

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*5

М.О. Гурьянов, Д.Э. Раупова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ВЫСОТ И ДИАМЕТРОВ НА ВЫСОТЕ ГРУДИ В ДРЕВОСТОЯХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСНИЧЕСТВА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. Высоты и диаметры деревьев, являясь одними из основных лесотаксационных показателей, используемых при определении объемов стволов, их сортиментной оценке и во множестве других случаев, представляют значительный научно-практический интерес. Это обусловило проведение многочисленных исследований, посвященных исследованию взаимосвязи между ними. Большинство исследований было направлено на подбор математических моделей, с наибольшей точностью описывающих зависимость высот деревьев от их диаметров, а также установление их закономерностей для различных условий местопроизрастания, возрастов и других факторов [Pretzsch, 2009; Хлюстов, Лебедев, 2017; Лебедев, Кузьмичев, 2020]. Проводились также исследования, целью которых было описание механизмов формирования древесных стволов [Кофман, 1986] и многие другие.

В рамках предлагаемой работы на примере древостоев сосны обыкновенной Учебно-опытного лесничества Ленинградской области были рассмотрены взаимосвязи высот и диаметров на высоте груди с целью анализа описывающих их математических моделей и изучения их влияния на точность результатов определения сортиментной структуры.

Объект и методика исследования. В качестве объекта исследования были использованы материалы десяти постоянных пробных площадей (ППП), заложенных в высокобонитетных древостоях возраста от 40 до 140 лет с преобладанием деревьев сосны обыкновенной в Учебно-опытном лесничестве Ленинградской области. Сбор опытных данных включал в себя сплошной пересчет деревьев по ступеням толщины, а также замер с точностью до 0,1 см (м) диаметров на высоте груди и высот учетных деревьев, составляющих 20% от общего числа стволов.

Результаты обмеров учетных деревьев в дальнейшем были использованы для анализа математических моделей, описывающих зависимость их высот от диаметров на высоте груди. Достаточно подробное аналогичное исследование, посвященное древостоям березы, было проведено А.В. Лебедевым и В.В. Кузьмичевым [Лебедев, Кузьмичев, 2020], проводившими проверку ряда двухпараметрических моделей. Основываясь на его результатах, было выбрано пять моделей, показавших наибольшую точность:

1. Модели Буфорда М.А. [Buford, 1986]:

$$h = 1,3 + b_1 \cdot e^{\left(\frac{b_2}{d_{1,3}}\right)}, \quad (1)$$

где здесь и далее h – высота дерева; $d_{1,3}$ – диаметр на высоте груди (1,3 м).

2. Модели Стаудхаммер К.Л. и ЛеМэй В. [Staudhammer, LeMay, 2000], представляющие собой иную форму записи модели Буфорда М., чем обуславливается равная точность данных двух моделей и равенство параметров b_2 :

$$h = 1,3 + e^{\left(b_1 + \frac{b_2}{d_{1,3}}\right)}. \quad (2)$$

3. Модели Эль Мамуна Х.О. и др. [El Mamoun et al, 2013]:

$$h = 1,3 + \left(b_1 + \frac{b_2}{d_{1,3}}\right)^{-5}. \quad (3)$$

4. Модели Куртиса Р.О. [Curtis, 1967]:

$$h = 1,3 + b_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{d_{1,3}}\right)^{b_2}. \quad (4)$$

5. Модели Нэслунда М. [Näslund, 1929]:

$$h = 1,3 + \left(\frac{d_{1,3}}{b_1 + b_2 \cdot d_{1,3}}\right)^3. \quad (5)$$

Кроме того, была рассмотрена часто применяемая при построении кривых высот логарифмическая функция вида [Henriksen, 1950]:

$$h = b_1 + b_2 \cdot \ln d_{1,3}. \quad (6)$$

Результаты исследования. Проведенный регрессионный анализ позволил определить параметры каждой из данных моделей для древостоев сосны обыкновенной. Здесь следует отметить, что из-за многообразия факторов, влияющих на рост деревьев, даже при равных диаметрах высоты деревьев могут сильно различаться между собой, что сказывается на качестве моделей. По этой причине при их сравнительном анализе можно проводить визуальное

выявление и удаление выбросов [Лебедев, Кузьмичев, 2020] или, как это делается при перечислительной таксации насаждений, вычислять средние диаметры и высоты каждой из ступеней толщины как средние арифметические значения входящих в них учетных деревьев [Никифорчин и др., 2013]. В рамках предлагаемого исследования был использован второй подход.

