высоты дерева, %;
 R^2 – коэффициент детерминации.

Модель построена при условиях $2,3 \leq x \leq 16,2$; $57 \leq y \leq 82$.

Согласно модели, с увеличением высоты дерева и доли протяженности кроны от высоты дерева диаметр ствола на

высоте груди возрастает (рис.1).

Во всех рассматриваемых типах леса выявлены высокие корреляционные связи массы фракций деревьев с диаметром ствола на высоте 1,3 м ($r = 0,88 - 0,96$ при $t = 24,1 - 88,6$). Наименьший коэффициент корреляции характерен для массы ветвей с хвоей, наибольший – для массы коры. При объединении выборок лишайникового, брусничного и черничного типов леса теснота связи не стала меньше, что указывает на закономерности соотношения массы древесины ствола, ветвей с хвоей, коры от диаметра ствола на высоте 1,3 м, независимо от типа леса и социального положения дерева в насаждении.

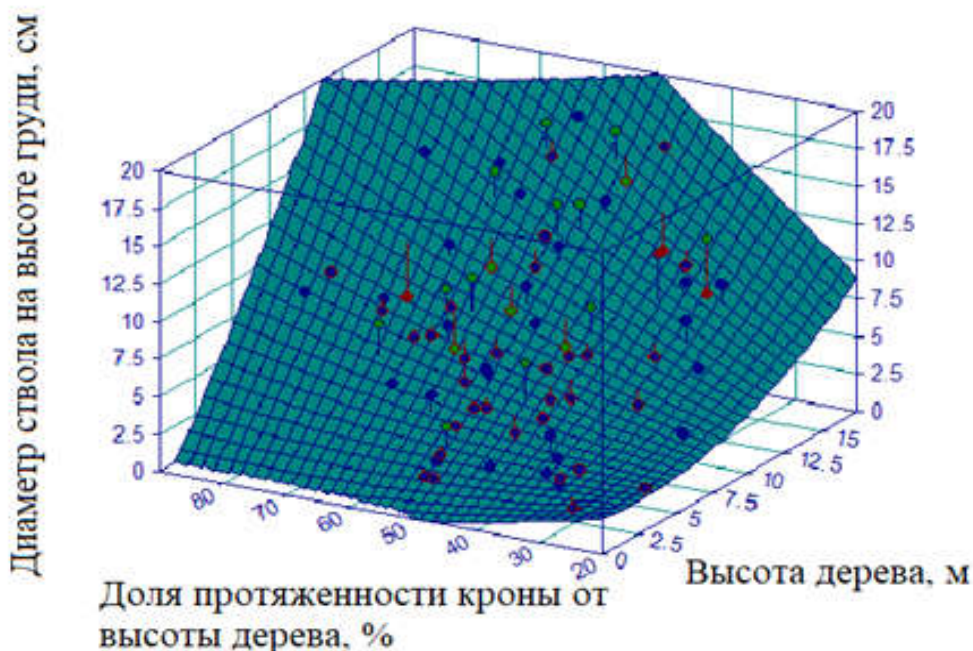


Рисунок 1. Зависимость диаметра ствола на высоте 1,3 м от высоты дерева и доли протяженности кроны

Зависимость масс фракций деревьев от диаметра ствола на высоте 1,3 м

можно описать полиномиальной функцией (табл. 4).

Таблица 4 – Регрессионные модели зависимости фракций фитомассы культур сосны от диаметра ствола на высоте груди

Фитомасса, кг	Уравнение	Коэффициент детерминации
Сосняк лишайниковый		
Ветви с хвоей	$y = 0,3556 \cdot x^2 - 2,2813 \cdot x + 3,7403$	0,98
Древесина ствола	$y = 0,5287 \cdot x^2 - 2,5843 \cdot x + 4,2634$	0,98
Кора	$y = 0,0498 \cdot x^2 - 0,0628 \cdot x + 0,1513$	0,97
Сосняк брусничный		
Ветви с хвоей	$y = 0,2172 \cdot x^2 - 1,3939 \cdot x + 2,5829$	0,96

