

Агроэкологическое региональное ранжирование базисной плотности запаса стволовой древесины у хвойных древесных видов Евразии

Владимир Андреевич Усольцев

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник
Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук
Екатеринбург, Россия
Профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства
Уральский государственный лесотехнический университет
Екатеринбург, Россия
Usoltsev50@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Николай Иванович Плюха

Аспирант
Уральский государственный лесотехнический университет
Екатеринбург, Россия
nikcskript@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Иван Степанович Цепордей

Доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук
Екатеринбург, Россия
ivan.tsepordey@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Виктор Петрович Часовских

Доктор технических наук., профессор кафедры Шахматного искусства и компьютерной математики
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия
u2007u@ya.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Елена Викторовна Кох

Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Шахматного искусства и компьютерной математики
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия
elenakox@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 04.11.2023

Принята 29.12.2023

Опубликована 28.02.2024

УДК 630*232.3(4)

EDN JZJFKG

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

В исследованиях углеродного цикла и экологии растений полезным показателем является базисная плотность древесины (БП) (basic density) как отношение массы в абсолютно сухом состоянии (при влажности 0 %) к «зеленому» объему (объему древесины в состоянии насыщения водой). Данные о БП древесины большинства видов в пределах региона часто недоступны, и используются средние значения на уровне родов или семейств. Однако может наблюдаться значительная филогенетическая и географическая изменчивость БП, и использование ее средних значений на уровне рода возможно лишь при отсутствии региональных данных. Практически все опубликованные данные содержат информацию о БП собственно древесины, без учета коры. Если необходимо рассчитать биомассу стволов в коре по имеющимся данным объемов на основе БП, различающейся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры, а оно различается существенно. Наличие огромных массивов данных о запасах стволовой древесины, накопленных традиционной лесной таксацией, дает возможность оценивать абсолютно сухую биомассу стволов в коре на больших площадях, используя известные значения БП стволов. Цель наших исследований состояла в анализе региональных особенностей БП стволов в коре у хвойных древесных видов Евразии. Используя авторскую базу данных о квалитетрии деревьев лесообразующих видов Евразии, сформирована выборка 3220 деревьев пяти хвойных древесных родов (подродов) Евразии. Применена структура модели смешанного типа, включающая в себя численные (возраст и диаметр ствола) и фиктивные переменные, кодирующие географические регионы. Выполнены два ранжирования по величине БП стволов в коре, а именно, ранжирование кластеров в пределах рода (для 5-хвойных сосен - в пределах подрода) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется ель восточная и минимальным – ель аянская. Полученные модели и ранжирования видов по величине БП стволов в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в хвойных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Ключевые слова

роды *Pinus* L., *Larix* Mill., *Picea* L., *Abies* Mill., подрод *Harpoxylon*, базисная плотность стволов, региональные особенности, регрессионные модели.

Введение

Углерод депонирующая способность лесов имеет важное значение при оценке их роли в стабилизации климата. Поскольку основная масса углерода депонируется в стволах деревьев, точная оценка их биомассы и углерода имеет преобладающее значение. При этом важную роль играет базисная плотность (БП) как отношение абсолютно сухой массы ствола к его объему в свежем состоянии. БП стволовой древесины является одним из основных источников варьирования при оценках биомассы, в расчетах темпов связывания углерода и тесно коррелирует с ключевыми аспектами физиологических характеристик дерева (Holdaway, 2014; MacFarlane, 2020).