Коэффициенты детерминации R^2 , характеризующие точность описания с помощью вышеперечисленных моделей зависимостей высот деревьев сосны обыкновенной от диаметров на высоте груди на каждой из десяти пробных площадей, приведены в табл. 1. Как можно заметить, точность рассмотренных моделей различается несильно. Так, средние значения коэффициентов детерминации варьировали от 78,58% у модели Нэслунда до 80,54% у логарифмической. Следует отметить, что для разных пробных площадей наибольшую точность показывали разные модели. Так, в ППП 58 квартала 104 наиболее точной была модель Куртиса, а наименее точной – логарифмическая. В ППП 3 квартала 110 наблюдалась противоположная картина. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований по данной тематике с целью выявления наиболее применимых для различных древесных пород, возрастов и условий местопроизрастаний моделей.

Таблица 1

Точность описания зависимости высот деревьев сосны обыкновенной от диаметров на высоте груди R^2 , %

Accuracy of the description of the dependence of the heights of Scots pine trees on the diameters at breast height R^2 , %

Номер квартала/ППП	Коэффициенты детерминации R^2 , % по номерам моделей				
	(1) и (2)	(3)	(4)	(5)	(6)
104 / 58	72,20	70,93	84,94	70,11	66,02
108 / 1	62,23	62,52	71,82	62,71	65,85
109 / 7	58,63	59,68	67,98	60,39	68,95
109 / 2	67,65	67,89	62,73	68,03	68,39
110 / 3	75,74	76,11	59,30	76,35	83,82
116 / 2	84,37	84,10	76,19	83,93	84,37
123 / 5	93,06	93,41	93,20	93,63	94,32
199 / 5	83,84	84,13	84,30	84,30	85,54
200 / 25	90,85	89,56	90,40	88,67	90,85
205 / 11	97,58	97,63	97,72	97,64	97,32
Минимальный	58,63	59,68	59,30	60,39	65,85
Максимальный	97,58	97,63	97,72	97,64	97,32
Средний	78,62	78,60	78,86	78,58	80,54

Одной из основных целей определения диаметров и высот деревьев является установление запаса и сортиментной структуры древостоев. Наиболее часто применяемым при перечислительной таксации методом вычисления запасов является основанный на использовании таблиц объемов стволов по разрядам высот, определяемых на основании значений средних диаметров на высоте груди и высот древостоев. Использование данного метода подразумевает, что разряд высоты является единым для всех деревьев данного элемента леса. Вместе с тем, зачастую разряды высоты отдельных ступеней толщины отличаются от определенных по средним значениям. Это может быть вызвано различиями в наклоне линии, описывающей зависимость высот деревьев от их диаметров на высоте груди, степени выпуклости и т. д., что в свою очередь обусловлено особенностями условий местопрорастания и прочими факторами. Пример подобных различий, полученный для ППП 11 квартала 205, приведен на рис. 1, содержащем полученную с помощью показавшей наибольшую для данной ППП точность моделью Р.О. Куртиса [Curtis, 1967], и соответствующую четвертому разряду высоты зависимость высот деревьев от их диаметров на высоте груди.

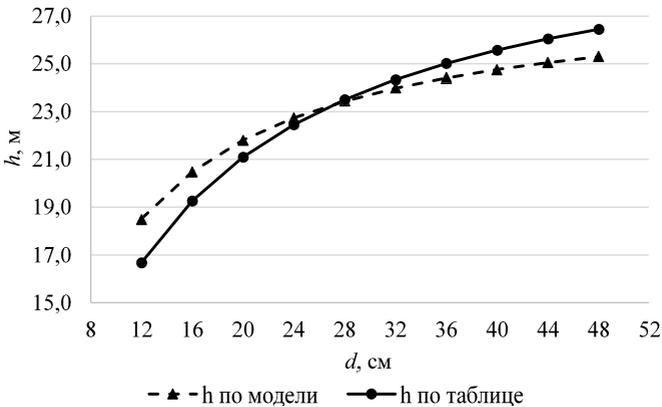


Рис. 1. Табличная и полученная для древостоя пробной площади зависимости высот деревьев от их диаметров на высоте груди