Древесина ствола	$y = 0,1375 \cdot x^{2,43}$	0,98
Кора	$y = 0,0476 \cdot x^2 - 0,0212 \cdot x + 0,1391$	0,99
Сосняк черничный		
Ветви с хвоей	$y = 0,3047 \cdot x^2 - 2,6043 \cdot x + 5,5276$	0,96
Древесина ствола	$y = 0,598 \cdot x^2 - 1,6472 \cdot x + 1,3654$	0,95
Кора	$y = 0,0359 \cdot x^2 + 0,2125 \cdot x - 0,4733$	0,96

Заключение. Фитомасса различных фракций деревьев с высокой точностью оценивается расчетным путем по диаметру ствола на высоте груди. Выявлены аллометрические зависимости диаметра ствола на высоте груди и высоты дерева как для наземных, так и для дистанционных обследований. Полученные аллометрические уравнения можно использовать не только для оценки фитомассы деревьев, но и для выявления структурных изменений биомассы.

Список источников

1. Демаков Ю.П., Пуряев А.С., Черных В.Л., Черных Л.В. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирование их динамики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. экология. Природопользование. 2015. № 2 (26). С. 19-36. EDN: UBKTFJ
2. Seki M. Predicting stem taper using artificial neural network and regression models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in northwestern Türkiye // Scandinavian Journal of Forest Research. 2023. Vol. 38 (1-2). Pp. 97 - 104. doi:10.1080/02827581.2023.2189297
3. Вайс А.А., Кербис Е.С. Аллометрические закономерности биологической продуктивности еловых насаждений // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. XXXVII. № 3-4. С. 214 - 222. EDN: CWVBPR
4. Beker C., Turski M., Kaźmierczak K., Najgrakowski T., Jaszczak R., Rączka G., Wajchman-Świtalska S. The size of the assimilatory apparatus and its relationship with selected taxation and increment traits in pine (*Pinus sylvestris* L.) stands // Forests. 2021. Vol. 12. Is. 11. Pp. 1502. doi:10.3390/f12111502
5. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Шубаيري С.О.Р., Дар Дж. А., Часовских В.П. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии // ЭКО-ПОТЕНЦИАЛ (IKO-POTENCIAL). 2018. № 1 (21). С. 27-47. EDN: YWJRVO
6. Čihák T., Vejpustková M. Parameterisation of allometric equations for quantifying aboveground biomass of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) in the Czech Republic // Journal of forest science. 2018. Vol. 64. Pp. 108 – 117. doi:10.17221/61/2017-JFS
7. Novák J., Dušek D., Kacálek D., Slodičák M. Analysis of biomass in young Scots pine stands as a basis for sustainable forest management in Czech lowlands // Journal of forest science. 2017. Vol. 63, (12). Pp. 555 – 561. doi:10.17221/136/2017-JFS
8. Zeng W. S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China // Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Ed. by J. S. Tumuluri / Intech Publisher. 2017. Pp. 3-21. doi:10.5772/65664
9. Ogana F.N., Ercanli I. Modelling height-diameter relationships in complex tropical rain forest ecosystems using deep learning algorithm // J. For. Res. 2022. Pp. 883 – 898. doi.org/10.1007/s11676-021-01373-1
10. Raptis D.I., Kazana V., Kazaklis A., Stamatiou C. Mixed-effects height-diameter models for black pine (*Pinus nigra* Arn.) forest management // Trees. 2021. Vol. 35. Pp. 1167–1183. doi:10.1007/s00468-021-02106-x
11. Seki M., Sakici O.E. Ecoregional Variation of Crimean Pine (*Pinus nigra* subspecies pallasiana (Lamb.) Holmboe) Stand Growth // Forest Science. 2022. Vol. 68. Pp. 452 - 463. doi.org/10.1093/forsci/fxac030
12. Skudnik M., Jevšenak J. Artificial neural networks as an alternative method to nonlinear mixed-effects models for tree height predictions // Forest Ecology and Management. 2022. Vol. 507. Pp. 120017. doi:10.1016/j.foreco.2022.120017
13. Wu H., Xu H., Tang F., Ou G., Liao Z. Impacts of stand origin, species composition, and stand density on height-diameter

relationships of dominant trees in Sichuan Province, China // *Austrian Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 139. Pp. 51–72.

14. Anwar A., Saleem U., Shaiza B., Naved A., Asad A., Khan M.A. Quantifying forest carbon stocks by integrating satellite images and forest inventory data // *Austrian Journal of Forest Science*. 2018. Vol. 135. Pp. 93–117.