Во всех современных исследованиях оценивалась БП собственно древесины, без учета коры (Billard, 2020; McKinley, 2020; Marden, 2021), за исключением лишь одной работы (Nygard, 2000). В литературных источниках показатели БП древесины и коры анализируются отдельно, причем они различаются существенно (Sagang, 2018; Усольцев, 2022). Однако современные таксационные нормативы часто оценивают объемы ствола и запасы стволовой древесины вместе с корой. Если необходимо рассчитать биомассу стволов в коре по имеющимся данным объемов на основе БП, различающейся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры. Между тем доля коры в массе ствола может варьировать от 9 до 53 % (Nygard, 2000). Наличие огромных массивов данных о запасах стволовой древесины в коре, накопленных традиционной лесной таксацией, дает возможность оценивать абсолютно сухую биомассу стволов в коре на больших площадях,

используя известные значения БП стволов на уровне древостоя. При этом, насколько нам известно, исследования БП стволов в коре для различных древесных видов Евразии в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы был анализ региональных особенностей БП запаса стволовой древесины в коре у хвойных древесных видов Евразии.

Для ее реализации были поставлены задачи:

- разработать регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре, специфичные по регионам и древесным видам;
- выполнить ранжирование древесных видов Евразии по величине БП стволовых запасов по регионам и древесным видам.

Материалы и методы исследования

Источником исходных материалов для регрессионного моделирования послужила база данных о биомассе и первичной продукции лесов Евразии (Усольцев, 2023). Сформирована выборка из 4593 древостоев пяти хвойных древесных родов (подродов) (табл. 1).

Для обеспечения сопоставимости регионов и древесных видов при их ранжировании по величине БП мы применили структуру модели смешанного типа (Li, Zhang, 2010), включающую в себя численные (возраст и число стволов на 1 га) и фиктивные переменные, кодирующие наши регионы (табл. 2). Тем самым сопоставление выполняется для древостоев, одинаковых по густоте и возрасту. В отличие от остальных четырех родов, в группу пихт мы включили не только виды рода *Abies* Mill. но также пихту Дугласову (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) и пихту китайскую (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) (Li, Zhang, 2010).

В итоге мы приняли следующую структуру регрессионной модели:

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(N) + \sum a_i X_i$$

где BD – базисная плотность (БП) ствола в коре, кг/м^3 ; A – возраст древостоя, лет; N – число стволов на га, тыс. экз.; $\sum a_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве ($\neq 1$); a_0 – свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных. Мы не делим исходные данные в пределах региона по происхождению древостоев, поскольку естественные древостои и культуры различаются густотой, а она включена в модель (1) в качестве независимой переменной.

Таблица 1. Распределение 4593 измерений БП стволов в коре по регионам и видам с характеристикой исходных данных
2-хвойные сосны. Подрод *Pinus* L. (2630 пробных площадей в 22 регионах)

Кластеры (регионы)	Вид	Код**	Число пробных площадей	Диапазоны				
				A, лет	N, 1000/га	БП, кг/м^3	Координаты	
							с. ш., °	в. д., °
Западная Европа	<i>Pinus sylvestris</i> L.	3E	45	3-80	0,36-58,0	377-714	42,3-57,6	-8,7-1,9
Центральная Европа	<i>P. sylvestris</i>	ЦЕ	105	7-120	0,22-12,4	223-619	43,0-59,3	4,5-27,5
Восточная Европа	<i>P. sylvestris</i>	ВЕ	129	7-180	0,24-21,0	290-716	46,5-66,0	14,4-31,0
Беларусь	<i>P. sylvestris</i>	Бел	273	9-220	0,21-11,6	284-675	51,5-54,8	24,0-29,2
Украина 1	<i>P. sylvestris</i>	Ук1	402	6-175	0,11-14,2	260-714	48,0-52,1	24,0-37,5
Украина 2	<i>P. nigra</i> J.F.Arnold	Ук2	35	14-55	0,70-11,1	400-431	46,5-46,6	32,6-32,7
Кавказ	<i>P. sosnowskyi</i> Nakai	Кав	5	84-150	0,44-0,98	444-854	41,3-43,5	41,8-44,0