Fig. 1. Tabular and obtained for the tree stand of the sample plot dependence of the heights of trees on their diameters at breast height

Подобные расхождения могут в дальнейшем привести к ошибкам в определении запаса и выхода сортиментов. Для оценки их степени в рамках исследования были рассмотрены два подхода – с применением единого

для всего древостоя разряда высоты, и с индивидуальным определением разрядов высоты каждой ступени толщины. Результаты второго подхода в дальнейшем были приняты за истинные и использованы для вычисления относительных ошибок по запасу по формуле:

$$P = \frac{M_i - M_{\text{ист}}}{M_{\text{ист}}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где P – относительная ошибка, %; M_i – запас, определенный по единому для всех ступеней толщины разряду высоты, м³; $M_{\text{ист}}$ – запас, найденный по индивидуальному для каждой ступени толщины разрядам высот дерева, м³.

Величины расхождений в запасах, полученные для каждой из пробных площадей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расхождения в запасах древостоев сосны обыкновенной
Discrepancies in the growing stock of Scots pine

Номер квартала / ППП	Расхождения P , %
104 / 58	–6,81
108 / 1	–5,67
109 / 7	2,45
109 / 2	–8,15
110 / 3	–1,33
116 / 2	7,63
123 / 5	6,38
199 / 5	3,22
200 / 25	–3
205 / 11	–6,25

Проведенный согласно стандартной методике [Никифорчин и др., 2013] анализ приведенных в таблице величин расхождений позволил заключить, что грубых ошибок, превышающих тройную допустимую погрешность определения запаса, составляющую в данном случае $\pm 10\%$, не наблюдалось, систематическая ошибка составила $-1,2\%$, то есть, не превысила пороговое значение в 5% по модулю, случайная ошибка составила $\pm 5,7\%$. Среднеарифметическая величина ошибки $m = \pm 1,8$, что меньше среднеквадратической (случайной) ошибки в 3,2 раза. Таким образом,

можно сказать, что использование для вычисления запаса единых для всего древостоя разрядов высоты, и определяемых для каждой ступени толщины не дает существенно различающихся результатов.

Аналогичным образом в рамках исследования был проведен анализ расхождений в выходе сортиментов и суммарной стоимости древесины при использовании данных двух подходов (табл. 3).

Таблица 3

Расхождения (%) в объемах разных категорий древесины и ее стоимости, определенных по единым и индивидуальным для ступеней толщины разрядам высот

Discrepancies (%) in the volumes of different categories of wood and their values, determined according to uniform and individual for diameter classes height ranks

Номер квартала / ППП	Деловая древесина				Дрова	Ликвид	Стоимость
	крупная	средняя	мелкая	всего			
104 / 58	0	-8,94	-11,47	-20,41	-6,70	-7,35	-6,44
108 / 1	-4,15	-4,70	-1,95	-10,8	3,29	-4,13	-4,27
109 / 7	1,97	3,39	2,23	7,59	14,33	2,58	2,31
109 / 2	-11,22	-10,22	-1,70	-23,14	-7,14	-8,87	-9,69
110 / 3	0	-1,72	-2,31	-4,03	-1,33	-1,46	-1,30
116 / 2	13,75	5,79	2,83	22,37	7,62	7,89	8,79
123 / 5	0	9,04	4,55	13,59	7,14	7,19	7,80
199 / 5	1,48	5,82	-5,15	2,15	2,94	3,16	3,42
200 / 25	0	-3,38	-7,51	-10,89	-4,16	-3,17	-2,62
205 / 11	0	-6,50	-2,66	-9,16	-12,24	-0,02	-5,63

Полученные величины систематических ошибок не превысили 3,3%, а случайных – $\pm 14,6\%$, что свидетельствует о близости результатов материально-денежной оценки древостоев с использованием двух рассмотренных в рамках исследования подходов. Сравнительно высокое значение случайной ошибки в определении общего объема деловой древесины связано с накоплением ошибок составляющих ее объемов крупной, средней и мелкой категорий крупности. Но, так как общий объем деловой древесины не

учитывается при стоимостной оценке древостоев, а ошибка в определении общей стоимости не превысила 10%, можно сказать, что это расхождение не является существенным.