15. Bolat F., Ürker O., Günlü A. Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak (*Quercus frainetto* Ten.) in Dumanlı Forest Planning Unit, Çanakkale /Turkey // *Austrian Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 139 (3). Pp. 199-220.

doi:10.2154/aust.5487

References

1. Demakov Yu.P., Puryaev A.S., Chernyh V.L., Chernyh L.V. Allometric dependences application to assess phytomass of various fractions of trees and simulation of their dynamics. *Vesting of Volga State University of Technology. Series: forest. Ecology. Nature management*. 2015;2(26):19-36 (In Russ.)

2. Seki M. Predicting stem taper using artificial neural network and regression models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in northwestern Türkiye. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023;38(1-2):97-104.

3. Vais A.A., Kerbis E.S. Allometric patterns of biological productivity. *Conifers of the boreal area*. 2019;XXXVII,3-4:214-222 (In Russ.)

4. Beker C., Turski M., Kaźmierczak K., Najgrakowski T., Jaszczak R., Rączka G., Wajchman- Świtalska S. The size of the assimilatory apparatus and its relationship with selected taxation and increment traits in pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *Forests*. 2021;12(11):1502.

5. Usoltsev V.A., Tsepordej I.S., Shubairi S.O.R., Dar Dzh. A., Chasovskih V.P. *Additive allometric models of tree and stand biomass of two-needled pines as a basis of regional taxation standards for Eurasia. EKO-POTENCIAL*. 2018;(21):27-47 (In Russ.)

6. Čihák T., Vejputsková M. Parametrisation of allometric equations for quantifying

aboveground biomass of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) in the Czech Republic. *J. For. Sci.* 2018;64:108–117.

7. Novák J., Dušek D., Kacálek D., Slodičák M. Analysis of biomass in young Scots pine stands as a basis for sustainable forest management in Czech lowlands. *Journal of forest science*. 2017;63(12):555–561.

8. Zeng W.S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China. Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Ed. by J. S. Tumuluri. Intech Publisher;2017:3-21.

9. Ogana F.N., Ercanli I. Modelling height-diameter relationships in complex tropical rain forest ecosystems using deep learning algorithm. *J. For. Res.* 2022:883–898.

10. Raptis D.I., Kazana V., Kazaklis A., Stamatiou C. Mixed-effects height–diameter models for black pine (*Pinus nigra* Arn.) forest management. *Trees* 35. 2021;1167–1183.

11. Seki M., Sakici O.E. Ecoregional Variation of Crimean Pine (*Pinus nigra* subspecies pallasiana (Lamb.) Holmboe) Stand Growth). *Forest Science*. 2022;68:452-463.

12. Skudnik M., Јевљенак J. Artificial neural networks as an alternative method to nonlinear mixed-effects models for tree height predictions. *Forest Ecology and Management*. 2022;507:120017.

13. Wu H., Xu H., Tang F., Ou G., Liao Z. Impacts of stand origin, species composition, and stand density on height-diameter relationships of dominant trees in Sichuan Province, China. *Austrian Journal of Forest Science*. 2022;139:51–72.

14. Anwar A., Saleem U., Shaiza B., Naved A., Asad A., Khan M.A. Quantifying forest carbon stocks by integrating satellite images and forest inventory data. *Austrian Journal of Forest Science*. 2018;135:93–117.

15. Bolat F., Ürker O., Günlü A. Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak (*Quercus frainetto* Ten.) in Dumanlı Forest Planning Unit, Çanakkale/ Turkey. *Austrian Journal of Forest Science*. 2022;139(3):199-220.

Информация об авторах

Ольга Николаевна Тюкавина – доктор сельскохозяйственных наук, доцент;

Денис Николаевич Клевцов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии;

Николай Александрович Неверов – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

Olga. N. Tyukavina – Doctor of Science (Agriculture), Associate Professor

Denis N. Klevtsov – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Chair of Biology, Ecology and Biotechnology;

Nikolay A. Neverov – Candidate of Science (Agriculture), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 29.06.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023; принята к публикации 29.08.2023.

The article was submitted 29.06.2023; approved after reviewing 10.08.2023; accepted for publication 29.08.2023.