РФ, северо-запад	<i>P. sylvestris</i>	СЗР	270	14-210	0,30-23,2	307-794	59,7-68,0	29,8-45,0
РФ, центр Русской равнины	<i>P. sylvestris</i>	ЦРР	274	4-150	0,17-62,5	235-696	48,5-58,1	33,0-48,5
РФ, Оренбуржье	<i>P. sylvestris</i>	Ор	12	4-44	0,86-10,1	354-463	51,7-53,5	50,3-55,0
РФ, Крым	<i>P. pallasiana</i> Lamb.	Кр	17	11-72	0,27-6,8	379-469	44,6-45,2	33,4-35,1
РФ, Восток Русской равнины	<i>P. sylvestris</i>	ВРР	188	16-240	0,21-33,6	230-787	56,5-65,5	47,0-63,0
РФ, Урал	<i>P. sylvestris</i>	Ур	94	10-233	0,38-46,8	294-854	55,0-59,7	58,0-69,0
РФ, Западная Сибирь	<i>P. sylvestris</i>	ЗС	55	10-280	0,16-70,2	301-741	54,3-61,2	69,0-85,7
РФ, Средняя Сибирь	<i>P. sylvestris</i>	СС	181	10-383	0,11-94,6	312-687	51,2-66,0	87,0-102,5
РФ, Восточная Сибирь	<i>P. sylvestris</i>	ВС	58	21-300	0,14-7,9	301-593	51,0-62,3	102,0-130,0
Северный Казахстан	<i>P. sylvestris</i>	СК	173	5-120	0,17-82,4	294-627	49,0-53,2	64,0-83,5
Китай 1	<i>P. tabuliformis</i> Carr.	Кит1	162	15-95	0,15-8,5	230-686	32,6-42,6	103,8-129,5
Китай 2	<i>P. taiwanensis</i> Hayata	Кит2	55	16-160	0,18-6,2	272-523	24,9-36,4	85,2-119,3
Китай 3	<i>P. massoniana</i> Lamb.	Кит3	64	15-101	0,39-3,6	311-599	21,7-32,7	105,1-120,6
Япония 1	<i>P. densiflora</i> S.&Z.	Яп1	23	7-48	0,37-145,0	388-479	35,0-41,5	138,3-141,3
Япония 2	<i>P. thunbergii</i> Parl.	Яп2	10	10-14	2,5-27,6	430-576	35,0	136,0-139,0

Лиственницы. Род *Larix* Mill. (460 пробная площадь в 20 регионах)

Кластеры (регионы)	Вид	Код**	Число пробных площадей	Диапазоны				
				А, лет	N, 1000/га	БП, кг/м ³	Координаты	
							с. ш., °	в. д., °
Западная Европа	<i>Larix decidua</i> Mill.	ЗЕ	7	13-46	0,42-3,3	401-470	51,2-57,2	-2,2-0,9
Центральная Европа	<i>L. decidua</i>	ЦЕ	5	36-210	0,01-1,4	388-487	47,0-49,3	9,0-27,5
РФ, северо-запад	<i>L. sukaczewii</i> Dylis	СЗР	14	20-240	0,27-10,2	443-676	60,5-64,0	30,0-40,0
РФ, центр Русской равнины	<i>L. decidua</i>	ЦРР	24	10-100	0,43-122,5	478-611	51,0-58,1	36,3-50,3
РФ, восток Русской равнины	<i>L. sukaczewii</i>	ВРР	18	10-75	0,52-6,0	434-591	54,0-58,1	48,0-49,8