Вместе с тем, следует отметить, что выявленные расхождения в эмпирических соотношениях высот и диаметров деревьев и теоретических, описываемых закономерностями разрядов высот, свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в данном направлении с целью повышения точности определения таксационных показателей древостоев.

Библиографический список

- Кофман Г.Б.* Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 210 с.
- Лебедев А.В., Кузьмичев В.В.* Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 230. С. 100–113. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.230.100-113
- Никифорчин И.В., Ветров Л.С., Вавилов С.В., Гурьянов М.О., Минаев В.Н., Селиванов А.А.* Таксация леса. Практикум для подготовки бакалавров по направлению «Лесное дело». СПб.: СПбГЛТА, 2013. 160 с.
- Хлюстов В.К., Лебедев А.В.* Товарно-денежный потенциал древостоев и оптимизация лесопользования: монография. Иркутск: Мегалит, 2017. 328 с.
- Buford M.A.* 1986. Height-diameter relationships at age 15 in loblolly pine seed sources // *Forest Science*. No. 32(3). P. 812–818.
- Curtis R.O.* Height-diameter and height-diameter-age equations for second growth Douglas-fir // *Forest Science*. 1967. No. 13. P. 365–375.
- El Mamoun H.O., El Zein A.I., El Mugira M.I.* Modelling Height-Diameter Relationships of Selected Economically Important Natural Forests Species // *Journal of Forest Products & Industries*. 2013. No. 2(1). P. 34–42.
- Henriksen H.A.* Height/diameter curve with logarithmic diameter: brief report on a more reliable method of height determination from height curves, introduced by the State Forest Research Branch // *Dansk Skovforeningens Tidsskrift*. 1950. Vol. 35, no 4. P. 193–202.
- Näslund M.* Antalet provträd och höjdkurvans noggrannhet // *Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut*. 1929. No. 25. P. 93–170.
- Pretsch H.* *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4
- Staudhammer Ch.L., LeMay V.* Height prediction equations using diameter and stand density measures // *Forestry Chronicle*. 2000. No. 76(2). P. 303–309.

References

- Henriksen H.A.* Height/diameter curve with logarithmic diameter: brief report on a more reliable method of height determination from height curves, introduced by the

State Forest Research Branch. *Dansk Skovforeningens Tidsskrift*, 1950, vol. 35, no 4, pp. 193–202. (In Russ.)

Kofman G.B. Growth and shape of trees. Novosibirsk: Nauka, 1986. 210 p. (In Russ.)

Lebedev A.V., Kuz'michev V.V. Verification of bi-parameter models of dependence diameter on breast height in birch stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii*, 2020, iss. 230, pp. 100–113. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.230.100-113. (In Russ.)

Nikiforchin I.V., Vetrov L.S., Vavilov S.V., Guryanov M.O., Minaev V.N., Selivanov A.A. Forest taxation. A workshop for the preparation of bachelors in the field of «Forestry». St. Petersburg: SPbGLTA, 2013. 160 p. (In Russ.)

Buford M.A. Height-diameter relationships at age 15 in loblolly pine seed sources. *Forest Science*, 1986, no. 32(3), pp. 812–818.

Curtis R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second growth Douglas-fir. *Forest Science*, 1967, no. 13, pp. 365–375.

El Mamoun H.O., El Zein A.I., El Mugira M.I. Modelling Height-Diameter Relationships of Selected Economically Important Natural Forests Species. *Journal of Forest Products & Industries*, 2013, no. 2(1), pp. 34–42.

Khlyustov V.K., Lebedev A.V. Commodity-monetary potential of stands and optimization of forest management: monographia. Irkutsk: Megaprint, 2017. 328 p. (In Russ.)

Näslund M. Antalet provträd och höjdkurvans noggrannhet. *Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut*, 1929, no. 25, pp. 93–170.

Pretsch H. Forest Dynamics, Growth and Yield. Berlin Heidelberg: SpringerVerlag, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-88307-4

Staudhammer Ch.L., LeMay V. Height prediction equations using diameter and stand density measures. *Forestry Chronicle*, 2000, no. 76(2), pp. 303–309.

Материал поступил в редакцию 20.06.2021

Гурьянов М.О., Раупова Д.Э. Исследование взаимосвязи высот и диаметров на высоте груди в древостоях сосны обыкновенной Учебно-опытного лесничества Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 6–15. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.6-15

Взаимосвязи между высотами деревьев и диаметрами на высоте груди широко применяются при определении запасов и сортиментной структуры древостоев. Для их описания применяются многочисленные математические модели. Сравнительный анализ точности шести моделей на примере древостоев сосны обыкновенной Учебно-опытного лесничества Ленинградской области показал близкую точность каждой из них. При этом для разных пробных площадей наибольшую точность показывали разные модели. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований по данной тематике с целью

выявления наиболее применимых для различных древесных пород, возрастов и условий местопроизрастаний математических моделей. В практической деятельности часто используются таблицы, составленные с учетом соотношений высот и диаметров на высоте груди в древостоях, основными из которых являются таблицы объемов стволов по разрядам высот и сортиментные таблицы. В рамках исследования было установлено, что фактические зависимости высот деревьев от диаметров на высоте груди отличаются от приведенных в таблицах, что обусловлено индивидуальными особенностями структуры и условий местопроизрастания древостоев. По этой причине разряды высот, определенные для отдельных ступеней толщины, зачастую отличаются от найденных по средним для древостоя высоте и диаметру на высоте груди. Это приводит к расхождениям в найденных с учетом данных двух подходов запасах древостоев, а также выхода и стоимости сортиментов в них. Несмотря на незначительность различий, их наличие свидетельствует о необходимости дальнейших исследований с целью повышения точности определения таксационных показателей древостоев.

Ключевые слова: высота, диаметр на высоте груди, сосна обыкновенная, математические модели, сортиментная структура.

Guryanov M.O., Raupova D.E. A study of the relationship between heights and diameters at breast height in tree stands of Scots pine in the Training and Experimental Forestry of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 6–15 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.6-15

The relationships between heights and diameters at breast height of trees are widely used in determining of growing stock and assortment structure of stands. Numerous mathematical models are used to describe them. A comparative analysis of the accuracy of six models on the example of tree stands of Scots pine in the Training and Experimental Forestry of the Leningrad region showed the close accuracy of each of them. For different sample plots, however, the highest accuracy was showed by different models. This necessitates further research on this topic in order to identify the most applicable mathematical models for different tree species, ages and habitat conditions. In practice are often used the tables, compiled taking into account the ratios of heights and diameters at breast height in tree stands, the main of which are tables of volumes of trees by height ranks and assortment tables. Within the framework of the study, it was found that the actual relationships between tree heights and diameters at breast height differ from those given in the tables, which is due to the individual features of the stand structure and habitat conditions. For this reason, the height ranks, determined for individual diameter classes often differ from those found for the average tree stand height and diameter at breast height. This leads to discrepancies in the growing stocks of tree stands, found taking into account these two

approaches, as well as the yield and cost of assortments in them. Although the differences are insignificant, they highlight the need for further research in order to improve the accuracy of determining the inventory parameters of tree stands.

Key words: height, diameter at breast height, Scots pine, mathematical models, assortment structure.

ГУРЬЯНОВ Михаил Олегович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-code: 2801-5477.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: m-bear2004@mail.ru

GURYANOV Mikhail O. – PhD (Agriculture), associate Professor of the Department of forest inventory, forest management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2801-5477.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: m-bear2004@mail.ru

РАУПОВА Диана Эдуардовна – магистр кафедры почвоведения и лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-code: 8604-1191.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: diana.raupova@bk.ru

RAUPOVA Diana E. – Master of the Department of Soil Science and forest cultures of the St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8604-1191.

194021. Institutskiy per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: diana.raupova@bk.ru