

ОЦЕНКА СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫХ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТВОЛА ПО ИХ ЗНАЧЕНИЯМ НА ВЫСОТЕ ГРУДИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКАХ И КУЛЬТУРАХ*

Н. И. Плюха^{1,2}, В. А. Усольцев^{1,3}, В. П. Часовских³

¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

²Ботанический сад Уральского отделения РАН

Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а

³Уральский государственный экономический университет
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45

^{1,2}nikcskript@mail.ru, <http://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. Площади естественных лесов на планете постепенно сокращаются и часто заменяются искусственными насаждениями, площади которых продолжают расти. Необходимо знать, как эта замена может повлиять на изменение структуры квалитетических и количественных показателей биомассы лесов под влиянием климатических сдвигов и, соответственно, на их способность накапливать углерод и на устойчивость к изменению климата. Определение квалитетических показателей стволов довольно трудоемко в связи с необходимостью взятия нескольких дисков по высоте ствола, их обмера, сушки и двойного взвешивания, причем, исследования обычно посвящены древесине, но не коре ствола. Вследствие трудоемкости определения квалитетических показателей стволов деревьев, предлагаются методы их оценки по связи с соответствующим значением на высоте груди ствола. Насколько нам известно, результаты многофакторного анализа связи квалитетических показателей всего ствола с локальными его значениями на высоте груди и морфометрией деревьев в литературе отсутствуют. Наши 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 разработаны прогностические модели средневзвешенных квалитетических показателей ($Q_{ср}$) (содержания сухого вещества и плотности древесины и коры) в зависимости от соответствующих показателей ствола на высоте груди ($Q_{1,3}$) и высоты дерева с учетом происхождения древостоя. Названные независимые переменные объясняют от 68 до 92 % варьирования $Q_{ср}$, а вклады $Q_{1,3}$, высоты дерева и происхождения древостоя в объяснение варьирования $Q_{ср}$ составляют соответственно 62, 25 и 13 %. Большая часть показателей $Q_{ср}$ в культурах на статистически значимом уровне меньше, чем в естественных сосняках. Предложенные модели дают возможность определять квалитетические показатели стволов у сосны Тургайского прогиба без рубки модельных деревьев.

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

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 6, P. 47–57

ESTIMATING THE AVERAGE-WEIGHTED QUALIMETRIC FEATURES OF THE STEM BY THEIR VALUES AT BREAST HEIGHT IN NATURAL AND ARTIFICIAL *PINUS SYLVESTRIS***

N. I. Plyukha^{1,2}, V. A. Usoltsev^{1,3}, V. P. Chasovskikh³

¹Ural State Forest Engineering University

37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

202a, 8 Marta str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

³Ural State University of Economics

62/45, 8 Marta str./ Narodnaya Volya, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

* 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, <http://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>

Abstract. *The areas of natural forests on the planet are gradually decreasing and are often replaced by plantations, the areas of which continue to grow. It is necessary to know how this replacement can affect the change in the structure of qualimetric and quantitative indicators of forest biomass under the influence of climatic shifts and, consequently, their ability to accumulate carbon and their resilience to climate change. Determining the qualimetric parameters of stems is quite laborious due to the need to take several discs along the height of the stem, measure, dry and double weigh them, and research is usually devoted to wood, but not to the bark of the stem. Due to the complexity of determining the qualimetric parameters of tree stems, methods are proposed for evaluating them in relation to the corresponding value at the height of breast height. As far as we know, there are no results of a multifactorial analysis of the relationship between the qualimetric parameters of the entire stem and its local values at breast height and tree morphometry in the literature. The research was conducted 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 in plantations and 14 in natural pine forests, on which 300 sample trees were taken, including 190 in plantations and 110 in natural stands. As a result, predictive models of weighted average qualimetric indicators (Q_{av}) (dry matter content and density of wood and bark) were developed depending on the corresponding stem parameters at breast height ($Q_{1,3}$) and tree height, taking into account the origin of the stand. These independent variables explain from 68 to 92 % of the Q_{av} variation, and the contributions of $Q_{1,3}$, tree height, and stand origin to explain the Q_{av} variation are 62, 25, and 13 %, respectively. Most of the Q_{av} indicators in plantations are statistically significantly lower than in natural stands. The proposed models make it possible to determine the qualimetric parameters of the pine stems in the Turgai Depression without cutting model trees.*

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

ВВЕДЕНИЕ

Нынешнее изменение климата делает все более важной оценку реакции биомассы лесного покрова на это изменение, что, в свою очередь, определяет возможность стабилизации климата за счет сокращения выбросов CO_2 в атмосферу. Площади естественных лесов на планете постепенно сокращаются и часто заменяются искусственными насаждениями, площади которых продолжают расти на 6–13 млн га в год [28; 39; 44; 48; 49]. Необходимо знать, как эта замена может повлиять на изменение структуры биомассы лесов под влиянием климатических сдвигов и, соответственно, на их способность накапливать углерод и на устойчивость к изменению климата [29; 49; 54]. Необходимо также знать все преимущества и недостатки как естественных насаждений, так и культур с точки зрения биологической продуктивности и их способности смягчать последствия изменения климата.

В настоящее время различия естественных насаждений и культур на уровне древостоев установлены по показателям биологической продуктивности в сухой степи Тургайского прогиба в связи с их возрастом [20; 56], а также в возрастном, эдафическом и густотном градиентах [25]. На уровне деревьев выявлены статистически значимые различия структуры биомассы двухвойных сосен естественного и искусственного происхождения и предложены модели и таблицы для ее оценки по регионам России [18]. Их различие показано также по показателям роста и формирования запасов стволовой древесины [1; 5; 53], радиальному приросту стволов деревьев [19], устойчивости к засухам и другим внешним факторам [2; 47; 52; 55], изменению биомассы фракций в связи с прогнозируемым повышением глобальных температур [57; 58], изме-

нению биомассы стволов деревьев при климатических сдвигах [21], биомассе отмерших ветвей на растущих деревьях [22; 23], влиянию индекса конкуренции на оценку биомассы деревьев [17], фитонасыщенности крон деревьев [16], содержанию сухого вещества в фракциях биомассы деревьев [16] и плотности древесины ствола [8], в том числе коры [16].

Определение квалитетических показателей стволов довольно трудоемко в связи с необходимостью взятия нескольких дисков по высоте ствола, их обмера, сушки и двойного взвешивания, причем, исследования обычно посвящены древесине, но не коре ствола. Кора ствола отличается от древесины по своей анатомической структуре, свойствам и химическому составу [42], и ее доля в общей массе ствола в зависимости от видовой принадлежности может варьировать от 5 до 20 % [26; 50], а в массе ветвей ели и сосны – от 18 до 99 % [11; 32]. Кора стволов и ветвей сильно дифференцирована и состоит из меристем, проводящей и непроводящей флоэмы и корки [41], а ее структура претерпевает постоянные изменения из-за отмирания одних тканей и роста других [37; 38].