РФ, север Западной Сибири	<i>L. sibirica</i> Ledeb.	СЗС	19	25-350	0,05-10,7	437-551	61,0-67,0	63,0-78,0
РФ, Таймыр	<i>L. czekanovskii</i> Szafer	Тай	7	142-155	0,19-1,4	492-569	70,0-72,5	90,0-101,0
РФ, центр Средней Сибири	<i>L. czekanovskii</i>	ЦСС	62	30-380	0,17-5,7	411-627	57,2-68,0	87,0-103,0
РФ, юг Средней Сибири	<i>L. sibirica</i>	ЮСС	70	10-270	0,17-7,2	444-675	52,0-56,2	90,0-95,5
РФ, центр Восточной Сибири	<i>L. cajanderi</i> Mayr	ЦВС	35	14-380	0,45-112,0	416-627	60,3-63,0	118,0-145,0
РФ, юг Восточной Сибири	<i>L. czekanovskii</i>	ЮВС	33	40-160	0,02-4,7	428-797	51,0-57,7	105,5-126,0
РФ, север Дальнего Востока	<i>L. cajanderi</i>	СДВ	24	15-250	0,39-55,2	496-650	56,0-62,0	147,0-160,0
РФ, Приморье	<i>L. komarovii</i> Kolesn.	При	11	30-160	0,37-12,6	424-567	45,0-52,5	135,0-140,7
Северный Казахстан	<i>L. sibirica</i>	СК	10	40-41	0,81-24	393-489	52,9-53,2	63,8-64,1
Монголия	<i>L. czekanovskii</i>	Мон	8	16-250	0,361-54,5	424-719	47,5-49,2	100,0-110,0
Китай 1	<i>L. sibirica</i>	Кит1	9	30-177	1,0-9,4	405-456	42,8-48,1	86,9-93,1
Китай 2	<i>L. gmelinii</i> (Rupr.) Kuzen.	Кит2	75	21-195	0,21-15,8	366-788	42,2-52,7	119,0-131,8
Китай 3	<i>L. olgensis</i> A.Henry	Кит3	5	16-69	0,52-3,8	517-519	41,8-43,0	117,7-124,0
Китай 4	<i>L. Principis-Rupprechtii</i> Mayr	Кит4	14	16-193	0,37-2,7	410-658	28,6-39,2	99,2-113,6
Япония	<i>L. kaempferi</i> (Lamb.) Carrière	Яп	10	9-56	1,19-6,7	352-588	35,0-43,2	137,0-142,4

Ели. Род *Picea* L. (924 пробные площади в 22 регионах)

Кластеры (регионы)	Вид	Код**	Число пробных площадей	Диапазоны				
				А, лет	N, 1000/га	БП, кг/м ³	Координаты	
							с. ш., °	в. д., °
Западная Европа	<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr.	ЗЕ	15	9-92	0,47-3,8	368-512	41,7-57,2	-7,3-14,9
Центральная Европа	<i>P. abies</i> (L.) H. Karst.	ЦЕ	123	10-142	0,28-7,3	287-470	42,0-60,3	5,3-27,0
Восточная Европа	<i>P. abies</i>	ВЕ	55	10-250	0,23-80,0	299-563	48,6-66,4	12,5-29,3
Беларусь	<i>P. abies</i>	Бел	56	7-120	0,32-18,2	337-565	53,0-54,8	26,0-31,0
Украина	<i>P. abies</i>	Ук	67	5-140	0,24-16,7	296-570	48,0-49,2	20,5-24,8
Кавказ	<i>P. orientalis</i> (L.) Link	Кав	4	88-187	0,34-1,7	499-750	41,3-44,0	41,0-44,0
РФ, северо-запад	<i>P. abies</i>	СЗР	93	22-210	0,32-34,8	293-604	59,4-68,5	30,0-48,0

РФ, центр Русской равнины	<i>P. abies</i>	ЦРР	57	8-120	0,28-281,0	238-635	52,7-58,0	32,3-44,0
РФ, восток Русской равнины	<i>P. abies</i>	ВРР	88	3-230	0,27-3,4	322-555	56,7-67,0	40,5-60,0
РФ, Урал	<i>P. obovata</i> Ledeb.	Ур	102	8-220	0,48-14,4	247-659	54,3-61,0	57,7-68,0
РФ, Средняя Сибирь	<i>P. obovata</i>	СС	25	18-270	0,25-14,0	355-494	55,0-68,0	86,0-99,5
РФ, Восточная Сибирь	<i>P. obovata</i>	ВС	5	80-200	0,22-3,1	398-473	51,0-62,0	105,5-125,0
РФ, Приморье	<i>P. jezoensis</i> Siebold & Zucc.	При	34	36-204	0,55-10,3	315-537	44,0-50,0	132,0-140,0
Южный Казахстан	<i>P. schrenkiana</i> Fisch & C.A. Mey	ЮК	20	50-230	0,24-0,99	349-350	43,5	78,0
Китай 1	<i>P. schrenkiana</i>	Кит1	17	58-261	0,32-4,0	312-618	43,0-44,3	81,1-90,3
Китай 2	<i>P. jezoensis</i> Siebold & Zucc.	Кит2	152	46-317	0,13-3,3	265-740	26,1-52,6	85,2-131,8
Китай 3	<i>P. purpurea</i> Mast.	Кит3	4	40-50	0,64-0,95	524-531	31,5	103,5
Япония	<i>P. koraiensis</i> Nakai	Яп	7	30-47	0,49-2,2	368-512	35,0-44,5	135,8-142,5

Пихты. Род *Abies* Mill. (263 пробных площади в 12 регионах), *Pseudotsuga menziesii* и *Cunninghamia lanceolata* (16 и 97 пробных площадей)

Кластеры (регионы)	Вид	Код**	Число пробных площадей	Диапазоны				
				А, лет	N, 1000/га	БП, кг/м ³	Координаты с. ш., ° в. д., °	
Европа 1	<i>Abies alba</i> Mill.	Е1	20	10-110	0,48-25,0	371-481	43,7-49,3	11,6-23,2
Европа 2	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Е2	16	9-70	0,22-3,7	369-417	45,0-57,2	-2,2-20,5
Украина	<i>A. alba</i>	Ук	49	6-105	0,22-8,4	350-486	48,2-49,5	22,7-25,0
Кавказ	<i>A. nordmanniana</i> (Steven) Spach	Кав	5	160-283	0,33-0,54	400-473	44,0-44,1	40,3-41,0
РФ, восток Русской равнины	<i>A. sibirica</i> Ledeb.	ВРР	7	60-70	0,38-1,1	251-523	55,0-57,0	48,5-49,5
РФ, Урал	<i>A. sibirica</i>	Ур	11	20-114	1,1-54,1	360-454	55,7-57,0	56,6-60,0
РФ, юг Западной Сибири	<i>A. sibirica</i>	ЮЗС	53	50-200	0,13-1,9	335-380	49,4-57,0	78,0-86,0
РФ, Саяны	<i>A. sibirica</i>	Сая	20	21-140	0,22-5,0	273-437	52,0-54,0	89,0-95,0
РФ, Средняя Сибирь	<i>A. sibirica</i>	СС	41	30-170	0,44-5,9	254-459	55,0-62,0	87,0-98,5
РФ, Восточная Сибирь	<i>A. sibirica</i>	ВС	10	56-151	1,05-2,8	434-478	51,0-54,0	104,0-106,0

РФ, Приморье	<i>A. nephrolepis</i> (Trautv. ex Maxim.) Maxim.	При	12	41- 192	0,59- 19,1	347- 506	45,0- 50,0	135,0- 140,0
Япония 1	<i>A. sachalinensis</i> (F.Schmidt) Mast.	Яп1	8	8-35	0,55- 2,9	375- 386	43,2- 44,0	142,2- 142,5
Япония 2	<i>A. veitchii</i> Lindl.	Яп2	27	4- 126	1,2- 1000	326- 531	35,5- 36,5	137,5- 138,7
Китай	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	Кит	97	16- 55	1,01- 5,0	227- 572	18,7- 32,3	103,4- 121,6

5-хвойные сосны. Подрод *Harloxylon* (203 пробных площади)

Кластеры (регионы)	Вид	Код**	Число пробных площадей	Диапазоны				
				А, лет	Н, 1000/га	БП, кг/м ³	Координаты	
						с. ш., °		в. д., °
РФ, Урал	<i>Pinus sibirica</i> <u>Du</u> <u>Tour</u>	Ур	14	82- 132	0,28- 1,5	319- 596	59,0- 59,7	60,8- 62,5
РФ, Западная Сибирь	<i>P. sibirica</i>	ЗС	12	28- 230	0,24- 16,2	373- 639	50,5- 57,7	81,0- 88,0
Алтай	<i>P. sibirica</i>	Алт	16	100- 240	0,31- 1,2	379- 381	51,8- 52,2	85,7- 88,3
РФ, Саяны	<i>P. sibirica</i>	Сая	9	40- 240	0,12- 0,66	319- 435	52,9- 53,1	92,8- 93,1
РФ, Средняя Сибирь 1	<i>P. sibirica</i>	СС1	38	7- 380	0,32- 36,2	319- 495	56,0- 65,5	90,0- 92,5
РФ, Средняя Сибирь 2	<i>P. koraiensis</i> <u>Siebold & Zucc.</u>	СС2	6	15- 40	0,35- 0,4	325- 327	55,7- 56,2	92,3- 92,7
РФ, Восточная Сибирь 1	<i>P. sibirica</i>	ВС1	22	58- 250	0,29- 2,9	382- 593	51,0- 54,0	105,5- 109,5
РФ, Восточная Сибирь 2	<i>P. pumila</i> (Pall.) Regel	ВС2	9	55- 150	0,22- 5,0	469- 471	53,9- 54,2	109,3- 109,9
РФ, Приморье	<i>P. koraiensis</i>	При	43	50- 250	0,32- 4,7	347- 675	44,0- 47,0	132,0- 136,0
РФ, север Дальнего Востока	<i>P. pumila</i>	СДВ	12	35- 200	0,27- 11,5	464- 470	60,0- 63,0	150,0- 152,0
Китай	<i>P. koraiensis</i>	Кит	20	20- 238	0,20- 6,2	262- 448	40,9- 50,7	123,9- 133,5
Корея	<i>P. koraiensis</i>	Кор	8	17- 74	0,26- 1,4	412- 414	37,1- 37,5	127,5- 128,9
Япония	<i>P. pumila</i>	Яп	14	22- 200	35,0- 880	468- 470	35,8- 37,0	137,0- 138,0

Примечания. *Пр – происхождение древостоя: е – естественное, к – культуры.

**Для удобства анализа заявленного ранжирования кластеров по величине БП древесины приведена расшифровка их аббревиатуры в алфавитном порядке:

Алт – Алтай; Бел – Белоруссия; ВЕ – Восточная Европа; ВРР – восток Русской равнины; ВС – Восточная Сибирь; Е – Европа; ЗЕ – Западная Европа; Кав – Кавказ; Кит – Китай; Кор – Корея; Кр – Крым; Мон – Монголия; Ор – Оренбургье; При – Приморье; Сая – Саяны; СДВ – север Дальнего Востока; СЗР – северо-запад России; СЗС – север Западной Сибири; СК – Северный Казахстан; СС – Средняя Сибирь;

Тай – Таймыр; Ук – Украина; Ур – Урал; ЦВС – центр Восточной Сибири; ЦЕ – Центральная Европа; ЦРР – центр Русской равнины; ЦСС – центр Средней Сибири; ЮВС – юг Восточной Сибири; ЮК – Южный Казахстан; ЮСС – юг Средней Сибири; Яп – Японские острова.

Таблица 2. Схема кодирования фиктивными переменными 3220 пробных площадей с измерениями БП стволов в коре по регионам
Подрод *Pinus* L.

Страны (регионы)	Блок фиктивных переменных																					
	X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	X 6	X 7	X 8	X 9	X ₁ 0	X ₁ 1	X ₁ 2	X ₁ 3	X ₁ 4	X ₁ 5	X ₁ 6	X ₁ 7	X ₁ 8	X ₁ 9	X ₂ 0	X ