

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БАЗИСНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ В КОРЕ У ЛИСТВЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

В.А. Усольцев^{1, 2✉}, Н.И. Плюха¹, И.С. Цепордей²

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

²ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

Usoltsev50@mail.ru

Проведен анализ региональных особенностей базисной плотности запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии. По полученным данным (2741 дерево шести лиственных древесных родов (видов) Евразии) разработаны регрессионные модели смешанного типа для базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, специфичные по кластерам, представляющим регионы в пределах рода, виды и происхождение древостоев в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование кластеров по базисной плотности запаса стволовой древесины в коре при условии их равенства по возрасту деревьев (за исключением родов *Betula* и *Populus*, у которых возраст дерева в моделях статистически незначим). Выполнены два ранжирования по величине базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, а именно, ранжирование кластеров в пределах рода (для бука лесного — в пределах вида) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется бук лесной и минимальным — тополь черный. Полученные модели и ранжирования видов по величине базисной плотности запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Ключевые слова: лесообразующие виды Евразии, базисная плотность запаса стволовой древесины, регрессионные модели смешанного типа, ранжирования видов

Ссылка для цитирования: Усольцев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С. Региональные особенности базисной плотности запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 5–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-5-18

Увеличение количества опубликованных научных работ и расширение доступности к полученным результатам в мировом масштабе привели к быстрому накоплению объема данных, что обусловило вступление научного сообщества исследователей в области экологии в «эру больших данных» [1]. Это предоставляет экологическому сообществу возможности для решения актуальных проблем современности в беспрецедентных временных и пространственных масштабах [2, 3]. Одна из подобных баз данных (представляемая как «база баз данных») [4] создана в целях документирования функционального разнообразия растений, ознакомления биологов с широким набором признаков растений и предоставления открытого доступа к данным, которые могут быть решающими в эпоху глобальных изменений. Она содержит 12 млн записей о физиологических, морфологических, анатомических и фенологических признаках растений для 280 тыс. видов по всему миру.

При хозяйственном использовании стволовая древесина оценивается в единицах объема, однако

для более широкой и объективной оценки ее фитомассы и углерододепонирующей способности стволовой древесины необходимо ее оценивать в единицах массы. Во избежание повторных измерений при определении фитомассы следует знать базисную плотность (БП) (basic density) древесины [5].

Известно, что древесина состоит из клеточных стенок и пустотных пространств. Клеточные стенки древесины имеют примерно одинаковую БП, независимо от древесного вида — около 1,56 т/м³, и, таким образом, БП древесины как отношение массы абсолютно сухой древесины к ее объему в свежем состоянии зависит от соотношения объемов, занимаемых клеточными стенками и межклеточным пространством. Наряду с БП древесины, применяется показатель удельного веса (specific gravity) как отношение абсолютно сухой массы к занимаемому объему воды, 1 м³ которой имеет массу 1 т. Если БП древесины составляет 400 кг/м³, то удельный вес — 0,40 кг/м³. Тем не менее разница между удельным весом и БП древесины может достигать от –2 до +1 % [6].

В большинстве публикаций БП древесины оценивается в абсолютно сухом состоянии,

однако некоторые работы приводят оценки БП древесины при влажности 12 % [7, 8]. При использовании опубликованных средних значений БП древесины или ее удельного веса по тому или иному древесному виду для перевода объема древесины в показатели массы важно знать, был ли получен объем в свежем (т. е. до усушки) или в сухом состоянии (после усушки). Разница объемов в свежем и сухом состоянии достигает в среднем 10 % у хвойных и 15 % у лиственных видов, иногда от 7 до 20 % и более. В целом БП древесины, оцененная по объему древесины в свежем состоянии, преимущественнее, поскольку применима к объему ствола растущего дерева без необходимости наличия данных об объемной усушке [9].

Характеристики качества древесины, в том числе показатели ее БП, включены в программы по селекции древесных видов в разных странах [8, 10–16]. Базисная плотность древесины может служить показателем устойчивости того или иного вида к засухам [17] и опосредованно через связь с относительной высотой ствола — показателем устойчивости к ветровалам [18–20]. Наличие стволовой гнили существенно снижает базисную плотность и, соответственно, содержание углерода в древесине [21].

Развитие методов неразрушающего контроля квалитетических показателей древесины растущих деревьев дает возможность получить массовые данные о БП древесины и других ее характеристиках [22, 23]. Анализ древесины в спектре ближнего (ИК-диапазон) показал возможность прогнозирования БП древесины с коэффициентом детерминации модели для тропических видов Бразилии от 0,87 до 0,93 [24], для хвойных и лиственных Канады — от 0,83 до 0,93 [25] и для лиственницы европейской в Англии — до 0,98 [26].

На мировом уровне БП древесины изменяется от 290 до 540 кг/м³ у хвойных и от 100 до 1300 кг/м³ у остальных видов, причем большинство их попадают в диапазон от 320 до 720 кг/м³ [9, 27]. У некоторых лиственных видов Словакии БП древесины и коры изменяется в диапазонах соответственно от 440 до 650 кг/м³ и от 380 до 670 кг/м³, а у некоторых хвойных — соответственно от 373 до 508 кг/м³ и от 333 до 551 кг/м³ [5]. У некоторых древесных видов Бразилии БП древесины изменяется в пределах от 350 до 850 кг/м³ [28].

Базисная плотность древесины может различаться у видов в пределах одного рода, например, составлять 586 и 627 кг/м³ соответственно у дуба скального и австрийского с ареалом в Венгрии [5]. У 470 родов в глобальных масштабах была исследована линейная связь БП древесины, различающейся между видами в пределах рода, со средним значением для рода, что объяснило 62 % варьирования БП древесины видов [29].

Видовая специфика формирования БП древесины и коры обусловила абсолютно разные ранжирования некоторых лиственных видов Словакии по значению БП древесины и коры [5]. Различные порядки ранжирования БП древесины и коры были выявлены также у некоторых лесобразующих видов Евразии [30, 31].

Базисная плотность древесины зависит не только от ее влажности, но и от других физико-технических и механических свойств [7, 23, 32–36]. Возрастное замедление радиального прироста стволов деревьев, как установлено, обуславливает увеличение БП древесины в радиальном направлении — от сердцевины к коре [20, 37–39], однако это характерно не для всех древесных видов [20, 40]. В частности, у ольхи серой и черной БП древесины увеличивается в направлении от основания к вершине ствола [41], тогда как у эвкалипта, сосны обыкновенной и сосны карибской, лиственницы европейской и курателлы американской (*Curatella americana* L.) в таком же направлении она снижается [35, 42–44], у березы повислой, бука лесного, ясеня обыкновенного и 140-летней ели европейской четкая закономерность вообще не обнаружена [26, 37, 43].

Выявлены существенные изменения БП древесины вследствие влияния на деревья различных факторов окружающей среды [32, 45–50], в том числе климатических [31, 51], а также в зависимости от возраста дерева, диаметра его ствола, ширины годичного кольца, доли поздней древесины и других эндогенных и экзогенных показателей [18, 34, 44, 49, 52–56]. Зависимость БП древесины от диаметра ствола может быть как отрицательной [19, 36, 57], так и положительной [19, 55–58]. Использование в качестве предиктора БП древесины диаметра ствола без учета других параметров может давать низкий коэффициент детерминации и объяснять лишь от 5 до 7 % ее общей изменчивости [19, 55].

Современные технологии позволяют осуществлять производство древесно-стружечных плит из древесины и коры любых древесных видов без снижения качества продукции [59]. В силу технологической специфики деревообрабатывающих производств в Японии [60] вся японская литература, посвященная оценке фитомассы деревьев и древостоев, начиная с 1950 г. по настоящее время, содержит данные о массе (и очень редко об объеме) стволов без разделения на древесину и кору [61].