Вследствие упомянутой трудоемкости определения квалитетических показателей стволов деревьев, предлагаются косвенные методы их оценки, в частности, по связи с соответствующим значением образца, взятого на легко доступной высоте растущего дерева [33; 35]. Так, установлено, что плотность древесины всего ствола у сосны и ели близка к значению локальной плотности на 1/4 высоты ствола [12]. В практическом отношении предпочтителен замер квалитетического показателя не на 1/4 высоты ствола, а на высоте груди, и Л. Н. Исаевой [6] были предложены коэффициенты, представляющие отношение плотности

древесины на высоте груди к плотности, вычисленной как среднеарифметическое значение определений по всем дискам. Названные коэффициенты составили для сосны 0,94 и для лиственницы 0,95. Вследствие известного изменения квалитетических показателей вдоль по стволу [10; 12; 13; 45; 51] и сбежистой формы последнего [24; 30], при определении среднеарифметического значения искомой величины неизбежны смещения по причине не учитываемого разного вклада секций ствола в общую оценку.

Вычислив средневзвешенный показатель базисной плотности древесины в ельнике-кисличнике Ленинградской области, О. И. Полубояринов [12] установил ее линейную связь с плотностью на высоте груди, характеризуемую коэффициентом детерминации 0,878. Аналогичная связь названных показателей плотности у австралийского дуба (*Grevillea robusta* A. Cunn. ex R.Br.) показала наличие коэффициента детерминации 0,810 [35].

Поскольку квалитетрия ствола изменяется в связи с возрастом и высотой дерева, его ценолитическим положением в пологе, эдафическими и климатическими условиями и т. д. [13; 15; 16; 34; 36; 40; 43; 45; 46], названные факторы необходимо учитывать в качестве дополнительных независимых переменных при оценке средневзвешенных квалитетических показателей по измеренным значениям на высоте груди.

Насколько нам известно, подобные результаты многофакторного анализа связи квалитетических показателей всего ствола с локальными его значениями на высоте груди и морфометрией деревьев в литературе отсутствуют.

Цели настоящего исследования:

- по фактическим данным авторов, полученным в естественных сосняках и культурах Тургайского прогиба, выявить характер зависимости средневзвешенных квалитетических показателей (содержания сухого вещества и плотности древесины и коры) от соответствующих показателей ствола на высоте груди;
- установить наличие или отсутствие статистически значимого вклада происхождения древостоев (естественное или искусственное) в объяснительную способность моделей;
- разработать многофакторные модели для оценки квалитетических показателей всего ствола по их значениям на высоте груди и размерным характеристикам дерева.

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. У каждого дерева по относительным высотам ствола в каждом из 10 сечений, а также на высоте 1,3 м, взяты диски, путем обмера, двукратного взвешивания и сушки которых рассчитаны значения содержания сухого вещества, базисной плотности и плотности

в свежем состоянии древесины и коры. Базисная плотность рассчитана как отношение массы в абсолютно сухом состоянии (кг) к объему в свежем состоянии (м^3), а плотность в свежем состоянии как отношение массы в свежем состоянии к соответствующему объему. По рассчитанным локальным квалитетическим показателям определены их средневзвешенные значения для всего ствола [12; 15]. Необходимо иметь в виду, что при подобном обмере дисков в коре плотность коры нижней части ствола, покрытой коркой, занижается, поскольку в объем коры включается и объем пустот в ее трещинах. Корректный объем корки можно было бы получить путем копирования ее контура в сечении диска с использованием планиметра, как это было выполнено на срезах стволов можжевельника (*Juniperus occidentalis* Hook.) [31]. Поскольку цель исследования состоит в использовании квалитетрии ствола на высоте груди растущих деревьев сосны, измерить у растущего дерева объем полостей трещин в коре довольно затруднительно. Для определения величины занижения плотности корки в нижней части ствола, а также для снятия проблем с измерениями плотности древесины [59], необходимы специальные исследования.

Краткая характеристика исходных данных приведена в табл. 1.

Выбор структуры модели выполнен с учетом следующих положений: связь некоторых квалитетических показателей на высоте груди и средневзвешенных описывается линейной функцией [12; 35], а связь средневзвешенных квалитетических показателей с возрастом дерева [9], с диаметром ствола [12; 45] и высотой дерева [34] – нелинейной функцией. С целью линеаризации многофакторной модели применено двойное («лог-лог») логарифмирование переменных, в том числе – связи квалитетических показателей на высоте груди и средневзвешенных, поскольку линейная функция равнозначна степенной (аллометрической) при показателе степени, равном 1, т. е. при изометрии [14]. Принадлежность исходных данных к естественным соснякам и культурам закодирована фиктивной (бинарной) переменной [3; 4]: $X = 0$ – для естественных сосняков и $X = 1$ – для культур.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования с целью выявления характера и уровня значимости связи средних квалитетических показателей с показателями на высоте груди рассчитаны модели

$$\ln Q_{\text{cp}} = a_0 + a_1 \ln Q_{1,3} \quad (1)$$

и для установления статистически значимых вкладов квалитетического показателя на высоте груди и происхождения древостоев в объяснение изменчивости средних квалитетических показателей рассчитаны модели

$$\ln Q_{\text{cp}} = a_0 + a_1 \ln Q_{1,3} + a_2 X, \quad (2)$$

где Q_{cp} – средневзвешенный квалитетический показатель; $Q_{1,3}$ – квалитетический показатель ствола на высоте груди (см. табл. 1); X – бинарная переменная.

Характеристика полученных моделей для каждой зависимой переменной приведена в табл. 2, а их графическая интерпретация на фоне фактических данных – на рис. 1. Все регрессионные коэффициенты, за исключением одного, значимы на уровне вероятности $P < 0,001$. Наибольшим остаточным варьированием

характеризуются модели для коры – Sb_{cp} и $pw_{b_{cp}}$ – вследствие как ее сложной и непрерывно меняющейся анатомической структуры [37; 38], неучтенного варьирования подъема корки вверх по стволу, так и недостаточной точности ее измерений, что уже отмечалось исследователями ранее [13].

Таблица 1
Диапазоны фактических данных о морфологии и квалитетрии деревьев

№	Показатель	Диапазон		Диапазон	
		от	до	от	до
		Естественные сосняки		Культуры	
1	A , лет	13	110	9	50
2	H , м	1,4	26,1	1,6	16,2
3	D , см	0,3	34,5	0,4	21,7
4	$Ss_{1,3}$, %	36,8	65,2	30,7	68,3
5	Ss_{cp} , %	38,7	63,5	32,3	63,9
6	$Sb_{1,3}$, %	38,0	77,3	35,0	76,1
7	Sb_{cp} , %	36,9	67,5	37,3	64,5
8	$\rho s_{1,3}$, кг/м ³	341,0	577,7	289,2	492,4
9	ρs_{cp} , кг/м ³	336,2	571,5	305,1	460,8
10	$\rho b_{1,3}$, кг/м ³	190,9	567,4	158,6	495,5
11	ρb_{cp} , кг/м ³	220,9	533,2	225,1	406,0
12	$\rho ws_{1,3}$, кг/м ³	611,3	1000	584,6	989,0
13	ρws_{cp} , кг/м ³	606,6	1012	620,1	982,2
14	$\rho wb_{1,3}$, кг/м ³	327,2	979,2	259,1	975,8
15	ρwb_{cp} , кг/м ³	506,6	888,0	497,8	858,2

Примечания. A – возраст дерева, лет; H – высота дерева, м; D – диаметр ствола на высоте груди, см; $Ss_{1,3}$ и Ss_{cp} – соответственно содержание сухого вещества в древесине на высоте груди и средневзвешенное, %; $Sb_{1,3}$ и Sb_{cp} – соответственно содержание сухого вещества в коре на высоте груди и средневзвешенное, %; $\rho s_{1,3}$ и ρs_{cp} – соответственно базисная плотность древесины на высоте груди и средневзвешенная, кг/м³; $\rho b_{1,3}$ и ρb_{cp} – соответственно базисная плотность коры на высоте груди и средневзвешенная, кг/м³; $\rho ws_{1,3}$ и ρws_{cp} – соответственно плотность древесины в свежем состоянии на высоте груди и средневзвешенная, кг/м³; $\rho wb_{1,3}$ и ρwb_{cp} – соответственно плотность коры в свежем состоянии на высоте груди и средневзвешенная, кг/м³.

Таблица 2
Характеристика моделей (1) и (2) с включенной бинарной переменной (X)

$\ln Q_{cp}$	Модель (1)				Модель (2)				
	a_0	$a_1 \ln Q_{1,3}$	$\text{adj}R^2$	SE	a_0	$a_1 \ln Q_{1,3}$	$a_2 X$	$\text{adj}R^2$	SE
$\ln(Ss_{cp})$	0,5182	$0,8565 \ln(Ss_{1,3})$	0,843	0,055	0,6662	$0,8217 \ln(Ss_{1,3})$	$-0,0252 X$	0,849	0,053
$\ln(Sb_{cp})$	2,4169	$0,3720 \ln(Sb_{1,3})$	0,384	0,092	2,4983	$0,3558 \ln(Sb_{1,3})$	$-0,0273 X$	0,394	0,091
$\ln(\rho s_{cp})$	1,0891	$0,8135 \ln(\rho s_{1,3})$	0,779	0,051	1,2716	$0,7842 \ln(\rho s_{1,3})$	$-0,0119 X$	0,781	0,051
$\ln(\rho b_{cp})$	2,5055	$0,5673 \ln(\rho b_{1,3})$	0,721	0,082	2,6237	$0,5526 \ln(\rho b_{1,3})$	$-0,0593 X$	0,755	0,077
$\ln(\rho ws_{cp})$	1,2384	$0,8182 \ln(\rho ws_{1,3})$	0,877	0,031	1,1829	$0,8252 \ln(\rho ws_{1,3})$	$0,0142 X$	0,883	0,030
$\ln(\rho wb_{cp})$	4,8696	$0,2561 \ln(\rho wb_{1,3})$	0,502	0,090	4,8767	$0,2592 \ln(\rho wb_{1,3})$	$-0,0449 X$	0,531	0,087

Примечания. Свободный член моделей скорректирован на логарифмическую трансформацию [27]; $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели. Звездочкой отмечен коэффициент регрессии, значимый на уровне вероятности $P < 0,10$.

Таблица 3
Характеристика моделей (3)

$\ln Q_{cp}$	a_0	$a_1 \ln Q_{1,3}$	$a_2 \ln H$	$a_3 (\ln Q_{1,3})(\ln H)$	$a_4 X$	$\text{adj}R^2$	SE
$\ln(Ss_{cp})$	1,4557	$0,6398 \ln(Ss_{1,3})$	$-0,6309 \ln H$	$0,1509 (\ln(Ss_{1,3})(\ln H))$	$-0,0245 X$	0,920	0,039
$\ln(Sb_{cp})$	0,0662	$1,0428 \ln(Sb_{1,3})$	$0,4614 \ln H$	$-0,1585 (\ln(Sb_{1,3})(\ln H))$	$-0,0160 X$	0,781	0,055
$\ln(\rho s_{cp})$	0,6359	$0,9098 \ln(\rho s_{1,3})$	$0,3362 \ln H$	$-0,0662 (\ln(\rho s_{1,3})(\ln H))$	$-0,0186 X$	0,882	0,038
$\ln(\rho b_{cp})$	1,1425	$0,7965 \ln(\rho b_{1,3})$	$0,5452 \ln H$	$-0,0885 (\ln(\rho b_{1,3})(\ln H))$	$-0,0409 X$	0,773	0,074
$\ln(\rho ws_{cp})$	3,0022	$0,5620 \ln(\rho ws_{1,3})$	$-0,8424 \ln H$	$0,1216 (\ln(\rho ws_{1,3})(\ln H))$	$0,0126 X$	0,902	0,027
$\ln(\rho wb_{cp})$	1,7082	$0,7181 \ln(\rho wb_{1,3})$	$1,0208 \ln H$	$-0,1410 (\ln(\rho wb_{1,3})(\ln H))$	$-0,0187 X$	0,677	0,072

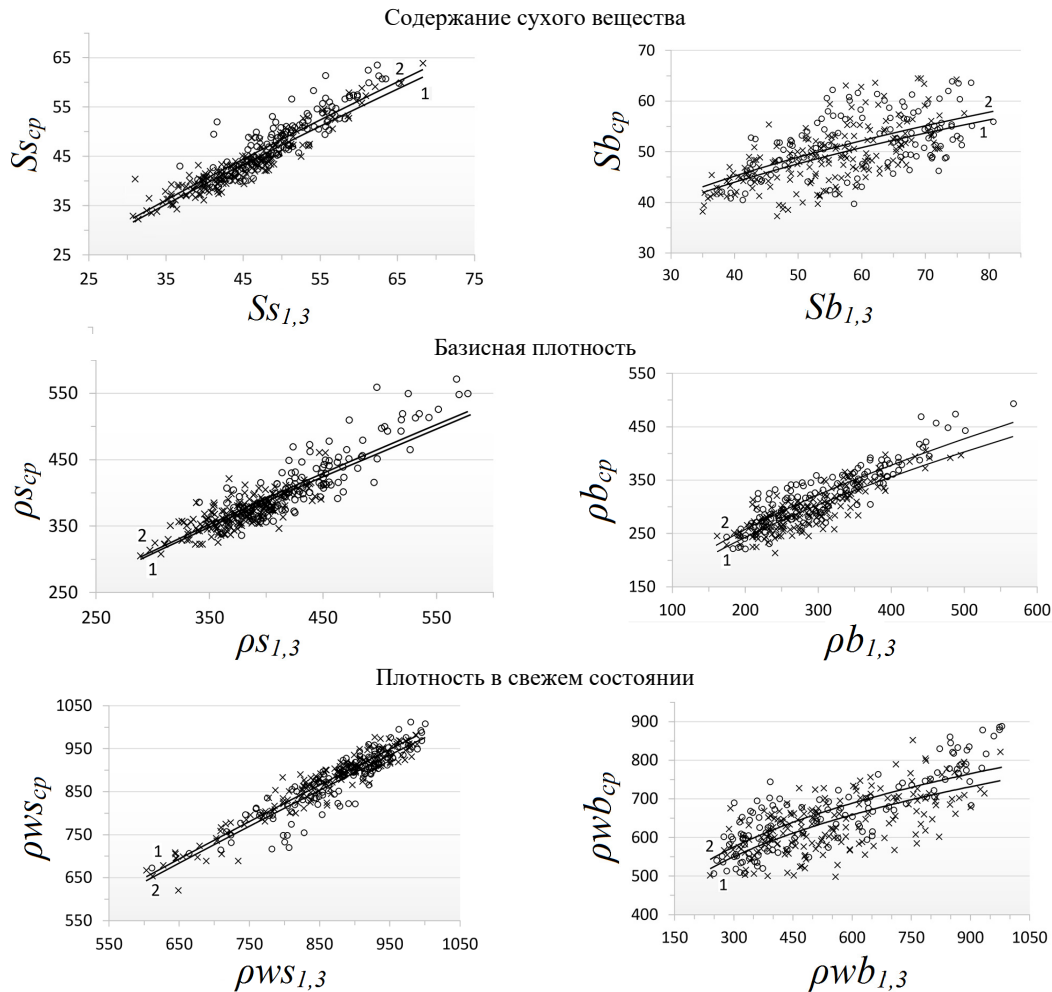


Рис. 1. Графическая интерпретация моделей (2) на фоне фактических данных:
1 – культуры; 2 – естественные сосняки

На втором этапе исследования было необходимо разработать многофакторные модели для оценки квалиметрических показателей всего ствола по их значениям на высоте груди и размерным характеристикам дерева, в частности, возраста, высоты дерева и диаметра ствола на высоте груди. Результаты предварительных расчетов моделей показали, что диаметр ствола практически во всех случаях оказался статистически не значим. Поскольку высота и возраст деревьев тесно коррелированы, для сопоставления их вклада в объяснение изменчивости Q_{cp} они включены в качестве независимых переменных в отдельные модели, соответственно (3) и (4):

$$\ln Q_{cp} = a_0 + a_1 \ln Q_{1,3} + a_2 \ln H + a_3 (\ln Q_{1,3})(\ln H) + a_4 X, \quad (3)$$

$$\ln Q_{cp} = a_0 + a_1 \ln Q_{1,3} + a_2 \ln A + a_3 (\ln Q_{1,3})(\ln A) + a_4 X, \quad (4)$$

Комбинированные переменные $(\ln Q_{1,3})(\ln H)$ и $(\ln Q_{1,3})(\ln A)$ введены в модели для учета совместного действия переменных $(\ln Q_{1,3})$ и $(\ln H)$, а также $(\ln Q_{1,3})$ и $(\ln A)$, поскольку квалиметрические показатели изменяются вдоль по стволу [10; 12; 13; 45; 51], а положение диска, выпиленного на высоте груди, смещается к вершине по мере снижения высоты (возраста) дерева. В результате расчета моделей (3) и (4) оказалось, что модель (3) по степени адекватности исход-

ным данным более предпочтительна по отношению к модели (4), причем, возраст в модели (4) оказался во многих случаях статистически не значим. Одной из возможных причин может быть различие естественных сосняков и культур по возрастным диапазонам: у культур он примерно вдвое меньше (табл. 1).

Результаты расчета модели (3) показаны в табл. 3. Все регрессионные коэффициенты моделей (3) статистически значимы, в том числе, оказалось статистически значимым влияние на оценку квалиметрических показателей происхождения древостоев, что подтверждается величиной критерия Стьюдента для регрессионных коэффициентов a_4 при бинарной переменной X . В моделях для $\ln(Ss_{cp})$, $\ln(Sb_{cp})$, $\ln(ps_{cp})$, $\ln(pb_{cp})$, $\ln(pws_{cp})$ и $\ln(pwb_{cp})$ он составил соответственно 5,0; 2,4; 3,5; 4,4; 3,9 и 2,1, что выше стандартного значения критерия Стьюдента 1,96 на уровне вероятности $P < 0,05$.

Графическая интерпретация моделей (3) для шести квалиметрических показателей наглядно показывает характер совместного действия переменных $\ln Q_{1,3}$ и $\ln H$, опосредованного комбинированной переменной $(\ln Q_{1,3})(\ln H)$, а именно, показывает, как изменяется угол наклона зависимости $\ln Q_{cp}$ от $Q_{1,3}$ при изменении высоты дерева (рис. 2).

Соотношение фактических и расчетных значений квалиметрических показателей по моделям (3) свиде-

тельствует о наличии равномерных остаточных дисперсий и об отсутствии корреляции остатков (рис. 3).

Анализ вкладов независимых переменных моделей (3), приведенных в табл. 3, по методике, предложен-

ной И. Я. Лиепой [7], показывает (табл. 4), что вклады $\ln Q_{1,3}$, $\ln H$ и X в объяснение изменчивости квалиметрических показателей составляют в среднем соответственно 62, 25 и 13 %.

