

К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТВОЛА ПО ИХ ЗНАЧЕНИЯМ НА ВЫСОТЕ ГРУДИ НА ПРИМЕРЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКОВ И КУЛЬТУР***Н. И. Плюха^{1,2}, В. А. Усольцев^{1,3}, В. П. Часовских³**¹Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37²Ботанический сад Уральского отделения РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а³Уральский государственный экономический университет,
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45
E-mail: Usoltsev50@mail.ru^{1,2}nikcskript@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>^{1,3}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>³u2007u@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9454-9824>

Аннотация. В связи с изменением климата во всем мире проводятся интенсивные исследования биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесов. В данных исследованиях наибольшая доля трудозатрат приходится на определение квалитетрических показателей компонентов биомассы деревьев – плотности древесины и коры ствола, оцениваемой стереометрическим методом, и влажности или содержания сухого вещества в компонентах биомассы, оцениваемой весовым методом. Квалитетрические данные стволов деревьев оцениваются в связи с дендрометрическими показателями или в связи с квалитетрическими характеристиками ствола на высоте груди. Цель настоящего исследования состояла в анализе смещений квалитетрических показателей, рассчитанных по сокращенному количеству дисков и как среднеарифметических величин, относительно тех же показателей, рассчитанных по 10 дискам с учетом «веса» каждой секции ствола. Исследования проведены в бору Аман-Карагай в условиях сухой степи Тургайского прогиба, где в чистых сосновых насаждениях было заложено 37 пробных площадей, в том числе 23 – в культурах и 14 – в естественных сосняках, на которых было взято 300 модельных деревьев, в том числе 190 в культурах и 110 в естественных сосняках. В результате выполнен сравнительный анализ различных способов определения названных квалитетрических показателей для всего ствола по их измеренным значениям на его относительных высотах. При оценке квалитетрических показателей всего ствола по их локальным измерениям на дисках наиболее надежным является расчет средневзвешенных значений по 10 дискам, взятым на относительных высотах ствола. Оценка квалитетрических показателей как среднеарифметических значений локальных определений и как средневзвешенных по сокращенному количеству дисков (от 1 до 4) дает смещения, которые необходимо учитывать при упрощенных методах оценки средних квалитетрических показателей древесины и коры стволов.

Ключевые слова: содержание сухого вещества и базисная плотность древесины и коры, естественные сосняки и культуры, многофакторные модели.

*Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 1, P. 41–49***ON THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALIMETRIC PARAMETERS OF THE TREE STEMS BY THEIR VALUES AT BREAST HEIGHT USING THE EXAMPLE OF NATURAL AND ARTIFICIAL *PINUS SYLVESTRIS*******N. I. Plyukha^{1,2}, V. A. Usoltsev^{1,3}, V. P. Chasovskikh³**¹Ural State Forest Engineering University,
Siberian tract, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
202a, 8 Marta str., 620144, Yekaterinburg, Russian Federation³Ural State University of Economics,
62/45, 8 Marta str./ Narodnaya Volya, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation
E-mail: *Usoltsev50@mail.ru

* Работа выполнена в рамках тематики научных исследований Уральского государственного лесотехнического университета.

** The work was carried out within the framework of scientific research at the Ural State Forest Engineering University.

^{1,2}nikcskript@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>

^{1,3}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

³i@u2007u.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9454-9824>

Abstract. Due to climate change, intensive research is being performed worldwide on the biological productivity and carbon deposition capacity of forests. In these studies, the largest share of labor is spent on determining the qualimetric parameters of the components of tree biomass – the density of wood and bark of stem, estimated by the stereometric method, and moisture or dry matter content in the components of biomass, estimated by the weight method. The qualimetric data of tree stems are evaluated in relation to dendrometric indicators or in relation to the qualimetric characteristics of the stem at breast height. The purpose of this study was to analyze the biases of qualimetric indicators calculated from a reduced number of discs and as arithmetic averages in comparison to the same indicators calculated from 10 discs, taking into account the “weight” of each section of the stem. The research was performed in the Aman-Karagai forest in the conditions of the dry steppe of the Turgai Depression, where 37 sample plots were established in pure pine forests, including 23 ones in plantations and 14 in natural stands, on which 300 model trees were taken, including 190 in plantations and 110 in natural stands. As a result, a comparative analysis of various methods for determining the qualimetric indicators for the entire stem was performed based on their measured values at its relative heights. When evaluating the qualimetric parameters of the entire stem based on their local measurements on disks, the most reliable result gives the weighted average values calculation for 10 disks taken at relative heights of the stem. Evaluating qualimetric indicators as the arithmetic mean of local definitions and as weighted averages for a reduced number of disks (from 1 to 4) gives the biases, that should be taken into account in simplified methods of estimating the average qualimetric parameters of wood and bark of the tree stem.

Keywords: dry matter content and density of wood and bark, natural pine forests and plantations, multifactorial models.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с изменением климата во всем мире проводятся интенсивные исследования биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесов. В данных исследованиях наибольшая доля трудозатрат приходится на определение квалитетических показателей компонентов биомассы деревьев – плотности древесины и коры ствола, оцениваемой стереометрическим методом, и влажности или содержания сухого вещества в компонентах биомассы, оцениваемой весовым методом [3; 7; 8; 37; 45].