Практически во всех литературных источниках, содержащих информацию о квалитетических свойствах древесины, приводится информация только о БП собственно древесины и очень редко о БП как древесины, так и коры, и показано

их существенное различие [5, 23, 30]. В работе К. Лиепиньша и соавторов [41] приводятся данные о БП древесины ольхи вместе с корой, что является редким исключением в сложившейся ситуации. Если необходимо рассчитать биомассу стволовой древесины в коре по имеющимся данным объемов на основе БП древесины, различающихся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры. Насколько нам известно, исследования БП стволовой древесины в коре для различных древесных видов в литературе отсутствуют.

Цель работы

Цель работы — разработка регрессионных моделей смешанного типа для базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, специфичных по регионам и древесным видам.

Объекты и методы исследования

Источником исходных материалов для регрессионного моделирования послужили база данных о квалитетических показателях древесных видов Центральной Евразии [62] и последняя версия базы данных о фитомассе деревьев лесобразующих видов Евразии [61]. Сформирована выборка из 2741 дерева шести лиственных древесных родов (видов) Евразии (табл. 1).

Поскольку ни один вид не распространен по всей территории Евразии, викарирующие виды того или иного древесного рода представлены в отдельных регионах. В пределах регионов у некоторых видов рассматривается БП древесины стволов, подразделенная на типы в зависимости от происхождения древостоя (семенного, порослевого, искусственного). Размер выборок по видам различается — от 237 наблюдений для лип до 948 для берез. Количество выделяемых регионов и видов в пределах региона также разное — от 4 для бука лесного до 12 для берез. То и другое определяется главным образом шириной ареала исследуемого рода (вида). Однако немаловажное значение в разбиении исходных данных на анализируемые группы (кластеры) имеет степень наполненности упомянутых баз данных фактическим материалом.

В «идеальном» случае кластеризация исходных данных могла бы иметь следующий вид. В ареале древесного рода выделяются области произрастания составляющих его викарирующих видов, в пределах которых выявляются географические регионы произрастания каждого вида, и в каждом регионе определяются исходные данные по происхождению древостоев. Однако нынешняя структура баз данных не позволяет осуществить

подобную «идеальную» схему кластеризации. В действительности имеется абсолютно разнородная кластеризация исходных данных, которая зависит от степени заполнения «идеальной» схемы фактическими данными.

Например, для Южного Предуралья в пределах ареала липы мелколистной имеются фактические данные по БП древостоев семенного, порослевого и искусственного происхождения. В ареалах белых берез, скорее всего, произрастают древостои трех происхождений, однако фактические данные о БП древесины берез есть только для древостоев естественного происхождения. Получены данные о БП древесины трех видов берез (см. табл. 1) в пределах Приморья. Игнорировать деление показателей БП древесины липы по происхождению на основании невозможности выполнения того же самого для берез означает потерю информации по БП древесины липы. Точно так же нелогично объединять три вида берез в пределах Приморья на основании наличия в Приморье лишь одного вида липы.

Согласно проведенному анализу литературных источников, при исследовании зависимости БП древесины от дендрометрических показателей деревьев наиболее часто в качестве независимых переменных в модель включали возраст и диаметр ствола дерева. Высота дерева рассматривалась реже по причине ее корреляции с возрастом. Поскольку одной из целей данного исследования является ранжирование древесных видов и родов по значению БП древесины, для каждого рода в отдельности была применена структура модели смешанного типа [30, 64], включающая в себя численные (возраст и диаметр ствола) и фиктивные переменные. Последние кодируют принадлежность данных БП древесины к тому или иному кластеру, дифференцированному по древесным видам и регионам, а в пределах ареала липы мелколистной — также по происхождению древостоя (см. табл. 1).

В итоге была принята следующая структура аллометрической модели смешанного типа

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

где BD — базисная плотность (БП) стволовой древесины в коре, $\text{кг}/\text{м}^3$;

A — возраст дерева, лет;

D — диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, см;

$\sum a_i X_i$ — блок фиктивных переменных в количестве $i + 1$;

a_0 — свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных;

b_1 и b_2 — регрессионные коэффициенты при численных переменных уравнения.

Отметим, что для классического регрессионного анализа численных переменных требуется равномерная матрица распределения данных во избежание смещений под влиянием разных «весов» (значимости). При использовании блока фиктивных переменных это требование теряет смысл, поскольку качественные (фиктивные) переменные имеют одинаковые «веса», независимо

от количества данных, приходящихся на каждую переменную.

Результаты и обсуждение

Как указано выше, зависимость БП древесины от диаметра ствола не является устойчивой: она может быть как положительной, так и отрицательной в связи с изменением доли ядра

Т а б л и ц а 1

Распределение 2741 измерения БП стволовой древесины в коре по регионам, видам и происхождению древостоев и схема их кодирования фиктивными переменными
Distribution of 2741 measurements of trunk timber basic density in bark by region, species and stand origin and their coding scheme with dummy variables

Регион (код)	Вид	Происхождение древостоя*	Число наблюдений	Географические координаты	Блок фиктивных переменных										
					X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
Род <i>Betula</i> L. (948 наблюдений в десяти регионах)															
Северо-Запад России (СЗР)	<i>Betula pendula</i> Roth	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Украинское Полесье (УП)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Урал (Ур)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Тургайский прогиб (ТП)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Юг Западной Сибири (ЮЗС)	<i>B. pubescens</i> Ehrh.	е	–	–	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Казахский мелкосопочник (КМ)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Средняя Сибирь (СС)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Восточный Хэнтэй Монголии (ВХМ)	<i>B. platyphylla</i> Suk.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Приморье 1 (ПРМ1)	<i>B. platyphylla</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Приморье 2 (ПРМ2)	<i>B. costata</i> Trautv.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Приморье 3 (ПРМ3)	<i>B. dahurica</i> Pall.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Род <i>Populus</i> L. (334 наблюдения в девяти регионах)															
Северо-Запад России (СЗР)	<i>Populus tremula</i> L.	ес	5	34,5° с. ш. 39,5° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Украинское Полесье (УП)	<i>P. tremula</i>	ес	49	51,4° с. ш. 30,7° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>P. tremula</i>	ес	4	55,7° с. ш. 36,7° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Средний Урал (СУ)	<i>P. tremula</i>	ес	3	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Оренбуржье (Ор)	<i>P. nigra</i> L.	к	7	51,7° с. ш. 54,8° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Тургайский прогиб (ТП)	<i>P. tremula</i>	ес	38	53,2° с. ш. 64,0° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Юг Западной Сибири (ЮЗС)	<i>P. tremula</i>	еп	142	54,9° с. ш. 69,9° в. д.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Казахский мелкосопочник (КМ)	<i>P. tremula</i>	еп	79	52,6° с. ш. 70,4° в. д.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Приморье (ПРМ)	<i>P. davidiana</i> Dode	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	

Окончание табл. 1

Регион (код)	Вид	Происхождение древостоя*	Число наблюдений	Географические координаты	Блок фиктивных переменных																
					X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁						
Род <i>Quercus</i> L. (451 наблюдение в шести регионах)																					
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>Quercus robur</i> L.	ес	16	47,5° с. ш. 8,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Балканы (БАЛ)	<i>Q. longipes</i> Stev.	к	14	43,3° с. ш. 25,0° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинское Полесье 1 (УП1)	<i>Q. robur</i>	ес	68	49,5° с. ш. 27,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинское Полесье 2 (УП2)	<i>Q. robur</i>	к	10	51,5° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинская лесостепь 1 (УЛ1)	<i>Q. robur</i>	ес	226	49,0° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинская лесостепь 2 (УЛ2)	<i>Q. robur</i>	к	106	49,0° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>Q. robur</i>	ес	5	55,7° с. ш. 36,7° в. д.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Приморье (ПРМ)	<i>Q. mongolica</i> F. ex L.	ес	6	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Род <i>Tilia</i> L. (237 наблюдений в пяти регионах)																					
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>Tilia parvifolia</i> Ehrh.	ес	2	48,8° с. ш. 16,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>T. cordata</i> Mill.	ес	29	55,8° с. ш. 37,4° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Средний Урал (СУ)	<i>T. cordata</i>	ес	4	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Южное Предуралье 1 (ЮП1)	<i>T. cordata</i>	ес	7	54,7° с. ш. 56,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Южное Предуралье 2 (ЮП2)	<i>T. cordata</i>	еп	124	54,8° с. ш. 55,7° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Южное Предуралье 3 (ЮП3)	<i>T. cordata</i>	к	57	54,7° с. ш. 54,9° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Приморье 1 (ПРМ1)	<i>T. amurensis</i> Rupr.	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Приморье 2 (ПРМ2)	<i>T. mandshurica</i> Rupr. & Maxim.	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Род <i>Alnus</i> Gaertn. (504 наблюдения в пяти регионах)																					
Север Архангельской области (САО) [63]	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench.	ес	22	48,8° с. ш. 16,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Южная Карелия (ЮК)	<i>A. incana</i>	ес	5	55,8° с. ш. 37,4° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Прибалтика (ПРБ)	<i>A. incana</i>	ес	8	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинское Полесье (УП)	<i>A. glutinosa</i> (L.) Gaertn.	ес	462	54,7° с. ш. 56,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Приморье (ПРМ)	<i>A. hirsute</i> (Spach) T. ex R.	ес	7	54,8° с. ш. 55,7° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Род <i>Fagus sylvatica</i> L. (267 наблюдений в четырех регионах)																					
Западная Европа (ЗЕ)	<i>Fagus sylvatica</i> L.	ес	60	48,7° с. ш. 7,1° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>F. sylvatica</i>	ес	22	51,5° с. ш. 16,7° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Северная Европа (СЕ)	<i>F. sylvatica</i>	ес	2	56,0° с. ш. 12,2° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украинские Карпаты (УК)	<i>F. sylvatica</i>	ес	183	48,5° с. ш. 23,5° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*Происхождение древостоя: ес — естественное семенное, к — культуры, еп — естественное порослевое.

у равновеликих деревьев. Оценка БП коры связана с другой неопределенностью — долей ритидома (корки) в общей массе коры. При оценке БП стволовой древесины в коре неопределенности, связанные по отдельности с древесиной и корой, накладываются одна на другую, что вызывает еще большую неопределенность. Это, по-видимому, послужило причиной того, связь БП древесины с диаметром ствола в модели (1) у разных родов имела разные знаки и, что более существенно, статистическая значимость диаметра как независимой переменной в большинстве случаев не обеспечивалась. Исключение составила БП ствола бука, у которого, как известно, корки нет. В итоге значимость диаметра ствола в этом случае была на уровне вероятности $p < 0,001$ ($t = 3,6 > t_{999} = 3,29$). Тем не менее для обеспечения консеквентности (логической последовательности) рассчитываемых моделей был исключен диаметр ствола из структуры моделей для всех видов и родов, и в окончательные расчеты БП древесины была включена их упрощенная структура

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + \sum a_i X_i. \quad (2)$$

Результаты моделирования (табл. 2) показали, что для родов *Betula* и *Populus* возраст дерева в качестве независимой переменной оказался не значимым ($t = 0,82 \dots 0,99 < t_{95} = 1,96$) и был исключен из структуры модели.

Путем графической интерпретации модели (2) выполнено ранжирование кластеров по величине БП стволовой древесины в коре (рис. 1).

Для родов *Quercus*, *Tilia*, *Alnus* и вида *Fagus sylvatica* в модели (2) предварительно были введены значения среднего возраста деревьев ($A = 40$ лет), рассчитанные по исходным данным.

Как следует из рис. 1, у рода *Betula* максимальным значением БП древесины стволов характеризуется береза плосколистная в Монголии и минимальным — береза повислая на Северо-Западе России. При этом происходит резкое снижение БП древесины в начале ряда в последовательности трех видов берез: плосколистная, повислая и даурская — соответственно с 620 до 541 кг/м³, а последующие кластеры в ряду распределения характеризуются сравнительно небольшим снижением: от березы ребристой в Приморье (536 кг/м³) до березы повислой на северо-западе России (482 кг/м³). У рода *Populus* максимальное значение БП древесины приходится на осину Северо-Запада России (513 кг/м³) и минимальное — на культуру тополя черного в Оренбуржье (327 кг/м³). При этом на основной части ряда распределения, приходящейся на осину, изменение БП древесины незначительное — от 430 кг/м³ на юге Западной Сибири до 400 кг/м³ на Среднем Урале.

Т а б л и ц а 2

Характеристика уравнений для базисной плотности стволовой древесины в коре
Equations characteristics for trunk timber basic density in bark

Независимые переменные	Обозначение	Зависимая переменная $\ln(BD)$					
		Род <i>Betula</i>	Род <i>Populus</i>	Род <i>Quercus</i>	Род <i>Tilia</i>	Род <i>Alnus</i>	Вид <i>Fagus sylvatica</i>
Свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных	a_0	6,1786	6,2408	6,4355	5,8878	5,7733	6,1747
Натуральный логарифм возраста дерева	$a_1(\ln A)$	–	–	–0,0394	0,0625	0,06	0,058
Фиктивные переменные	$a_2 X_1$	0,0763	–0,2161	0,036	–0,0339	0,218	–0,0531
	$a_3 X_2$	0,1647	–0,1947	0,0352	–0,1288	0,1062	–0,0879
	$a_4 X_3$	0,0394	–0,2491	0,0342	0,1278	0,102	0,0154
	$a_5 X_4$	0,0308	–0,4501	–0,0116	–0,0826	0,1109	–
	$a_6 X_5$	0,0357	–0,1841	–0,0008	–0,0310	–	–
	$a_7 X_6$	0,0511	–0,1776	0,2123	–0,1435	–	–
	$a_8 X_7$	0,0083	–0,1790	–0,0469	–0,2738	–	–
	$a_9 X_8$	0,2209	–0,3726	–	–	–	–
	$a_{10} X_9$	0,0682	–	–	–	–	–
	$a_{11} X_{10}$	0,106	–	–	–	–	–
	$a_{12} X_{11}$	0,1151	–	–	–	–	–
Коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных	$\text{adj}R^2$	0,202	0,53	0,24	0,202	0,323	0,176
Стандартная ошибка модели	SE	0,064	0,05	0,07	0,118	0,061	0,064