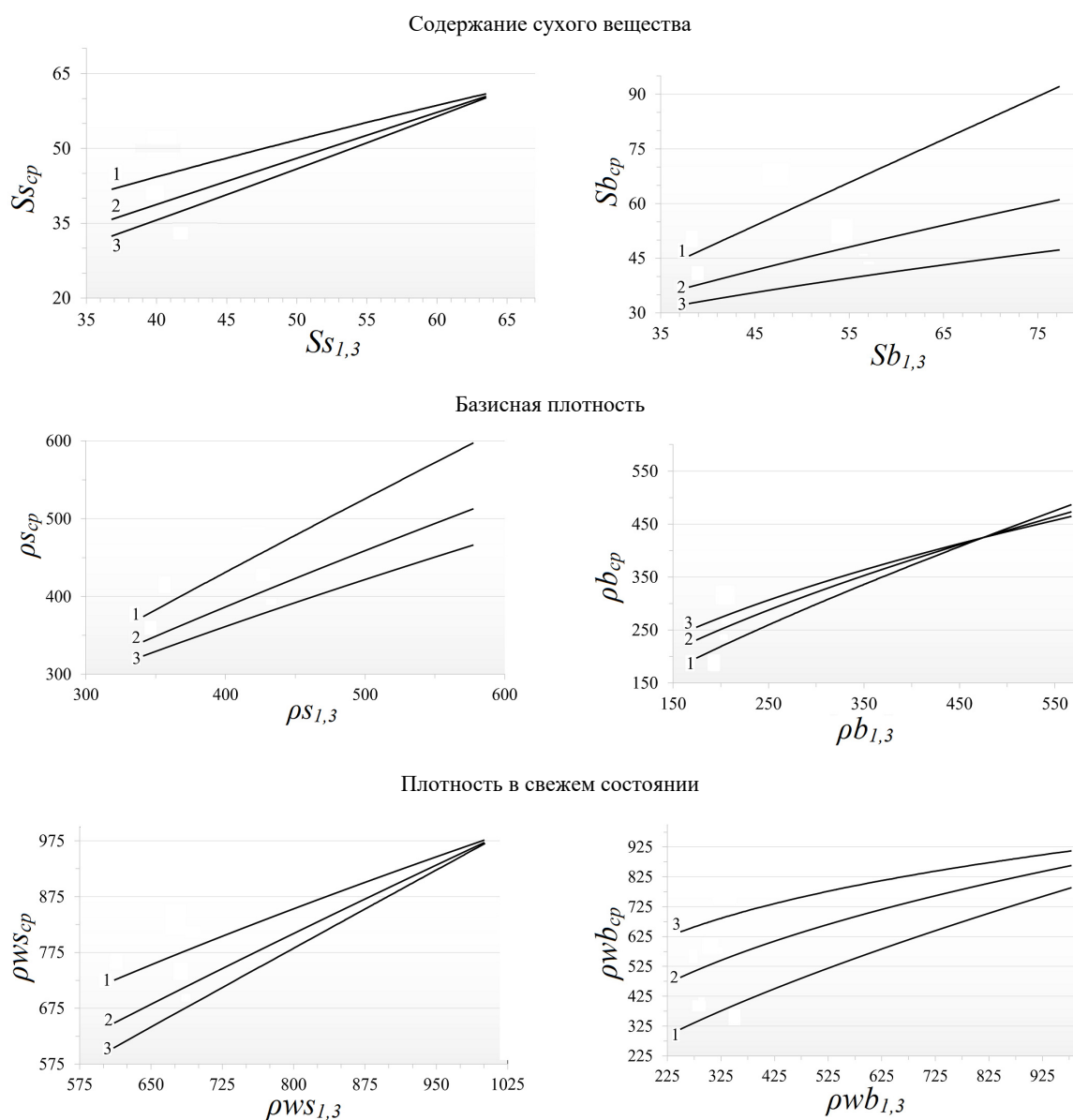


Рис. 2. Графическая интерпретация моделей (3) при разных значениях высоты дерева:

2, 10 и 26 м, обозначенных цифрами соответственно 1, 2 и 3

Таблица 4

Вклады независимых переменных моделей (3) в объяснение изменчивости зависимых переменных

$\ln Q_{cp}$	Независимые переменные		
	$\ln Q_{1,3r}$	$\ln H$	X
$\ln(Ss_{cp})$	55	31	14
$\ln(Sb_{cp})$	71	22	7
$\ln(\rho s_{cp})$	75	12	13
$\ln(\rho b_{cp})$	60	19	20
$\ln(\rho ws_{cp})$	54	29	17
$\ln(\rho wb_{cp})$	58	34	8
В среднем	62±3,6	25±3,4	13±2,1

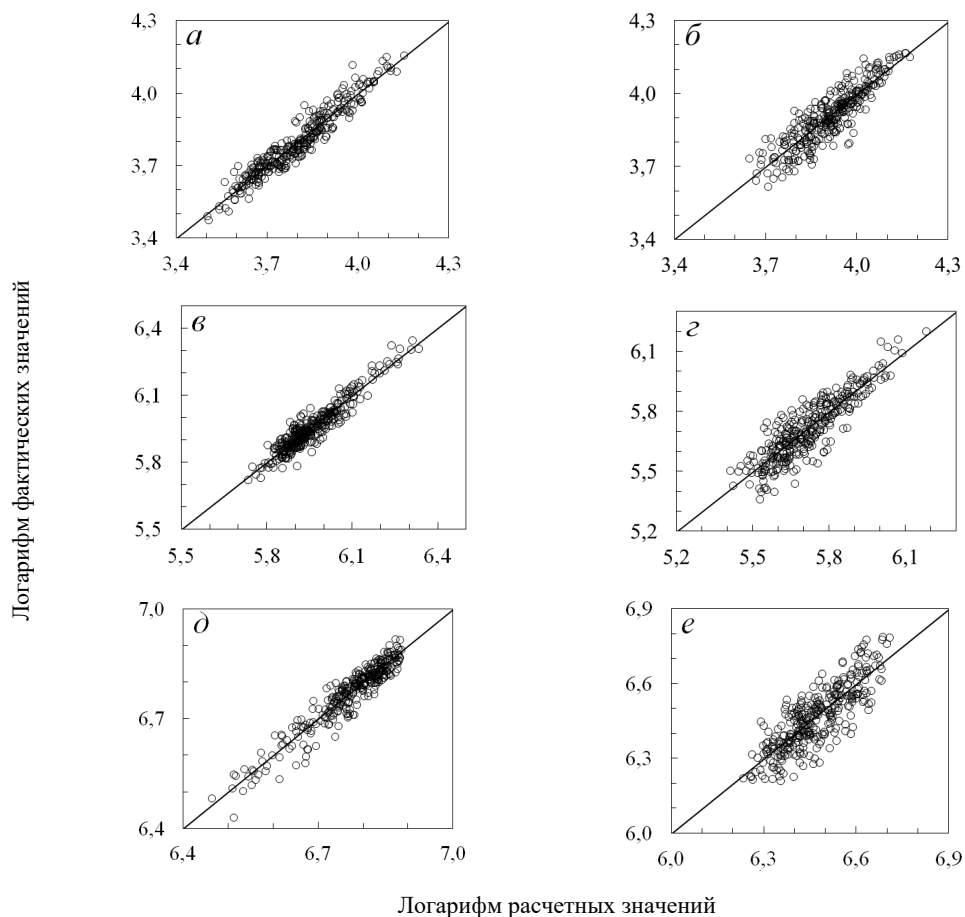


Рис. 3. Соотношение фактических и расчетных значений квалиметрических показателей по моделям (3): а, б, в, г, д и е – соответственно Ss_{cp} , Sb_{cp} , ρs_{cp} , ρb_{cp} , ρws_{cp} и ρwb_{cp}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по фактическим данным авторов, полученным в естественных сосняках и культурах Тургайского прогиба, разработаны прогностические модели средневзвешенных квалиметрических показателей (Q_{cp}) (содержания сухого вещества и плотности древесины и коры) в зависимости от соответствующих показателей ствола на высоте груди ($Q_{1,3}$).

На первом этапе исследования выполнен расчет аллометрических моделей связи Q_{cp} и $Q_{1,3}$ без включения и с включением в модель бинарной независимой переменной, кодирующей принадлежность данных к естественным соснякам и культурам. Регрессионные коэффициенты при переменной $Q_{1,3}$ и бинарной переменной значимы на уровне вероятности $P < 0,001$ за исключением одного. Наибольшим остаточным варьированием характеризуются модели для коры – вследствие как неучтенного варьирования подъема корки вверх по стволу, так и недостаточной точности измерений ее трещиноватой структуры. Установлено, что Q_{cp} пяти квалиметрических показателей в естественных сосняках больше, чем в культурах, а плотность древесины в свежем состоянии, напротив, в естественных сосняках меньше.

На втором этапе исследования выполнен расчет многофакторных моделей для оценки Q_{cp} по значениям $Q_{1,3}$ и размерным характеристикам дерева с учетом происхождения древостоя. Установлено, что из трех размерных характеристик дерева значимый вклад

в объяснение варьирования Q_{cp} вносит лишь высота дерева. Названные независимые переменные объясняют от 68 до 92 % варьирования Q_{cp} , а вклады $Q_{1,3}$, высоты дерева и происхождения древостоя в объяснение варьирования Q_{cp} составляют соответственно 62, 25 и 13 %.

Предложенные модели дают возможность определять квалиметрические показатели стволов у сосны Тургайского прогиба без рубки модельных деревьев. Подобными исследованиями необходимо охватить основные лесообразующие породы. Необходимо также специальное исследование по определению величины смещений оценок плотности корки в нижней части ствола, вызванных ее трещиноватостью и варьированием протяженности по стволу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабич Н. А., Евдокимов И. В., Неволин Н. Н. Культуры сосны Вологодской области. Вологда : ВГМХА, 2008. 136 с.
2. Бирюкова З. П., Верзунов А. И., Мехедова Л. Г. и др. Водный режим и устойчивость насаждений сосны в Северном Казахстане // Лесоведение. 1989. № 1. С. 9–18.
3. Бубырь Д. С., Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 6 (2). С. 371–373.

4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М. : Статистика, 1973. 392 с.
5. Залесов С. В., Лобанов А. Н., Луганский Н. А. Рост и производительность сосняков искусственного и естественного происхождения. Екатеринбург : УГЛТУ, 2002. 112 с.
6. Исаева Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90–94.
7. Либа И. Я. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига : Зинатне, 1980. 171 с.
8. Мелехов В. И., Бабич Н. А., Корчагов С. А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск : Изд-во АГТУ, 2003. 110 с.
9. Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. М. : Наука, 1964. 255 с.
10. Плюха Н. И., Усольцев В. А., Ангальт Е. М. Видовые особенности изменения базисной плотности древесины и коры вдоль по стволу дерева // Хвойные бореальной зоны. 2024а. Т. 42, № 4. С. 11–16.
11. Плюха Н. И., Усольцев В. А., Цепордей И. С. Моделирование доли коры в фитомассе ветвей сосны обыкновенной в степной зоне // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024б. № 1 (61). С. 44–54.
12. Полубояринов О. И. Плотность древесины. М. : Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
13. Смоляк Л. П., Петров Е. Г., Русаленко А. И. Объемный вес древесины и коры сосны в различных экологических условиях // Лесное хозяйство. 1978. № 4. С. 70–71.
14. Усольцев В. А. Формирование ствола у березы семенного и порослевого происхождения в аспекте аллометрического роста // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1976. № 7. С. 83–88.
15. Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1988. 253 с. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352> (дата обращения: 07.05.2025).
16. Усольцев В. А. Вертикально-фракционная структура фитомассы деревьев. Исследование закономерностей. Екатеринбург : УГЛТУ, 2013б. 603 с. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771> (дата обращения: 07.05.2025).
17. Усольцев В. А. Продукционные показатели и конкурентные отношения деревьев. Исследование зависимостей. Екатеринбург : УГЛТУ, 2013а. 553 с. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2627> (дата обращения: 07.05.2025).
18. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург : УГЛТУ, 2016. 336 с. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696> (дата обращения: 07.05.2025).
19. Усольцев В. А. Прогнозирование радиального прироста стволов в естественных сосняках и культурах по морфометрии крон, доступной для наземного лидарного сканирования, с учетом мультиколлинеарности факторов // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43, № 5. С. 25–35.
20. Усольцев В. А., Крепкий И. С., Прохоров Ю. А. Биологическая продуктивность естественных и искусственных сосняков Аман-Карагайского бора // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1985. № 8. С. 74–79.
21. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Прогнозирование биомассы стволов сосновых деревьев естественных древостоев и лесных культур в связи с изменением климата // Сибирский лесной журнал. 2021. № 2. С. 72–81.
22. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Моделирование фитомассы отмерших ветвей растущих деревьев сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 3 (55). С. 5–16.
23. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Аллометрические модели и таблицы для оценки биомассы отмерших ветвей растущих деревьев дистанционными методами // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41. № 1. С. 56–64.
24. Усольцев В. А., Плюха Н. И., Цепордей И. С. Оценка сбежистости стволов деревьев лесобразующих видов Евразии для бортового лазерного зондирования // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2024. № 2. С. 29–39.
25. Усольцев В. А., Терентьев В. В., Белоусов Е. В. и др. Биологическая продуктивность сосняков искусственного и естественного происхождения таежной, лесостепной и степной зон // Леса Урала и хозяйство в них. Вып. 27. Екатеринбург : УГЛТУ, 2006. С. 202–214.
26. Antkowiak L. The use of the bark of some trees and shrubs // Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego, Poznan, Poland, 1997. P. 1–10.
27. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2, No. 1. P. 49–53.
28. Brockerhoff E. G., Jactel H., Parrotta J. A. et al. Plantation forests and biodiversity: Oxymoron or opportunity? // Biodiversity and Conservation. 2008. Vol. 17. P. 925–951.
29. Dymond C. C., Beukema S., Nitschke C. R. et al. Carbon sequestration in managed temperate coniferous forests under climate change // Biogeosciences. 2016. Vol. 13. P. 1933–1947.
30. Giagli K., Vavřík 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, No. 6. P. 1011–1022.
31. Gholz H. L. Structure and productivity of *Juniperus occidentalis* in Central Oregon // The American Midland Naturalist. 1980. Vol. 103, No. 2. P. 251–261.
32. Gryc V., Horacek P., Šezingerová J. et al. Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic // Wood Research. 2011. Vol. 56, No. 1. P. 23–32.
33. Hakkila P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. 1966. Vol. 61, No. 5. P. 1–98. Available at: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171093> (дата обращения: 07.05.2025).

34. Hakkila P. Coniferous branches as a raw material source. A sub-project of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues // *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 1972. Vol. 75. P. 1–60.
35. Hernández M. A., Genes P. Y. Wood density at breast height as estimate of the whole tree density in *Grevillea robusta* // *Australian Forestry*. 2016. Vol. 79, No. 3. P. 168–170.
36. Ibanez T., Chave J., Barrabé L. et al. Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island // *Journal of Vegetation Science*. 2017. Vol. 28, No. 1. P. 19–33.
37. Ilek A., Kucza J., Morkisz K. Hygroscopicity of the bark of selected forest tree species // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2016. Vol. 10. No. 1. P. 220–226.
38. Ilek A., Siegert C. M., Wade A. Hygroscopic contributions to bark water storage and controls exerted by internal bark structure over water vapor absorption // *Trees*. 2021. Vol. 35. P. 831–843.
39. Kirilenko A. P., Sedjo R. A. Climate change impacts on forestry // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. 2007. Vol. 104. No. 50. P. 19697–19702.
40. Komán S., Feher S. Basic density of hardwoods depending on age and site // *Wood Research*. 2015. Vol. 60. No. 6. P. 907–912.
41. Kozłowski T. T. Carbohydrate sources and sinks in woody plants // *The Botanical Review*. 1992. Vol. 58. P. 108–222.
42. Kraszkiewicz A. Analysis of selected chemical properties of wood and bark of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) // *Inżynieria Rolnicza*. 2009. Vol. 117. No. 8. P. 69–75.
43. Lachowicz H., Bieniasz A., Wojtan R. Variability in the basic density of silver birch wood in Poland // *Silva Fennica*. 2019. Vol. 53. No. 1. Article id 9968.
44. Mackey B. Counting trees, carbon and climate change // *Significance*. 2014. Vol. 11, No. 1. P. 19–23.
45. Magalhães T. M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebonbo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain) // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2021. Vol. 51. P. 1–12.
46. Nabais C., Hansen J. K., David-Schwartz R. et al. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 408. P. 148–156.
47. Navarro-Cerrillo R. M., Rodriguez-Vallejo C., Silveiro E. et al. Cumulative drought stress leads to a loss of growth resilience and explains higher mortality in planted than in naturally regenerated *Pinus pinaster* stands // *Forests*. 2018. Vol. 9, No. 6. Article 358.
48. Niskanen A. Forest plantations in the South: Environmental-economic evaluation. In: Palo M., Vanhanen H. (eds.). *World forests from deforestation to transition? World forests. 2*. Dordrecht : Springer, 2000. P. 83–98.
49. Pawson S. M., Brin A., Bockerhoff E. G. et al. Plantation forests, climate change and biodiversity // *Biodiversity and Conservation*. 2013. Vol. 22. P. 1203–1227.
50. Prosinski S. *Chemia drewna* [Chemistry of wood]. Warszawa, Poland : Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1984. 475 p. [in Polish].
51. Repola J. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40, No. 4. P. 673–685.
52. Rodriguez-Vallejo C., Navarro-Cerrillo R. M. Contrasting response to drought and climate of planted and natural *Pinus pinaster* Aiton forests in Southern Spain // *Forests*. 2019. Vol. 10, No. 7. Article 603.
53. Stage A. R., Renner D. L., Chapman R. C. Selected yield tables for plantations and natural stands in Inland Northwest Forests. USDA Forest Service, Intermountain Research Station. Research Paper INT-394, 1988. 60 p.
54. Stegen J. C., Swenson N. G., Enquist B. J. et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20, No. 5. P. 744–754.
55. Thomasius H. O. Ökologische und landeskulturelle Aspekte der forstwirtschaftlichen Stoffproduktion // TU Dresden, Universitätsreden, H. 54. 30 Plenartagung des wissenschaftlichen Rates der TU Dresden am 19. Januar 1981. P. 23–33.
56. Usoltsev V. A., Vanclay J. K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 10. P. 305–312.
57. Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. Feedback modelling of natural stand and plantation biomass to changes in climatic factors (temperatures and precipitation): A special case for two-needle pines in Eurasia // *Journal of Climate Change*. 2020b. Vol. 6, No. 2. P. 15–32.
58. Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. et al. Are there differences in the response of natural stand and plantation biomass to changes in temperature and precipitation? A case for two-needled pines in Eurasia // *Journal of Resources and Ecology*. 2020a. Vol. 11, No. 4. P. 331–341.
59. Williamson G. B., Wiemann M. C. Measuring wood specific gravity correctly // *American Journal of Botany*. 2010. Vol. 97, No. 3. P. 519–524.

REFERENCES

1. Babich N. A., Evdokimov I. V., Nevolin N. N. *Kul'tury sosny Vologodskoj oblasti*. Vologda : VGMKhA, 2008. 136 s.
2. Biryukova Z. P., Verzunov A. I., Mekhedova L. G. i dr. *Vodnyj rezhim i ustojchivost' nasazhdenij sosny v Severnom Kazakhstane* // *Lesovedenie*. 1989. No. 1. S. 9–18.
3. Bubyř D. S., Klyachkin V. N., Karpunina I. N. *Ispol'zovanie binarnykh peremennykh pri regressionnom modelirovanii sostoyaniya tekhnicheskogo ob'ekta* // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj Akademii nauk*. 2014. T. 16, № 6 (2). S. 371–373.
4. Draper N., Smith G. *Prikladnoj regressionnyj analiz*. Moscow : Statistika, 1973. 392 s.
5. Zalesov S. V., Lobanov A. N., Lugansky N. A. *Rost i proizvoditel'nost' sosnyakov iskusstvennogo i*

estestvennogo proiskhozhdeniya. Yekaterinburg : UGLTU, 2002. 112 s.

6. Isaeva L. N. Metod rascheta lokal'noj i srednej plotnosti absolutno sukhoy drevesiny v stvolakh sosny i listvennitsy // Lesovedenie. 1978. No. 4. S. 90–94.

7. Liepa I. Ya. Dinamika drevesnykh zapasov: prognozirovaniye i ekologiya. Riga : Zinatne, 1980. 171 s.

8. Melekhov V. I., Babich N. A., Korchagov S. A. Kachestvo drevesiny sosny v kul'turakh. Arhangel'sk: AGTU, 2003. 110 s.

9. Molchanov A. A. Nauchnye osnovy vedeniya khozyajstva v dubravakh lesostepi. Moscow : Nauka, 1964. 255 s.

10. Plyukha N. I., Usoltsev V. A., Anhalt E. M. Vidovye osobennosti izmeneniya bazisnoj plotnosti drevesiny i kory vdol' po stvolu dereva // Conifers of the boreal area. 2024a. T. 42, № 4. S. 11–16.

11. Plyukha N. I., Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Modelirovaniye doli kory v fitomasse vetvej sosny obyknovennoy v stepnoj zone // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie (Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management). 2024b. № 1 (61). S. 44–54.

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

13. Smolyak L. P., Petrov E. G., Rusalenko A. I. Ob'emnyy ves drevesiny i kory sosny v razlichnykh ekologicheskikh usloviyakh // Lesnoe khozyajstvo. 1978. № 4. S. 70–71.

14. Usoltsev V. A. Formirovaniye stvola u berezy semennogo i poroslevogo proiskhozhdeniya v aspekte allometricheskogo rosta // Vestnik sel'skokhozyajstvennoj nauki Kazakhstana. 1976. № 7. S. 83–88.

15. Usoltsev V. A. Rost i struktura fitomassy drevostoev. Novosibirsk : Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1988. 253 s. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352> (дата обращения: 07.05.2025).

16. Usoltsev V. A. Vertikal'no-fraktsionnaya struktura fitomassy dereviev. Issledovanie zakonornostey. Yekaterinburg : UGLTU, 2013b. 603 s. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2771> (дата обращения: 07.05.2025).

17. Usoltsev V. A. Produktsionnye pokazateli i konkurentnye otnosheniya dereviev. Issledovanie zavisimostey. Yekaterinburg : UGLTU, 2013a. 553 s. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2627> (дата обращения: 07.05.2025).

18. Usoltsev V. A. Fitomassa model'nykh defeviev lesoobrazuyushchikh porod Evrazii. Baza dannykh, klimaticheskii obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy. Yekaterinburg : UGLTU, 2016. 336 s. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696> (дата обращения: 07.05.2025).

19. Usoltsev V. A. Prognozirovaniye radial'nogo prirosta stvolov v estestvennykh sosnyakakh i kul'turakh po morfometrii kron, dostupnoj dlya nazemnogo lidarnogo skanirovaniya s uchetom mul'tikolliearnosti faktorov // Khvojnye boreal'noj zony (Conifers of the boreal area). 2025. T. 43, № 5. S. 25–35.

20. Usoltsev V. A., Krepyk I. S., Prokhorov Yu. A. Biologicheskaya produktivnost' estestvennykh i

iskusstvennykh sosnyakov Aman-Karagajskogo bora // Vestnik sel'skokhozyajstvennoj nauki Kazakhstana. 1985. № 8. S. 74–79.

21. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Prognozirovaniye biomassy stvolov sosnykh dereviev estestvennykh drevostoev i lesnykh kul'tur v svyazi s izmeneniyem klimata // Sibirskiy Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2021. № 2. S. 72–81 (in Russian with English abstract and references).].

22. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Modelirovaniye fitomassy otmershikh vetvej rastushchikh dereviev sosny obyknovennoy // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie (Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management). 2022. № 3 (55). S. 5–16.

23. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Allometricheskii modeli i tablitsy dlya otsenki biomassy otmershikh vetvej rastushchikh dereviev distantsionnymi metodami // Khvojnye boreal'noj zony (Conifers of the boreal area). 2023. T. 41, № 1. S. 56–64.

24. Usoltsev V. A., Plyukha N. I., Tsepordey I. S. Otsenka sbezhistosti stvolov dereviev lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii dlya bortovogo lazernogo zondirovaniya // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva. 2024. No. 2. S. 29–39.

25. Usoltsev V. A., Terentyev V. V., Belousov E. V. i dr. Biologicheskaya produktivnost' sosnyakov iskusstvennogo i estestvennogo proiskhozhdeniya taezhnoj, lesostepnoj i stepnoj zon // Lesa Urala i khozyajstvo v nikh (Forests of Russia and economy in them). 2006. Vol. 27. S. 202–214.

26. Antkowiak L. The use of the bark of some trees and shrubs // Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego, Poznan, Poland, 1997. P. 1–10.

27. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2, No. 1. P. 49–53.

28. Brockerhoff E. G., Jactel H., Parrotta J. A. et al. Plantation forests and biodiversity: Oxymoron or opportunity? // Biodiversity and Conservation. 2008. Vol. 17. P. 925–951.

29. Dymond C. C., Beukema S., Nitschke C. R. et al. Carbon sequestration in managed temperate coniferous forests under climate change // Biogeosciences. 2016. Vol. 13. P. 1933–1947.

30. Giagli K., Vavrčik 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, No. 6. P. 1011–1022.

31. Gholz H. L. Structure and productivity of *Juniperus occidentalis* in Central Oregon // The American Midland Naturalist. 1980. Vol. 103, No. 2. P. 251–261.

32. Gryc V., Horacek P., Šezingerová J. et al. Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic // Wood Research. 2011. Vol. 56, No. 1. P. 23–32.

33. Hakkila P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. 1966. Vol. 61, No. 5. P. 1–98.

Available at: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171093> (дата обращения: 07.05.2025).

34. Hakkila P. Coniferous branches as a raw material source. A sub-project of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues // *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 1972. Vol. 75. P. 1–60.

35. Hernández M. A., Genes P. Y. Wood density at breast height as estimate of the whole tree density in *Grevillea robusta* // *Australian Forestry*. 2016. Vol. 79, No. 3. P. 168–170.

36. Ibanez T., Chave J., Barrabé L. et al. Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island // *Journal of Vegetation Science*. 2017. Vol. 28, No. 1. P. 19–33.

37. Ilek A., Kucza J., Morkisz K. Hygroscopicity of the bark of selected forest tree species // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 220–226.

38. Ilek A., Siegert C. M., Wade A. Hygroscopic contributions to bark water storage and controls exerted by internal bark structure over water vapor absorption // *Trees*. 2021. Vol. 35. P. 831–843.

39. Kirilenko A. P., Sedjo R. A. Climate change impacts on forestry // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. 2007. Vol. 104, No. 50. P. 19697–19702.

40. Komán S., Feher S. Basic density of hardwoods depending on age and site // *Wood Research*. 2015. Vol. 60, No. 6. P. 907–912.

41. Kozłowski T. T. Carbohydrate sources and sinks in woody plants // *The Botanical Review*. 1992. Vol. 58, P. 108–222.

42. Kraszkiewicz A. Analysis of selected chemical properties of wood and bark of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) // *Inżynieria Rolnicza*. 2009. Vol. 117, No. 8. P. 69–75.

43. Lachowicz H., Bieniasz A., Wojtan R. Variability in the basic density of silver birch wood in Poland // *Silva Fennica*. 2019. Vol. 53, No. 1. Article id 9968.

44. Mackey B. Counting trees, carbon and climate change // *Significance*. 2014. Vol. 11, No. 1. P. 19–23.

45. Magalhães T. M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebombo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain) // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2021. Vol. 51. P. 1–12.

46. Nabais C., Hansen J. K., David-Schwartz R. et al. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 408. P. 148–156.

47. Navarro-Cerrillo R. M., Rodriguez-Vallejo C., Silveiro E. et al. Cumulative drought stress leads to a loss of growth resilience and explains higher mortality in planted than in naturally regenerated *Pinus pinaster* stands // *Forests*. 2018. Vol. 9, No. 6. Article 358.

48. Niskanen A. Forest plantations in the South: Environmental-economic evaluation. In: Palo M., Vanhanen H. (eds.). *World forests from deforestation to transition? World forests. 2*. Dordrecht : Springer, 2000. P. 83–98.

49. Pawson S. M., Brin A., Brockerhoff E. G. et al. Plantation forests, climate change and biodiversity // *Biodiversity and Conservation*. 2013. Vol. 22. P. 1203–1227.

50. Prosinski S. *Chemia drewna* [Chemistry of wood]. Warszawa, Poland: Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1984. 475 p. [in Polish]

51. Repola J. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40, No. 4. P. 673–685.

52. Rodriguez-Vallejo C., Navarro-Cerrillo R. M. Contrasting response to drought and climate of planted and natural *Pinus pinaster* Aiton forests in Southern Spain // *Forests*. 2019. Vol. 10, No. 7. Article 603.

53. Stage A. R., Renner D. L., Chapman R. C. Selected yield tables for plantations and natural stands in Inland Northwest Forests. USDA Forest Service, Intermountain Research Station. Research Paper INT-394, 1988. 60 p.

54. Stegen J. C., Swenson N. G., Enquist B. J. et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20, No. 5. P. 744–754.

55. Thomasius H. O. Ökologische und landeskulturelle Aspekte der forstwirtschaftlichen Stoffproduktion // *TU Dresden, Universitätsreden*, H. 54. 30 Plenartagung des wissenschaftlichen Rates der TU Dresden am 19. Januar 1981. P. 23–33.

56. Usoltsev V. A., Vancley J. K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 10. P. 305–312.

57. Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. Feedback modelling of natural stand and plantation biomass to changes in climatic factors (temperatures and precipitation): A special case for two-needle pines in Eurasia // *Journal of Climate Change*. 2020b. Vol. 6, No. 2. P. 15–32.

58. Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. et al. Are there differences in the response of natural stand and plantation biomass to changes in temperature and precipitation? A case for two-needled pines in Eurasia // *Journal of Resources and Ecology*. 2020a. Vol. 11, No. 4. P. 331–341.

59. Williamson G. B., Wiemann M. C. Measuring wood specific gravity correctly // *American Journal of Botany*. 2010. Vol. 97, No. 3. P. 519–524.

© Плюха Н. И., Усольцев В. А.,
Часовских В. П., 2025