Из названных квалитетических показателей наиболее востребована и изучена базисная плотность древесины, определяемая как отношение сухой массы к объему свежей древесины. Это фундаментальный функциональный показатель, который связан с депонированием углерода в лесной биомассе [19; 24; 25; 36; 41; 43], с функциональными характеристиками деревьев, включая механические и физиологические свойства, и зависит от породного состава и условий формирования насаждений [23; 30; 42]. Базисная плотность древесины играет важную роль в реализации конкурентоспособности древесных пород, а также в формировании состава, структуры и функций лесных экосистем [21; 33; 39; 46]. Она влияет на скорости отмирания деревьев и разложения древесины [22; 23; 40], которые играют важную роль в степени реакции деревьев на изменения окружающей среды. Выполненный глобальный анализ базисной плотности древесины около 11 тыс. древесных видов в географическом и экологическом аспектах способствует более глубокому пониманию территориального распределения наземной биомассы, а также влияния на лесные экосистемы изменений окружающей среды [32].

Оценка объема коры была всегда одной из приоритетных задач традиционной лесной таксации [9; 10; 13], и для использования имеющихся таблиц

в оценках биопродуктивности деревьев необходимы данные о базисной плотности коры стволов. В литературе имеются данные определения базисной плотности древесины и коры не только стволов [12; 14; 18; 19], но и ветвей [1; 15] и корней [31], а также влажности (или содержания сухого вещества) в различных фракциях биомассы деревьев [3; 5; 6; 29]. Квалитетические данные стволов деревьев оцениваются в связи с дендрометрическими показателями [4; 12; 16; 19; 28; 34; 35; 38; 44; 47] или в связи с квалитетическими характеристиками ствола на высоте груди [2; 12; 26].

В нашей предыдущей работе [11] был выполнен совмещенный регрессионный анализ зависимости средневзвешенных квалитетических показателей стволов от соответствующих показателей, измеренных на высоте груди, и от такой дендрометрической характеристики дерева, как его высота. Квалитетические показатели были рассчитаны по 10 сечениям ствола с учетом «веса» каждого из отрезков. Известно, что измерение квалитетических показателей древесины и коры у 10 дисков каждого ствола довольно трудоемко в связи с необходимостью их обмера, сушки и двойного взвешивания [11]. Поэтому в литературе практиковалось взятие не 10, а трех дисков на относительных высотах 0,2; 0,5 и 0,8 от общей высоты ствола [16], без анализа возможных смещений оценок в результате названного сокращения числа дисков. Л. Н. Исаева [8] (1978) связывала плотность древесины ствола на высоте груди с общим для ствола показателем, рассчитанным как среднеарифметическая величина локальных значений, также без анализа возможных смещений по причине не учитываемого разного вклада секций ствола в общую оценку.

Целью настоящего исследования было: используя выше упомянутые исходные данные [11], выполнить анализ смещений квалитетических показателей, рассчитанных по сокращенному количеству дисков и как

среднеарифметических величин, относительно тех же показателей, рассчитанных по 10 дискам с учетом «веса» каждой из 10 секций ствола.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в бору Аман-Карагай в условиях сухой степи Тургайского прогиба (53°10' с. ш., 64°00' в. д.), где в чистых сосновых насаждениях было заложено 37 пробных площадей, в том числе 23 – в культурах и 14 – в естественных сосняках, на которых было взято 300 модельных деревьев, в том числе 190 в культурах и 110 в естественных сосняках. Характеристика исходных данных показана в табл. 1.

За основу для сравнительного анализа приняты ранее использованные квалитметрические показатели древесины и коры, рассчитанные как средневзвешенные по 10 относительным высотам: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 от общей высоты дерева H (м), а также соответствующие показатели, измеренные на высоте груди [11].

По отношению к названным средневзвешенным квалитметрическим показателям, рассчитанным по 10

дискам, была выполнена оценка смещений соответствующих показателей, рассчитанных по четырем вариантам (при $i = 1 \dots 4$), а именно: (1) по 4 дискам, (2) по 3 дискам, (3) по 1 диску, и (4) показателей, полученных путем простого арифметического усреднения всех 10 локальных значений (по аналогии с методом Л. Н. Исаевой). Была составлена матрица фактических исходных данных согласно схеме фиктивных переменных [17; 27] (табл. 2).

За основу расчетов принята структура модели, разработанная ранее при оценке средневзвешенных квалитметрических показателей по значениям, полученным на высоте груди ствола [11]:

$$\ln Q = a_0 + a_1 \ln Q_{1,3} + a_2 (\ln Q_{1,3})^2 + a_3 \ln H + a_4 \ln D + a_5 (\ln Q_{1,3})(\ln H) + \Sigma_{bi} X_i, \quad (1)$$

где Q – квалитметрические показатели (Ss , Sb , ρs и ρb), рассчитанные по одному из 5 вариантов ($i = 0 \dots 4$) (табл. 2); $Q_{1,3}$ – квалитметрические показатели ствола на высоте груди ($Ss_{1,3}$; $Sb_{1,3}$; $\rho s_{1,3}$ и $\rho b_{1,3}$); $\Sigma_{bi} X_i$ – блок фиктивных переменных [17; 27].

Таблица 1
Характеристика исходных данных для расчета моделей

Показатель *	Естественные сосняки **				Культуры сосны **			
	M_m	$M_{\max}$	$M_{\min}$	$\pm \sigma$	M_m	$M_{\max}$	$M_{\min}$	$\pm \sigma$
H , м	8,5	26,1	1,4	5,7	6,9	16,2	1,6	3,3
D , см	7,3	34,5	0,3	6,8	6,8	21,7	0,4	4,1
$Ss_{1,3}$, %	50,2	65,2	36,8	5,8	44,6	68,3	30,7	6,8
Ss_{cp} , %	48,7	63,5	38,7	5,9	42,9	63,9	32,3	5,6
$Sb_{1,3}$, %	60,1	77,3	38,0	11,0	54,5	76,1	35,0	9,8
Sb_{cp} , %	52,1	67,5	36,9	6,1	49,0	64,5	37,3	5,7
$\rho s_{1,3}$, кг/м ³	436,8	577,7	341,0	48,5	377,8	492,4	289,2	32,6
ρs_{cp} , кг/м ³	421,8	571,5	336,2	51,7	370,9	460,8	305,1	34,8
$\rho b_{1,3}$, кг/м ³	309,5	567,4	190,9	84,8	283,9	495,5	158,6	62,4
ρb_{cp} , кг/м ³	327,6	533,2	220,9	61,3	294,6	406,0	225,1	40,1

Примечания:

* H – высота дерева; D – диаметр ствола на высоте груди; $Ss_{1,3}$, $Sb_{1,3}$, $\rho s_{1,3}$ и $\rho b_{1,3}$ – соответственно содержание сухого вещества в древесине, то же в коре, базисная плотность древесины, то же коры, на высоте груди; Ss_{cp} , Sb_{cp} , ρs_{cp} и ρb_{cp} – соответственно содержание сухого вещества в древесине, то же в коре, базисная плотность древесины, то же коры, средневзвешенные по 10 дискам;

** M_m , $M_{\max}$ и $M_{\min}$ – соответственно средние, максимальные и минимальные значения; σ – стандартные отклонения.

Таблица 2
Структурирование исходных данных в виде блока фиктивных переменных

X_i	Варианты исходных данных	X_1	X_2	X_3	X_4
X_0	Взвешенные по 10 дискам	0	0	0	0
X_1	Взвешенные по 4 дискам (0; 0,2; 0,5; 0,8 H)	1	0	0	0
X_2	Взвешенные по 3 дискам (0,2; 0,5; 0,8 H)	0	1	0	0
X_3	Значение для одного среднего диска (0,5 H)	0	0	1	0
X_4	Среднеарифметическое значение 10 дисков	0	0	0	1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика полученных моделей для каждой зависимой переменной приведена в табл. 3. Все приведенные в табл. 3 регрессионные коэффициенты при численных переменных $\ln H$, $\ln D$, $\ln Q_{1,3}$, $(\ln Q_{1,3})^2$ и $(\ln Q_{1,3})(\ln H)$ значимы на уровне вероятности $P < 0,05$. Полученные расчетом модели (1) действительны

в пределах изменчивости независимых переменных, показанных в табл. 1.

Судя по табл. 3, можно заключить, что содержание сухого вещества в древесине как естественных сосняков, так и культур, на статистически значимом уровне отличается от базовых показателей (при X_0) по всем 4 вариантам, обозначенным в табл. 2, как X_1 , X_2 , X_3

и X_4 . По остальным трем квалитетическим показателям статистическая значимость подтверждена лишь по двум вариантам, обозначенным в табл. 2 как X_3 и X_4 . Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что по отношению к базовым квалитетическим показателям, рассчитанным путем взвешивания по 10 дискам, наибольшими смещениями характеризуются показатели, рассчитанные по одному среднему сечению, и показатели, рассчитанные как среднеарифметические локальных значений. Наименьшие смещения свойственны средневзвешенным квалитетическим показателям, рассчитанным по 4 и 3 дискам (X_1 и X_2).

С целью получения количественных величин названных смещений модели (1) протабулированы по средним значениям независимых численных переменных, показанных в табл. 1. Результаты табулирования и рассчитанные по ним названные выше смещения показаны в табл. 4.

Согласно табл. 4 наименьшие смещения квалитетических показателей (от $-3,2$ до $1,2$ %) свойственны

вариантам X_1 и X_2 , где названные показатели оцениваются соответственно по 4 и 3 дискам, а также варианту X_4 (от $-2,2$ до $2,8$ %), где показатели рассчитаны как среднеарифметические локальных значений. Смещения по варианту X_3 существенно выше и колеблются от $-7,6$ до $9,2$ %. Причем, все названные выше смещения различаются в естественных сосняках и культурах и, по-видимому, будут отличаться от аналогичных показателей других древесных видов. Известно, что статистически значимые смещения не устраняются путем увеличения числа наблюдений, и, несмотря на их относительно небольшие величины, должны учитываться при упрощенных методах оценки средних квалитетических показателей древесины и коры стволов.

Соотношение фактических и расчетных значений квалитетических показателей по моделям (1) свидетельствует о наличии равномерных остаточных дисперсий и об отсутствии корреляции остатков (рис. 1 и 2).

Таблица 3
Характеристика моделей (1)

$\ln Q$	Естественные сосняки				Культуры сосны			
	$\ln S_s$	$\ln S_b$	$\ln p_s$	$\ln p_b$	$\ln S_s$	$\ln S_b$	$\ln p_s$	$\ln p_b$
a_0	2,7981	5,3631	17,6625	4,6126	2,6744	6,9352	-9,7805	7,2936
$a_1 \ln Q_{1,3}$	—	-1,9211	-4,4872	—	—	-2,6949	4,6311	-1,4659
$a_2 (\ln Q_{1,3})^2$	0,0728	0,4092	0,4255	0,0337	0,0800	0,5090	-0,3325	0,2039
$a_3 \ln H$	-0,5796	1,3212	0,0418	—	-0,5166	1,0888	—	0,9587
$a_4 \ln D$	-0,0715	-0,0286	-0,0990	-0,1694	-0,0384	-0,0329	-0,0448	-0,0725
$a_5 (\ln Q_{1,3})(\ln H)$	0,1584	-0,3649	—	0,0306	0,1350	-0,3191	—	-0,1423
X_1	-0,0228	0,0228	-0,0083	-0,0084	-0,0246	0,0009	-0,0139	-0,0321
X_2	0,0208	-0,0043	0,0084	0,0028	0,0140	0,0021	0,0033	0,0073
X_3	-0,0213	-0,1575	-0,0305	0,0721	-0,0306	-0,1725	-0,0395	0,0879
X_4	-0,0226	-0,0311	-0,0136	0,0279	-0,0212	-0,0459	-0,0142	0,0207
$\text{adj}R^2$	0,834	0,746	0,876	0,783	0,860	0,802	0,673	0,681
SE	0,052	0,071	0,046	0,092	0,048	0,061	0,044	0,084

Примечания. Свободный член моделей (a_0) скорректирован на логарифмическую трансформацию [20]; $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели. Жирным шрифтом выделены регрессионные коэффициенты при фиктивных переменных, соответствующих вариантам квалитетических показателей (X_1 и X_2) (табл. 2), которые на статистически значимом уровне (P_{05}) не отличаются от базовых значений, вычисленных как средневзвешенные по 10 дискам.

Таблица 4
Результаты табулирования моделей (1) по средним значениям независимых переменных и рассчитанные по ним смещения квалитетических показателей четырех упрощенных вариантов по отношению к базовому

X_i	S_s		S_b		p_s		p_b	
	%	$\Delta\%$	%	$\Delta\%$	кг/м ³	$\Delta\%$	кг/м ³	$\Delta\%$
Естественные сосняки								
X_0	47,4	—	51,0	—	404,2	—	317,3	—
X_1	46,4	-1,0	52,2	1,2	400,8	-0,8	314,6	-0,8
X_2	48,4	1,0	50,8	-0,4	407,6	0,8	318,2	0,3
X_3	46,4	-1,0	43,6	-7,4	392,0	-3,0	341,0	7,5
X_4	46,4	-1,0	49,4	-1,6	398,7	-1,4	326,3	2,8
Культуры сосны								
X_0	42,4	—	48,1	—	367,5	—	292,8	—
X_1	41,4	-1,0	48,1	0	362,4	-1,4	283,5	-3,2
X_2	43,0	0,6	48,2	0,1	368,7	0,3	294,9	0,7
X_3	41,1	-1,3	40,5	-7,6	353,3	-3,9	319,6	9,2
X_4	41,5	-0,9	45,9	-2,2	362,3	-1,4	298,9	2,1

Примечание. Δ – смещение показателей вариантов $X_1 \dots X_4$ относительно базового X_0 .

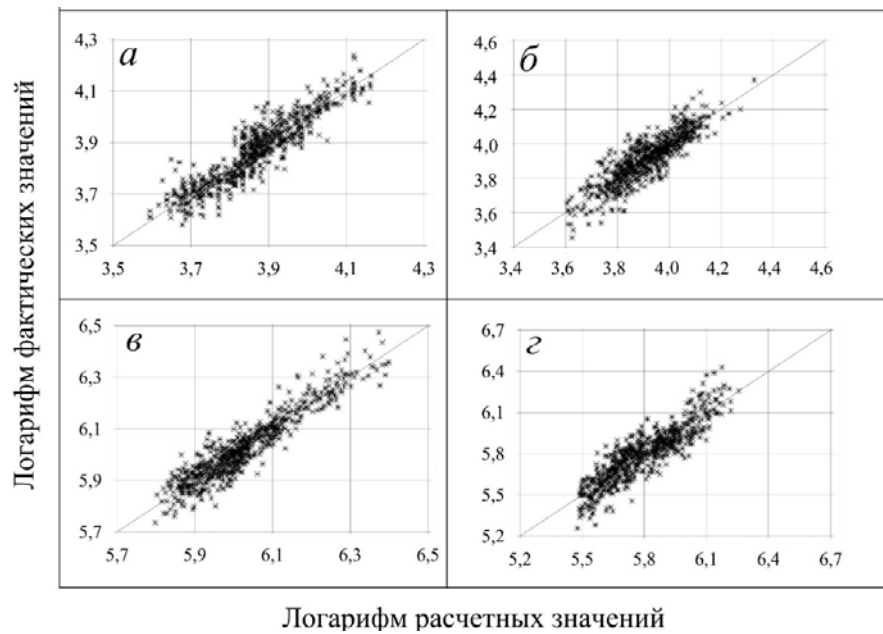


Рис. 1. Соотношение фактических и расчетных значений квалитетрических показателей по моделям (1) для естественных сосняков. Здесь и далее: *a*, *б*, *в* и *г* – соответственно *Ss*, *Sb*, *ps* и *pb*

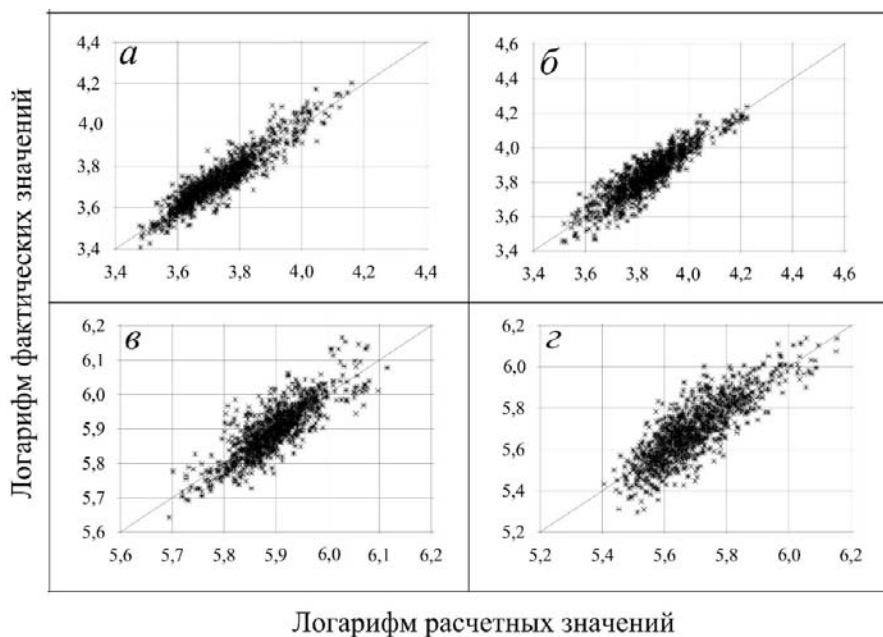


Рис. 2. Соотношение фактических и расчетных значений квалитетрических показателей по моделям (1) для культур сосны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по фактическим данным содержания сухого вещества в древесине и коре и базисной плотности древесины и коры в естественных сосняках (110 модельных деревьев) и культурах (190 модельных деревьев) Тургайского прогиба выполнен сравнительный анализ различных способов определения названных квалитетрических показателей для всего ствола по их измеренным значениям на его относительных высотах.

Установлены смещения квалитетрических показателей, рассчитанных по сокращенному количеству дисков и как среднеарифметических величин, относительно тех же показателей, рассчитанных по 10 дис-

кам с учетом «веса» каждой секции ствола. При этом величины смещений у деревьев естественных насаждений и культур различаются.

При оценке квалитетрических показателей всего ствола по их локальным измерениям на дисках наиболее надежным является расчет средневзвешенных значений по 10 дискам, взятым на относительных высотах ствола. Оценка квалитетрических показателей как среднеарифметических значений локальных определений и как средневзвешенных по сокращенному количеству дисков (от 1 до 4) дает смещения, которые должны учитываться при упрощенных методах оценки средних квалитетрических показателей древесины и коры стволов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Голиков В. В. Плотность коры ветвей светловых пород Сибири // Лиственница и ее использование в народном хозяйстве. Красноярск : СибТИ, 1982. С. 23–25.
- Данилов Д. А., Тюрин Д. С., Зайцев Д. А. Плотность древесины сосны в плантационных насаждениях, выращиваемых по интенсивной технологии в Ленинградской области // Столяровские чтения : сб. материалов науч.-практ. конф. СПб. : СПбНИИЛХ, 2023. С. 21–24.
- Данилов М. Д. Изменение веса и влажности хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с собственным возрастом и возрастом дерева // Доклады Академии наук СССР. 1948. Т. 59. № 8. С. 1487–1490.
- Демаков Ю. П., Шарапов Е. С., Королев А. С. и др. Плотность заболонной древесины сосны обыкновенной в лесах Марийского Заволжья // Лесоведение. 2025. № 1. С. 15–27.
- Исаева Л. Н. Особенности распределения влаги в различных частях древесины стволов кедра сибирского // Труды Ин-та леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 77–82.
- Исаева Л. Н. Распределение влажности в стволах растущих деревьев основных пород Восточной Сибири // Свойства древесины, ее защита и новые древесные материалы. М. : Наука, 1966. С. 3–10.
- Исаева Л. Н. Влажность древесины растущих деревьев в различных районах произрастания // Древесина и древесные материалы. Красноярск : ИЛиД СО РАН, 1974. С. 18–28.
- Исаева Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90–94.
- Крюденер А. А. Массовые таблицы и таблицы сбега осины Европейской России. Вып. 4. СПб. : Типография Санкт-Петербургского управления уделов, 1911. 86 с.
- Нахабцев И. А. Таксация древесной коры. Методические указания и таблицы процентов коры к самостоятельной работе студентов. Л. : ЛЛТА, 1990. 36 с.
- Плюха Н. И., Усольцев В. А., Часовских В. П. Оценка средневзвешенных квалитетических показателей ствола по их значениям на высоте груди в естественных сосняках и культурах // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43. № 6. С. 47–57.
- Полубояринов О. И. Плотность древесины. М. : Лесная пром-сть, 1976. 160 с.
- Пчелинцев В. И. Таксация коры лиственницы // Лиственница и ее комплексная переработка. Красноярск : СибТИ, 1987. С. 9–14.
- Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1988. 253 с.
- Усольцев В. А., Передерий О. Н., Прохоров Ю. А. Квалитетия ветвей в сосняках Аман-Карагайского бора // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1985. № 7. С. 74–78.
- Усольцев В. А., Воробейчик Е. Л., Бергман И. Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. 365 с.
- Усольцев В. А., Колчин К. В., Воронов М. П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea* L.) // Эко-потенциал. 2017. № 1 (17). С. 22–39. URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С. Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии // Сибирский лесной журнал. 2022. № 3. С. 59–68.
- Успенский В. В. Изменчивость плотности древесины сосны и ее использование в весовой таксации // Известия вузов. Лесной журнал. 1980. № 6. С. 9–12.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53.
- Bouchard E., Searle E., Drapeau P. et al. Global patterns and environmental drivers of forest functional composition // Global Ecology and Biogeography. 2024. Vol. 33. P. 303–324.
- Ceornea C., Drăgoi M. A new metrics to manage the deadwood in forest stewardship council certified forests // Forestist. 2025. Vol. 75. Article 0040.
- Chave J., Coomes D., Jansen S. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum // Ecology Letters. 2009. Vol. 12. P. 351–366.
- Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R. et al. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species // Ecological Applications. 2006. Vol. 16. № 6. P. 2356–2367.
- Chowdhury M. Q., Sarker S. K., Ali M. B. et al. Accounting intra-tree radial wood density variation estimates more accurate above ground mangrove biomass in the Sundarbans // European Journal of Forest Research. 2025. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01784-3>
- Fedyukov V. I., Musikhina L. A., Chernova M. S. et al. A non-destructive prediction method for the wood density variations of silver birch trees growing in the Middle Volga region, Russia // South-East European Forestry. 2020. Vol. 11(1). P. 85–90.
- Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z. et al. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // Journal of Forest Science. 2012. Vol. 58. No. 3. P. 101–115.
- Giagli K., Vavrcík H., Fajstavr M. et al. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // Wood Research. 2019. Vol. 64. P. 1011–1022.
- Glass S. V., Zelinka S. L. Moisture relations and physical properties of wood // Wood handbook: wood as an engineering material. Chapter 4. Centennial Edition. General technical report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. P. 4.1–4.19.

30. Kraft N. J. B., Metz M. R., Condit R. S. et al. The relationship between wood density and mortality in a global tropical forest data set // *New Phytologist*. 2010. Vol. 188. P. 1124–1136.
31. Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J. et al. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder // *Forests*. 2023. Vol. 14. Article 135.
32. Mo L., Crowther T. W., Maynard D. S. et al. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks // *Nature Ecology and Evolution*. 2024. Vol. 8(12). P. 2195–2212.
33. Pérez-Ramos I. M., Matías L., Gómez-Aparicio L. et al. Functional traits and phenotypic plasticity modulate species coexistence across contrasting climatic conditions // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Article 2555.
34. Petráš R., Mecko J., Krupova D. et al. Aboveground biomass basic density of softwoods tree species // *Wood Research*. 2019. Vol. 64(2). P. 205–212.
35. Petráš R., Mecko J., Krupova D. et al. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species // *Wood Research*. 2020. Vol. 65(6). P. 1001–1012.
36. Poorter L., Rozendaal D. M. A., Bongers F. et al. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // *Nature Ecology and Evolution*. 2019. Vol. 3. P. 928–934.
37. Portal-Cahuana L. A., Piña E. A. G., Tuesta G. P. et al. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru // *CERNE*. 2023. Vol. 29. Article e-103143.
38. Que Q., Ouyang K., Li C. et al. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China // *Forestry Research*. 2022. Vol. 2. Article 12.
39. Reich P. B., Wright I. J., Cavender-Bares J. et al. The evolution of plant functional variation: traits, spectra and strategies // *International Journal of Plant Sciences*. 2003. Vol. 164. P. S143–S164.
40. Reis S. M., Marimon B. S., Muelbert A. E. et al. Climate and crown damage drive tree mortality in southern Amazonian edge forests // *Journal of Ecology*. 2022. Vol. 110. P. 876–888.
41. Saatchi S. S., Harris N. L., Brown S. et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2011. Vol. 108. P. 9899–9904.
42. Swenson N. G., Enquist B. J. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community – wide variation across latitude and elevation // *American Journal of Botany*. 2007. Vol. 94. No. 3. P. 451–459.
43. Thurner M., Beer C., Santoro M. et al. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests // *Global Ecology and Biogeography*. 2014. Vol. 23. P. 297–310.
44. Tonouewa M., Biao S. S. H., Assede E. et al. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis* // *Maderas Ciencia y tecnología*. 2022. Vol. 24. P. 1–14.
45. Vieilledent G., Fischer F. J., Chave J. et al. New formula and conversion factor to compute basic wood density of tree species using a global wood technology database // *American Journal of Botany*. 2018. Vol. 105(10). P. 1–9.
46. Westoby M., Wright I. J. Land-plant ecology on the basis of functional traits // *Trends in Ecology and Evolution*. 2006. Vol. 21. P. 261–268.
47. Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z. et al. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe // *EGUsphere*. 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2691>.

REFERENCES

1. Golikov V. V. Plotnost' kory vetvej svetlo-khvojnykh porod Sibiri // *Listvennitsa i yeye ispol'zovanie v narodnom khozyajstve*. Krasnoyarsk : SibTI, 1982. S. 23–25.
2. Danilov D. A., Tyurin D. S., Zajtsev D. A. Plotnost' drevesiny sosny v plantatsionnykh nasazhdeniyakh, vyrashchivaemykh po intensivnoj tekhnologii v Leningradskoj oblasti // *Stolyarovskie chteniya: Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb. : SPbNILKh, 2023. S. 21–24.
3. Danilov M. D. Izmenenie vesa i vlazhnosti khvoi sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) v svyazi s sobstvennym vozrastom i vozrastom dereva // *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1948. T. 59, № 8. S. 1487–1490.
4. Demakov Yu. P., Sharapov E. S., Korolev A. S. i dr. Plotnost' zabolonnoj drevesiny sosny obyknovnoy v lesakh Marijskogo Zavolzhiya // *Lesovedenie*. 2025. № 1. S. 15–27.
5. Isaeva L. N. Osobennosti raspredeleniya vlagi v razlichnykh chastyakh drevesiny stvolov kedra sibirskogo // *Trudy In-ta lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR*. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1963. S. 77–82.
6. Isaeva L. N. Raspredeleniye vlazhnosti v stvolakh rastushchikh derevyev osnovnykh porod Vostochnoi Sibiri // *Svoystva drevesiny, yeyo zashchita i novye drevesnye materialy*. Moscow : Nauka, 1966. S. 3–10.
7. Isaeva L. N. Vlazhnost' drevesiny rastushchikh derevyev v razlichnykh rayonakh proizrastaniya // *Drevesina i drevesnye materialy*. Krasnoyarsk : ILiD SO RAN, 1974. S. 18–28.
8. Isaeva L. N. Metod rascheta lokal'noy i sredney plotnosti absolutno sukhoy drevesiny v stvolakh sosny i listvennitsy // *Lesovedeniye*. 1978. № 4. S. 90–94.
9. Kryudener A. A. Massovyye tablitsy i tablitsy sbega osiny Yevropeyskoy Rossii. Iss. 4. St. Petersburg: Tipografiya Sanktpeterburgskogo upravleniya udelov, 1911. 86 s.
10. Nakhabtsev I. A. Takatsiya drevesnoy kory. Metodicheskiye ukazaniya i tablitsy protsentov kory k samostoyatel'noy rabote studentov. Leningrad : LLTU, 1990. 36 s.
11. Plyukha N. I., Usol'tsev V. A., Chasovskikh V. P. Otsenka srednevezhennykh kvalimetricheskikh pokazateley stvola po ikh znacheniyam na vysote grudi v yestestvennykh sosnyakakh i kulturakh // *Khvoynyye*

boreal'noy zony (Conifers of the boreal zone). 2025. Vol. 43. № 6. S. 47–57.

12. Poluboyarinov O. I. Plotnost' drevesiny. Moscow : Lesnaya promyshlennost', 1976. 160 s.

13. Pchelintsev V. I. Takatsiya kory listvennitsy // Lystvennitsa i yeye kompleksnaya pererabotka. Krasnoyarsk : SibTI, 1987. S. 9–14.

14. Usol'tsev V. A. Rost i struktura fitomassy drevostoyev. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1988. 253 s.

15. Usol'tsev V. A., Perederiy O. N., Prokhorov Yu. A. Kvalimetriya vetvey v sosnyakakh Aman-Karagaiskogo bora // Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana. 1985. № 7. S. 74–78.

16. Usol'tsev V. A., Vorobeychik E. L., Bergman I. E. Biologicheskaya produktivnost' lesov Urala v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya: Issledovaniye sistemy svyazey i zakonemernostey. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, 2012. 365 s.

17. Usol'tsev V. A., Kolchin K. V., Voronov M. P. Fiktivnye peremennye i smeshcheniya vseobshchikh allometricheskikh modeley pri lokal'noy ocenke fitomassy dereviev (na primere *Picea* L.) // Eko-Potencial. 2017. № 1 (17). S. 22–39. URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>.

18. Usol'tsev V. A., Cepordey I. S. Geograficheskiye zakonemernosti izmeneniya bazisnoy plotnosti drevesiny i kory lesoobrazuyushchikh porod Yevrazii // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2022. № 3. S. 59–68.

19. Uspenskiy V. V. Izmenchivost' plotnosti drevesiny sosny i yeye ispol'zovaniye v vesovoy taksatsii // Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal. 1980. № 6. S. 9–12.

20. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53.

21. Bouchard E., Searle E., Drapeau P. et al. Global patterns and environmental drivers of forest functional composition // Global Ecology and Biogeography. 2024. Vol. 33. P. 303–324.

22. Ceornea C., Drăgoi M. A new metrics to manage the deadwood in forest stewardship council certified forests // Forestist. 2025. Vol. 75. Article 0040.

23. Chave J., Coomes D., Jansen S. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum // Ecology Letters. 2009. Vol. 12. P. 351–366.

24. Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R. et al. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species // Ecological Applications. 2006. Vol. 16. № 6. P. 2356–2367.

25. Chowdhury M. Q., Sarker S. K., Ali M. B. et al. Accounting intra-tree radial wood density variation estimates more accurate above ground mangrove biomass in the Sundarbans // European Journal of Forest Research. 2025. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01784-3>

26. Fedyukov V. I., Musikhina L. A., Chernova M. S. et al. A non-destructive prediction method for the wood density variations of silver birch trees growing in the Middle Volga region, Russia // South-East European Forestry. 2020. Vol. 11(1). P. 85–90.

27. Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z. et al. Using linear mixed model and dummy variable model

approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // Journal of Forest Science. 2012. Vol. 58. No. 3. P. 101–115.

28. Giagli K., Vavrcík H., Fajstavr M. et al. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // Wood Research. 2019. Vol. 64. P. 1011–1022.

29. Glass S. V., Zelinka S. L. Moisture relations and physical properties of wood // Wood handbook: wood as an engineering material. Chapter 4. Centennial Edition. General technical report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. P. 4.1–4.19.

30. Kraft N. J. B., Metz M. R., Condit R. S. et al. The relationship between wood density and mortality in a global tropical forest data set // New Phytologist. 2010. Vol. 188. P. 1124–1136.

31. Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J. et al. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder // Forests. 2023. Vol. 14. Article 135.

32. Mo L., Crowther T. W., Maynard D. S. et al. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks // Nature Ecology and Evolution. 2024. Vol. 8(12). P. 2195–2212.

33. Pérez-Ramos I. M., Matías L., Gómez-Aparicio L. et al. Functional traits and phenotypic plasticity modulate species coexistence across contrasting climatic conditions // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Article 2555.

34. Petráš R., Mecko J., Krupova D. et al. Aboveground biomass basic density of softwoods tree species // Wood Research. 2019. Vol. 64(2). P. 205–212.

35. Petráš R., Mecko J., Krupova D. et al. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species // Wood Research. 2020. Vol. 65(6). P. 1001–1012.

36. Poorter L., Rozendaal D. M. A., Bongers F. et al. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // Nature Ecology and Evolution. 2019. Vol. 3. P. 928–934.

37. Portal-Cahuana L. A., Piña E. A. G., Tuesta G. P. et al. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru // CERNE. 2023. Vol. 29. Article e-103143.

38. Que Q., Ouyang K., Li C. et al. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China // Forestry Research. 2022. Vol. 2. Article 12.

39. Reich P. B., Wright I. J., Cavender-Bares J. et al. The evolution of plant functional variation: traits, spectra and strategies // International Journal of Plant Sciences. 2003. Vol. 164. P. S143–S164.

40. Reis S. M., Marimon B. S., Muelbert A. E. et al. Climate and crown damage drive tree mortality in southern Amazonian edge forests // Journal of Ecology. 2022. Vol. 110. P. 876–888.

41. Saatchi S. S., Harris N. L., Brown S. et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2011. Vol. 108. P. 9899–9904.

42. Swenson N. G., Enquist B. J. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community – wide variation across latitude and elevation // American Journal of Botany. 2007. Vol. 94. No. 3. P. 451–459.

43. Thurner M., Beer C., Santoro M. et al. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests // Global Ecology and Biogeography. 2014. Vol. 23. P. 297–310.

44. Tonouewa M., Biaou S. S. H., Assede E. et al. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis* // Maderas Ciencia y tecnología. 2022. Vol. 24. P. 1–14.

45. Vieilledent G., Fischer F. J., Chave J. et al. New formula and conversion factor to compute basic wood

density of tree species using a global wood technology database // American Journal of Botany. 2018. Vol. 105(10). P. 1–9.

46. Westoby M., Wright I. J. Land-plant ecology on the basis of functional traits // Trends in Ecology and Evolution. 2006. Vol. 21. P. 261–268.

47. Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z. et al. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe // EGU sphere. 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2691>

© Плюха Н. И., Усольцев В. А.,
Часовских В. П., 2026

Поступила в редакцию 27.05.2025
Принята к печати 20.02.2026