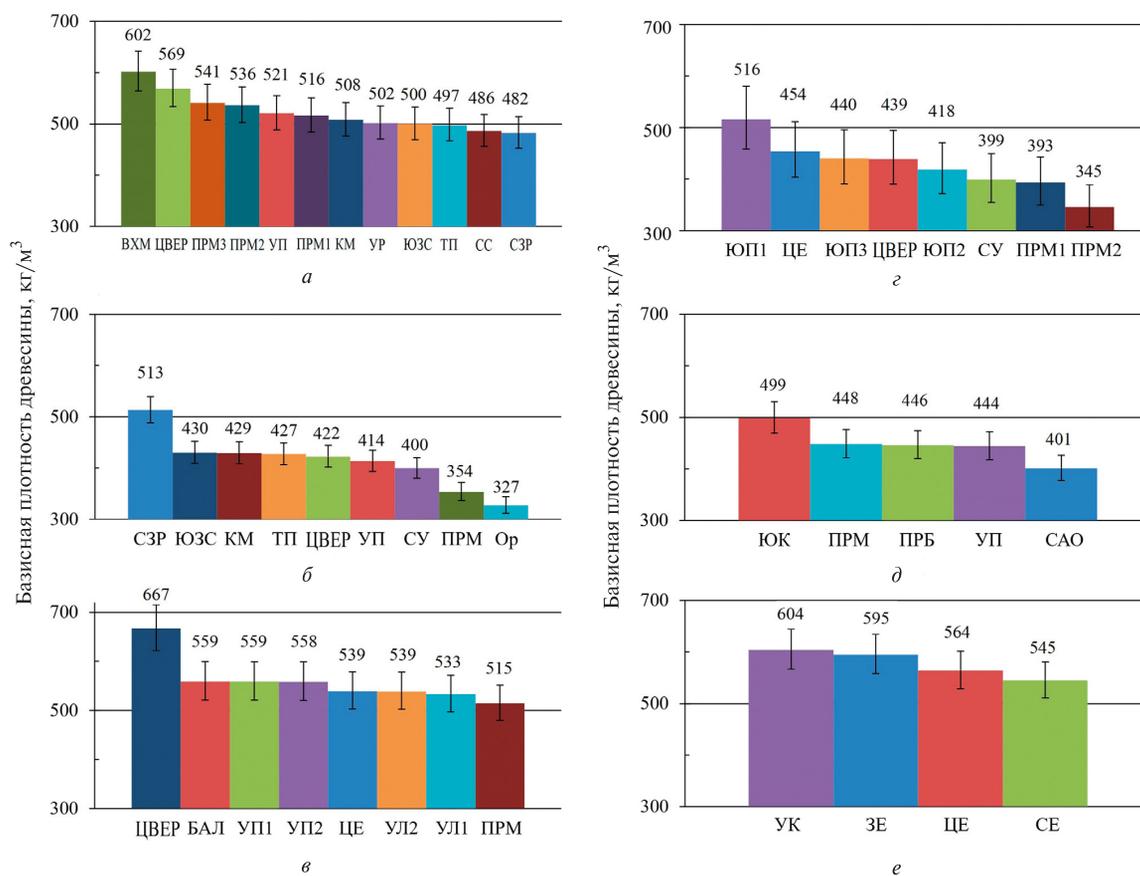


Рис. 1. Ранжирование принятых в табл. 1 кластеров по значению БП стволовой древесины в коре в убывающей последовательности для четырех родов и одного вида (кодировку кластеров см. в табл. 1): а — *Betula* L.; б — *Populus* L.; в — *Quercus* L.; г — *Tilia* L.; д — *Alnus* Gaertn.; е — *Fagus sylvatica* L.

Fig. 1. Ranking of clusters based on the value of trunk timber basic density in bark in descending order for four genera and one species (see Table 1 for cluster coding): а — *Betula* L.; б — *Populus* L.; в — *Quercus* L.; г — *Tilia* L.; д — *Alnus* Gaertn.; е — *Fagus sylvatica* L.

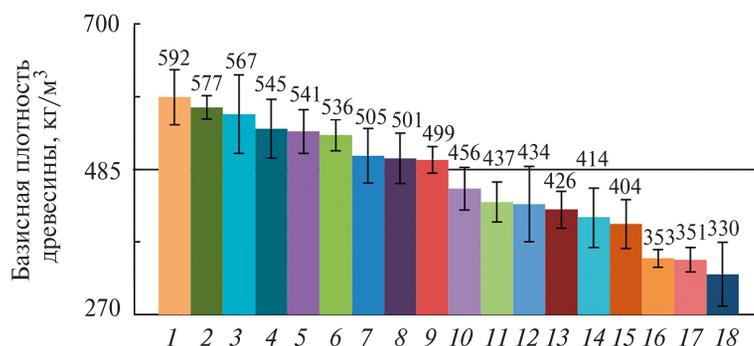


Рис. 2. Диаграмма распределения 18 лесообразующих видов Евразии по значению БП стволовой древесины в коре: 1 — *Fagus sylvatica* L.; 2 — *Quercus longipes* Stev.; 3 — *Betula platyphylla* Suk.; 4 — *Quercus robur* L.; 5 — *Betula dahurica* Pall.; 6 — *Betula costata* Trautv.; 7 — *Betula pendula* Roth.; 8 — *Quercus mongolica* F. ex L.; 9 — *Betula pubescens* Ehrh.; 10 — *Alnus hirsute* (Spach) T. ex R.; 11 — *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 12 — *Tilia cordata* Mill.; 13 — *Populus tremula* L.; 14 — *Alnus incana* (L.) Moench.; 15 — *Tilia amurensis* Rupr.; 16 — *Populus davidiana* Dode; 17 — *Tilia mandshurica* Rupr. & Maxim.; 18 — *Populus nigra* L.

Fig. 2. Diagram of distribution of 18 forest-forming species of Eurasia by the value of trunk timber basic density in bark: 1 — *Fagus sylvatica* L.; 2 — *Quercus longipes* Stev.; 3 — *Betula platyphylla* Suk.; 4 — *Quercus robur* L.; 5 — *Betula dahurica* Pall.; 6 — *Betula costata* Trautv.; 7 — *Betula pendula* Roth.; 8 — *Quercus mongolica* F. ex L.; 9 — *Betula pubescens* Ehrh.; 10 — *Alnus hirsute* (Spach) T. ex R.; 11 — *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 12 — *Tilia cordata* Mill.; 13 — *Populus tremula* L.; 14 — *Alnus incana* (L.) Moench.; 15 — *Tilia amurensis* Rupr.; 16 — *Populus davidiana* Dode; 17 — *Tilia mandshurica* Rupr. & Maxim.; 18 — *Populus nigra* L.

У рода *Quercus* максимальное значение БП древесины приходится на дуб черешчатый с ареалом на Восточно-Европейской (Русской) равнине (667 кг/м^3) и минимальное — на дуб монгольский в Приморье (515 кг/м^3). При этом на основной части ряда распределения изменение БП древесины небольшое, а именно: от 559 кг/м^3 у дуба длинноножкового на Балканах до 533 кг/м^3 у дуба черешчатого в украинской лесостепи.

У рода *Tilia* максимальное значение БП древесины приходится на липу мелколистную в южных районах Предуралья (516 кг/м^3) и минимальное — на липу маньчжурскую в Приморье (345 кг/м^3), у рода *Alnus* — на ольху серую соответственно в Южной Карелии (499 кг/м^3) и на севере Архангельской области (401 кг/м^3), у бука лесного диапазон БП древесины в ряду распределения по четырем кластерам сравнительно небольшой: от 604 кг/м^3 в Украинских Карпатах до 545 кг/м^3 в Северной Европе.

Территориально выделенные кластеры заполнены фактическими данными БП древесины по видам неравномерно и крайне недостаточно, а представленные ранжирования характеризуются множеством «белых пятен». Для заполнения этих «белых пятен» при оценках фитомассы стволовой древесины в коре на соответствующих пробных площадях приводится ранжирование средних видоспецифичных значений БП древесины (рис. 2).

Это второе ранжирование выполнено на уровне видов, когда данные всех регионов и происхождения объединены в пределах вида. Результаты ранжирования (см. рис. 2) показывают, что наибольшим значением БП древесины характеризуется бук лесной (592 кг/м^3) и наименьшим — тополь черный (330 кг/м^3).

Выводы

Разработаны регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре, специфичные по кластерам, представляющим регионы в пределах рода, виды и происхождения в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование кластеров по БП древесины стволов при условии их равенства по возрасту деревьев (за исключением родов *Betula* и *Populus*, у которых возраст дерева в моделях статистически незначим).

Выполнены два ранжирования по значению БП запаса стволовой древесины в коре, а именно ранжирование кластеров в пределах рода (для бука лесного — в пределах вида) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется бук лесной и минимальным — тополь черный.

Полученные модели и ранжирования видов по значению БП запаса стволовой древесины в коре

могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Список литературы

- [1] Augustine S.P., Bailey-Marren I., Charton K.T., Kiel N.G., Peyton M.S. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research // *Global Change Biology*, 2024, v. 30, article e17116. <https://doi.org/10.1111/gcb.17116>
- [2] Gallagher R.V., Falster D.S., Maitner B.S., Salguero-Gómez R., Vandvik V., Pearse W.D., Schneider F.D., Kattge J., Poelen J.H., Madin J.S., Ankenbrand M.J., Penone C., Feng X., Adams V.M., Alroy J., Andrew S.C., Balk M.A., Bland L.M., Boyle B.L., Enquist B.J. Open science principles for accelerating trait-based science across the tree of life // *Nature Ecology & Evolution*, 2020, v. 4, pp. 294–303. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1109-6>
- [3] Wüest R.O., Zimmermann N.E., Zurell D., Alexander J.M., Fritz S.A., Hof C., Krefl H., Normand S., Cabral J.S., Szekely E., Thuiller W., Wikelski M., Karger D.N. Macroecology in the age of big data — Where to go from here? // *J. of Biogeography*, 2020, v. 47, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1111/jbi.13633>
- [4] Kattge J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., Tautenhahn S., Werner G.D.A., Aakala T., Abedi N., Acosta A.T.R., Adamidis G.C., Adamson K., Aiba M., Albert C.H., Alcantara J.M., Carolina Alcazar C., Aleixo I., Ali H., Wirth C. TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access // *Global Change Biology*, 2020, v. 26, no. 1, pp. 119–188. DOI: 10.1111/gcb.14904
- [5] Petráš R., Mecko J., Krupová D. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species // *Wood Research*, 2020, v. 65, no. 6, pp. 1001–1012. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012
- [6] Ashwath M.N., Sathish B.N., Deepthi Dechamma N.L., Devagiri G.M., Hegde R.K., Hareesh T.S. Geographic and within tree variation for wood properties in *Acrocarpus fraxinifolius* Wight and Arn. populations // *J. of Scientific & Industrial Research*, 2021, v. 80, pp. 1049–1055. DOI: 10.56042/jsir.v80i12.44915
- [7] McLean P. Wood properties and uses of Scots pine in Britain. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, 2019, 36 p.
- [8] Ребко С.В., Поплавская Л.Ф., Тулик П.В., Ермак И.Т., Боровик П.В., Мельник П.Г. Оценка динамики сохранности и радиального прироста климатических экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса*. Вологда, 2023. С. 453–456.
- [9] FAO, ITTO and United Nations. Forest product conversion factors. Rome, 2020, 70 p. <https://doi.org/10.4060/ca7952en>
- [10] Zhou L., Chen Z., Lundqvist S.-O., Olsson L., Grahn T., Karlsson B., Wu H.X., García-Gil M.R. Genetic analysis of wood quality traits in Norway spruce open-pollinated progenies and their parent plus trees at clonal archives and the evaluation of phenotypic selection of plus trees // *Canadian J. of Forest Research*, 2019, v. 49, no. 7, pp. 810–818. DOI: 10.1139/cjfr-2018-0117
- [11] Calleja-Rodríguez A., Pan J., Funda T., Chen Z.-Q., Baisson J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data // *BioRxiv*, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>

- [12] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*) // Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 5, pp. 500–509. DOI:10.1139/CJFR-2018-0445
- [13] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories // Heredity, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [14] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation // Silva Fennica, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [15] Arunkumar A.N., Chauhan S.S. Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus pellita* // Current Science, 2020, v. 118, no. 12, pp. 1953–1958.
- [16] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models // Tree Genetics and Genomes, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [17] Poorter L., Rozendaal D.M.A., Bongers F., Westoby M. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // Nature Ecology and Evolution, 2019, v. 3, pp. 928–934. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0882-6>
- [18] Giroud G., Schneider R., Fournier R.A., Luther J.E., Martin-Ducup O. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning // Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 6, pp. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342
- [19] Giagli K., Vavřík H., Fajstavr M., Černý J., Novosadová K., Martiník A. 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, v. 64, no. 6, pp. 1011–1022.
- [20] Chowdhury Q., Sarker S.K., Ali B., Imran I.H., Datta A., Leban J.-M. Accounting intra-tree radial wood density variation provides more accurate above ground mangrove biomass estimation in the Sundarbans // Research Square, 2024, pp. 1–26. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3505676/v1
- [21] Liepiņš J., Jaunslaviete I., Liepiņš K., Jansone L., Matisons R., Lazdiņš A., Jansons Ā. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests // Silva Fennica, 2023, v. 57, no. 3, article 23040. <https://doi.org/10.14214/sf.23040>
- [22] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // Forests, 2019, v. 10, article 728. DOI:10.3390/f10090728
- [23] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев. Методы неразрушающего контроля, база данных и ее приложения. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 186 с.
- [24] Medeiros D.T., Melo R.R., Cademartori P.H.G., Batista F.G., Mascarenhas A.R.P., Scatolino M.V., Hein P.R.G. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy // CERNE, 2023, v. 29, article 103262. DOI:10.1590/01047760202329013262
- [25] Giroud G., Defo M., Begin J. Determination of radial profiles of wood properties using a near infrared scanning system // J. of Near Infrared Spectroscopy, 2021, v. 29, no. 1, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1364/JNIRS.29.000024>
- [26] Rocha M.F.V., Veiga T.R.L.A., Soares B.C.D., de Araújo A.C.C., Carvalho A.M.M., Hein P.R.G. Do the growing conditions of trees influence the wood properties? // Floresta e Ambiente, 2019, v. 26, no. 3, article e20180353. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035318>
- [27] Kerfriden B., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density // Plant Ecology, 2021, v. 222, pp. 289–303. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01106-0>
- [28] Santos M.E.C., Melo R.R., Correia D., Sousa J.A., Santos A.M., Silva A.K.V., Paula E.A.O., Alves A.R., Scatolino M.V., Rusch F., Mascarenhas A.R.P., Pimenta A.S., Stangerlin D.M. Variation in the basic density of woods produced in the Brazilian semi-arid region subjected to different irrigation regimes // Forests, 2023, v. 14, article 2168. <https://doi.org/10.3390/f14112168>
- [29] Teegalapalli K., Pandey C.K., Osuri A.M., Ratnam J., Sankaran M. Understanding the variation in wood densities of trees and its implications for carbon assessments // BioRxiv, 2019, article 523480. <https://doi.org/10.1101/523480>
- [30] Усольцев В.А., Цепордей И.С., Шубаири С.О.Р., Дар Дж.А., Часовских В.П. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии // Эко-потенциал, 2018. № 1 (21). С. 27–47.
- [31] Цепордей И.С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии / под ред. В.А. Усольцева. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- [32] Syofyan L., Maideliza T., Syamsuardi, Mansyurdin. Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected *Fabaceae* trees in West Sumatra secondary forest, Indonesia // Int. Conf. on Basic Sciences and Its Applications, KnE Engineering, 2019, pp. 190–203. DOI:10.18502/keg.v1i2.4444
- [33] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев. Плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ; Ботанический сад УрО РАН, 2020. https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
- [34] Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Trees from different social classes of tree position in the stand // BioResources, 2021, v. 16, no. 4, pp. 7492–7508.
- [35] Vicentin P.G., Cambuim J., Florsheim S.M.B., de Moraes M.L.T., Longui E.L. Longitudinal variation of wood basic density and anatomy of *Curatella americana* L. // Scientific Electronic Archives, 2021, v. 14, no. 10, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.36560/141020211396>
- [36] Zhang S.Y., Ren H., Jiang Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*) // J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 30. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9>
- [37] Dobrowolska E., Wroniszewska P., Jankowska A. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth) // Forests, 2020, v. 11, article 445. DOI:10.3390/f11040445
- [38] Erdene-Ochir T., Ishiguri F., Nezu I., Tumenjargal B., Baasan B., Chultem G., Ohshima J., Yokota S. Modeling of radial variations of wood properties in naturally regenerated trees of *Betula platyphylla* grown in Selenge, Mongolia // J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 61. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01993-5>

- [39] Wentzel M., Pesenti H., Droppelmann F., Roller A. Thinning wood properties of *Nothofagus alpina* under three different silvicultural conditions // Maderas. Ciencia y Tecnología, 2024, v. 26, article 7. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.07>
- [40] Cahuana L.A.P., Piña E.A.G., Tuesta G.P., Tomazello-Filho M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru // CERNE, 2023, v. 29, article e-103143. DOI: 10.1590/01047760202329013143
- [41] Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J., Bardule A., Jansone L., Jansons A. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder // Forests, 2023, v. 14, article 135. <https://doi.org/10.3390/f14010135>
- [42] Riki J.T.B., Adeyemo S.M., Majekobaje A.R., Oyelere A.T., Oluwadare A.O. Density variation in axial and radial positions of Caribbean pine (*Pinus Caribaea* Morelet) grown in Afaka, Nigeria // J. of Agriculture and Environment, 2019, v. 15, no. 2, pp. 163–171.
- [43] Demol M., Calders K., Krishna Moorthy S.M., van den Bulcke J., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning // Trees – Structure and Function, 2021, v. 35, pp. 671–684. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [44] Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y., Wessels B.C., Plessis M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood // J. of Forestry Research, 2021, v. 32, pp. 503–512. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>
- [45] Ribeiro M.D.S.B., Rodrigues S.A., Ballarin A.W. Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in *Eucalyptus* spp. // Canadian J. of Forest Research, 2020, v. 50, no. 2, pp. 193–202. <http://hdl.handle.net/11449/201527>
- [46] Repola J., Lindblad J., Heikkinen J. Pulpwood green density prediction models and sampling-based calibration // Silva Fennica, 2021, v. 55, no. 4, article 10539. <https://doi.org/10.14214/sf.10539>
- [47] Baez S., Fadrique B., Feeley K., Homeier J. Changes in tree functional composition across topographic gradients and through time in a tropical montane forest // PLoS ONE, 2022, v. 17, no. 4, article e0263508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263508>
- [48] Que Q., Ouyang K., Li C., Li B., Song H., Li P., Pian R., Li H., Chen X., Peng C. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China // Forestry Research, 2022, v. 2, article 12. <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0012>
- [49] Bouslimi B., Koubaa A., Bergeron Y. Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec forest // Forests, 2022, v. 13, article 1984. <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [50] Shchekalev R.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Korchagov S.A., Melekov V.I. Variation of physical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* L. wood in the boreal zone of the European Northeast // South-East European Forestry, 2023, v. 14, no. 2, pp. 197–213. <https://doi.org/10.15177/seeefor.23-18>
- [51] Vaughan D., Auty D., Kolb T.E., Meador A.J.S., Mackes K.H., Dahlen J., Moser W.K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA // Annals of Forest Science, 2019, v. 76, no. 3, article 85. DOI: 10.1007/s13595-019-0869-0
- [52] Wylie R.R.M., Woods M.E., Dech J.P. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario // Remote Sensing, 2019, v. 11, article 2022. DOI: 10.3390/rs11172022
- [53] Šilinskas B., Varnagirytė-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušiene L., Aleinikoviene J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities // Forests, 2020, v. 11, no. 5, article 587. DOI: 10.3390/F11050587
- [54] Balasso M., Hunt M., Jacobs A., O'Reilly-Wapstra J. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics // Forest Ecology and Management, 2021, v. 491, article 118992. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118992>
- [55] Tonouewa J.F.M.F., Biaou S.S.H., Assede E.S.P., Langbour P., Balagueman O.R. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis* // Maderas. Ciencia y Tecnología, 2022, v. 24, article 19. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100419>
- [56] Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z., Carvalhais N. 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>
- [57] Marden M., Lambie S., Burrows L. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand // New Zealand J. of Forestry Science, 2021, v. 51, article 1. <https://doi.org/10.33494/nzjfs12021x121x>
- [58] Magalhães T.M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebombo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain) // New Zealand J. of Forestry Science, 2021, v. 51, article 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs12021x32x>
- [59] Kowaluk G., Szymanowski K., Kozłowski P., Kukula W., Sala C., Robles E., Czarniak P. Functional assessment of particleboards made of apple and plum orchard pruning // Waste and Biomass Valorization, 2020, v. 11, pp. 2877–2886. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00568-8>
- [60] Yoshioka T. Current situation and future outlook of forest biomass production and its utilization in Japan // Biotechnological Applications of Biomass / Eds. T.P. Basso, T.O. Basso, L.C. Basso. London: IntechOpen, 2021, pp. 129–147. DOI: 10.5772/intechopen.93433
- [61] Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Екатеринбург: Изд-во Ботанического сада УрО РАН; УГЛТУ, 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>
- [62] Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- [63] Карабан А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ольхи серой и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хозяйство в них, 2023, № 2. С. 42–50. DOI: 10.51318/FRET.2023.36.20.005.
- [64] Usoltsev V.A., Shobairi O., Tsepordey I.S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest // Ecological Questions, 2021, v. 32, no. 1, pp. 29–36. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.003>

Сведения об авторах

Усольцев Владимир Андреевич [✉] — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Usoltsev50@mail.ru

Плюха Николай Иванович — аспирант кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», nikcskript@mail.ru

Цепордей Иван Степанович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 22.08.2024.

Принята к публикации 06.09.2024.

REGIONAL FEATURES OF HARDWOODS TRUNK TIMBER STOCK BASIC DENSITY IN BARK WITHIN EURASIA

V.A. Usoltsev^{1,2✉}, N.I. Plyukha¹, I.S. Tsepordey²

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Siberian tract, 620100, Yekaterinburg, Russia

²Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

Usoltsev50@mail.ru

This study analyzes the regional characteristics of the trunk timber stock basic density in the bark of deciduous tree species growing in Eurasia. Being based on the data obtained from 2741 trees from six deciduous tree genera (species) growing in Eurasia, regression models of a mixed type have been developed for the trunk timber stock basic density, specific for clusters representing regions within the genus, species and origin of stands within the region. The structure of a mixed type model makes it possible to rank clusters according to the trunk timber stock basic bark density, provided that they are equal in age of trees (with the exception of the genera *Betula* and *Populus*, in which the age of the tree in the models is statistically insignificant). Two rankings were made according to the value of the trunk timber stock basic density in the bark, namely, the ranking of clusters within the genus (for European Beech — within the species) and species — specific ranking, according to which the maximum value is characterized by forest beech and the minimum is Black Poplar. The obtained models and the ranking of species by the value of the trunk timber stock basic density in the bark can be used to calculate the carbon pool in deciduous stands according to the forest inventory data.

Keywords: Forest-forming species of Eurasia, trunk timber stock basic density in the bark, regression models of mixed type, species ranking

Suggested citation: Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S. *Regional'nye osobennosti bazisnoy plotnosti zapasa stvolovoy drevesiny v kore u listvennykh drevesnykh vidov Evrazii* [Regional features of hardwoods trunk timber stock basic density in bark within Eurasia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 5–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-5-18

References

- [1] Augustine S.P., Bailey-Marren I., Charton K.T., Kiel N.G., Peyton M.S. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research. *Global Change Biology*, 2024, v. 30, article e17116. <https://doi.org/10.1111/gcb.17116>
- [2] Gallagher R.V., Falster D.S., Maitner B.S., Salguero-Gómez R., Vandvik V., Pearse W.D., Schneider F.D., Kattge J., Poelen J.H., Madin J.S., Ankenbrand M.J., Penone C., Feng X., Adams V.M., Alroy J., Andrew S.C., Balk M.A., Bland L.M., Boyle B.L., Enquist B.J. Open science principles for accelerating trait-based science across the tree of life. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, v. 4, pp. 294–303. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1109-6>
- [3] Wüest R.O., Zimmermann N.E., Zurell D., Alexander J.M., Fritz S.A., Hof C., Kreft H., Normand S., Cabral J.S., Szekely E., Thuiller W., Wikelski M., Karger D.N. Macroecology in the age of big data — Where to go from here?. *J. of Biogeography*, 2020, v. 47, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1111/jbi.13633>
- [4] Kattge J., Bönnisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., Tautenhahn S., Werner G.D.A., Aakala T., Abedi N., Acosta A.T.R., Adamidis G.C., Adamson K., Aiba M., Albert C.H., Alcantara J.M., Carolina Alcazar C., Aleixo I., Ali H., Wirth C. TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access. *Global Change Biology*, 2020, v. 26, no. 1, pp. 119–188. DOI: 10.1111/gcb.14904
- [5] Petráš R., Mecko J., Krupová D. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species. *Wood Research*, 2020, v. 65, no. 6, pp. 1001–1012. DOI:10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012
- [6] Ashwath M.N., Sathish B.N., Deepthi Dechamma N.L., Devagiri G.M., Hegde R.K., Hareesh T.S. Geographic and within tree variation for wood properties in *Acrocarpus fraxinifolius* Wight and Arn. populations. *J. of Scientific & Industrial Research*, 2021, v. 80, pp. 1049–1055. DOI: 10.56042/jsir.v80i12.44915

- [7] McLean P. Wood properties and uses of Scots pine in Britain. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, 2019, 36 p.
- [8] Rebko S.V., Poplavskaya L.F., Tupik P.V., Ermak I.T., Borovik P.V., Mel'nik P.G. *Otsenka dinamiki sokhrannosti i radial'nogo prirosta klimaticheskikh ekotipov sosny obyknovenny v geograficheskikh lesnykh kul'turakh* [Assessment of the dynamics of preservation and radial growth of climatic ecotypes of Scots pine in geographical forest cultures]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa [Current problems of development of the forest complex]. Vologda, 2023, pp. 453–456.
- [9] FAO, ITTO and United Nations. Forest product conversion factors. Rome, 2020, 70 p. <https://doi.org/10.4060/ca7952en>
- [10] Zhou L., Chen Z., Lundqvist S.-O., Olsson L., Grahn T., Karlsson B., Wu H.X., Garcia-Gil M.R. Genetic analysis of wood quality traits in Norway spruce open-pollinated progenies and their parent plus trees at clonal archives and the evaluation of phenotypic selection of plus trees. Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 7, pp. 810–818. DOI:10.1139/cjfr-2018-0117
- [11] Calleja-Rodriguez A., Pan J., Funda T., Chen Z.-Q., Baison J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data. BioRxiv, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>
- [12] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*). Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 5, pp. 500–509. DOI:10.1139/CJFR-2018-0445
- [13] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories. Heredity, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [14] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation. Silva Fennica, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [15] Arunkumar A.N., Chauhan S.S. Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus pellita*. Current Science, 2020, v. 118, no. 12, pp. 1953–1958.
- [16] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models. Tree Genetics and Genomes, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [17] Poorter L., Rozendaal D.M.A., Bongers F., Westoby M. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time. Nature Ecology and Evolution, 2019, v. 3, pp. 928–934. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0882-6>
- [18] Giroud G., Schneider R., Fournier R.A., Luther J.E., Martin-Ducup O. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning. Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 6, pp. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342
- [19] Giagli K., Vavřík H., Fajstavr M., Černý J., Novosadová K., Martiník A. 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, v. 64, no. 6, pp. 1011–1022.
- [20] Chowdhury Q., Sarker S.K., Ali B., Imran I.H., Datta A., Leban J.-M. Accounting intra-tree radial wood density variation provides more accurate above ground mangrove biomass estimation in the Sundarbans. Research Square, 2024, pp. 1–26. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3505676/v1
- [21] Liepiņš J., Jaunslaviete I., Liepiņš K., Jansone L., Matisons R., Lazdiņš A., Jansons Ā. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests. Silva Fennica, 2023, v. 57, no. 3, article 23040. <https://doi.org/10.14214/sf.23040>
- [22] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. Forests, 2019, v. 10, article 728. DOI:10.3390/f10090728
- [23] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Kvalimetriya fitomassy lesnykh dereviev: metody nerazrushayushchego kontrolya, baza dannykh i ee prilozheniya* [Qualimetry of phytomass of forest trees. Non-destructive testing methods, database and its applications]. Yekaterinburg: UGLTU, 2023, 186 p.
- [24] Medeiros D.T., Melo R.R., Cademartori P.H.G., Batista F.G., Mascarenhas A.R.P., Scatolino M.V., Hein P.R.G. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy. CERNE, 2023, v. 29, article 103262. DOI:10.1590/01047760202329013262
- [25] Giroud G., Defo M., Begin J. Determination of radial profiles of wood properties using a near infrared scanning system. J. of Near Infrared Spectroscopy, 2021, v. 29, no. 1, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1364/JNIRS.29.000024>
- [26] Rocha M.F.V., Veiga T.R.L.A., Soares B.C.D., de Araújo A.C.C., Carvalho A.M.M., Hein P.R.G. Do the growing conditions of trees influence the wood properties?. Floresta e Ambiente, 2019, v. 26, no. 3, article e20180353. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035318>
- [27] Kerfriden B., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density. Plant Ecology, 2021, v. 222, pp. 289–303. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01106-0>
- [28] Santos M.E.C., Melo R.R., Correia D., Sousa J.A., Santos A.M., Silva A.K.V., Paula E.A.O., Alves A.R., Scatolino M.V., Rusch F., Mascarenhas A.R.P., Pimenta A.S., Stangerlin D.M. Variation in the basic density of woods produced in the Brazilian semiarid region subjected to different irrigation regimes. Forests, 2023, v. 14, article 2168. <https://doi.org/10.3390/f14112168>
- [29] Teegalapalli K., Pandey C.K., Osuri A.M., Ratnam J., Sankaran M. Understanding the variation in wood densities of trees and its implications for carbon assessments. BioRxiv, 2019, article 523480. <https://doi.org/10.1101/523480>
- [30] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Shubairi S.O.R., Dar Dzh.A., Chasovskikh V.P. *Additivnye allometricheskie modeli fitomassy derev'ev i drevostoev dvukhvoynykh sosen kak osnova regional'nykh taksatsionnykh normativov dlya Evrazii* [Additive allometric models of phytomass of trees and stands of double-leaved pines as the basis of regional taxation standards for Eurasia]. Eco-potential, 2018, no. 1 (21), pp. 27–47.

- [31] Tsepordey I.S. *Biologicheskaya produktivnost' lesobrazuyushchikh vidov v klimaticheskoy kontekste Evrazii* [Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia]. Ed. V.A. Usoltsev. Yekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2023, 467 p. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- [32] Syofyan L., Maideliza T., Syamsuardi, Mansyurdin. Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected *Fabaceae* trees in West Sumatra secondary forest, Indonesia. International Conference on Basic Sciences and Its Applications, KnE Engineering, 2019, pp. 190–203. DOI:10.18502/keg.v1i2.4444
- [33] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Kvalimetriya fitomassy lesnykh dereviev: plotnost' i sodержanie sukhogo veshchestva* [Qualimetry of forest tree biomass: density and dry matter content]. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
- [34] Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Trees from different social classes of tree position in the stand. BioResources, 2021, v. 16, no. 4, pp. 7492–7508.
- [35] Vicentin P.G., Cambuim J., Florsheim S.M.B., de Moraes M.L.T., Longui E.L. Longitudinal variation of wood basic density and anatomy of *Curatella americana* L. Scientific Electronic Archives, 2021, v. 14, no. 10, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.36560/141020211396>
- [36] Zhang S.Y., Ren H., Jiang Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 30. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9>
- [37] Dobrowolska E., Wroniszewska P., Jankowska A. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth). Forests, 2020, v. 11, article 445. DOI:10.3390/f11040445
- [38] Erdene-Ochir T., Ishiguri F., Nezu I., Tumenjargal B., Baasan B., Chulthem G., Ohshima J., Yokota S. Modeling of radial variations of wood properties in naturally regenerated trees of *Betula platyphylla* grown in Selenge, Mongolia. J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 61. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01993-5>
- [39] Wentzel M., Pesenti H., Droppelmann F., Rolleri A. Thinning wood properties of *Nothofagus alpina* under three different silvicultural conditions. Maderas. Ciencia y Tecnología, 2024, v. 26, article 7. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.07>
- [40] Cahuana L.A.P., Piña E.A.G., Tuesta G.P., Tomazello-Filho M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru. CERNE, 2023, v. 29, article e-103143. DOI: 10.1590/01047760202329013143
- [41] Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J., Bardule A., Jansone L., Jansons A. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder. Forests, 2023, v. 14, article 135. <https://doi.org/10.3390/f14010135>
- [42] Riki J.T.B., Adeyemo S.M., Majekobaje A.R., Oyelere A.T., Oluwadare A.O. Density variation in axial and radial positions of Caribbean pine (*Pinus Caribaea* Morelet) grown in Afaka, Nigeria. J. of Agriculture and Environment, 2019, v. 15, no. 2, pp. 163–171.
- [43] Demol M., Calders K., Krishna Moorthy S.M., van den Bulcke J., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning. Trees – Structure and Function, 2021, v. 35, pp. 671–684. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [44] Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y., Wessels B.C., Plessis M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. J. of Forestry Research, 2021, v. 32, pp. 503–512. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>
- [45] Ribeiro M.D.S.B., Rodrigues S.A., Ballarin A.W. Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in *Eucalyptus* spp. Canadian J. of Forest Research, 2020, v. 50, no. 2, pp. 193–202. <http://hdl.handle.net/11449/201527>
- [46] Repola J., Lindblad J., Heikkinen J. Pulpwood green density prediction models and sampling-based calibration. Silva Fennica, 2021, v. 55, no. 4, article 10539. <https://doi.org/10.14214/sf.10539>
- [47] Baez S., Fadrique B., Feeley K., Homeier J. Changes in tree functional composition across topographic gradients and through time in a tropical montane forest. PLoS ONE, 2022, v. 17, no. 4, article e0263508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263508>
- [48] Que Q., Ouyang K., Li C., Li B., Song H., Li P., Pian R., Li H., Chen X., Peng C. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China. Forestry Research, 2022, v. 2, article 12. <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0012>
- [49] Bouslimi B., Koubaa A., Bergeron Y. Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec forest. Forests, 2022, v. 13, article 1984. <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [50] Shchekalev R.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Korchagov S.A., Melekov V.I. Variation of physical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* L. wood in the boreal zone of the European Northeast. South-East European Forestry, 2023, v. 14, no. 2, pp. 197–213. <https://doi.org/10.15177/seefer.23-18>
- [51] Vaughan D., Auty D., Kolb T.E., Meador A.J.S., Mackes K.H., Dahlen J., Moser W.K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA. Annals of Forest Science, 2019, v. 76, no. 3, article 85. DOI: 10.1007/s13595-019-0869-0
- [52] Wylie R.R.M., Woods M.E., Dech J.P. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario. Remote Sensing, 2019, v. 11, article 2022. DOI: 10.3390/rs11172022
- [53] Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušiene L., Aleinikoviene J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities. Forests, 2020, v. 11, no. 5, article 587. DOI: 10.3390/F11050587
- [54] Balasso M., Hunt M., Jacobs A., O'Reilly-Wapstra J. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics. Forest Ecology and Management, 2021, v. 491, article 118992. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118992>
- [55] Tonouewa J.F.M.F., Biaou S.S.H., Assede E.S.P., Langbour P., Balagueman O.R. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis*. Maderas. Ciencia y Tecnología, 2022, v. 24, article 19. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100419>
- [56] Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z., Carvalhais N. 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>
- [57] Marden M., Lambie S., Burrows L. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand. New Zealand J. of Forestry Science, 2021, v. 51, article 1. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x121x>

- [58] Magalhães T.M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebombo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain). *New Zealand J. of Forestry Science*, 2021, v. 51, article 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x32x>
- [59] Kowaluk G., Szymanowski K., Kozłowski P., Kukula W., Sala C., Robles E., Czarniak P. Functional assessment of particleboards made of apple and plum orchard pruning // *Waste and Biomass Valorization*, 2020, v. 11, pp. 2877–2886. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00568-8>
- [60] Yoshioka T. Current situation and future outlook of forest biomass production and its utilization in Japan. *Biotechnological Applications of Biomass* / Eds. T.P. Basso, T.O. Basso, L.C. Basso. London: IntechOpen, 2021, pp. 129–147. DOI: 10.5772/intechopen.93433
- [61] Usoltsev V.A. *Fitomassa model'nykh dereviev dlya distantsionnoy i nazemnoy taksatsii lesov Evrazii* [Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests]. Yekaterinburg: Botanical Garden of Ural Branch of RAS, Ural State Forest Engineering University, 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>
- [62] Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- [63] Karaban A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. *Biomassa dereviev ol'khi seroy i ee allometricheskie modeli v usloviyakh Arkhangel'skoy oblasti* [Biomass of gray alder trees and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2023, no. 2, pp. 42–50. DOI: 10.51318/FRET.2023.36.20.005
- [64] Usoltsev V.A., Shobairi O., Tsepordey I.S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest. *Ecological Questions*, 2021, v. 32, no. 1, pp. 29–36. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.003>

Authors' information

Usoltsev Vladimir Andreevich  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Leader Resercher of the Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, Professor of the Ural State Forestry Engineering University, Usoltsev50@mail.ru

Plyukha Nikolay Ivanovich — pg. of the Ural State Forestry Engineering University, nikcskript@mail.ru

Tsepordey Ivan Stepanovich — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Resercher of the Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ivan.tsepordey@yandex.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 22.08.2024.

Accepted for publication 06.09.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest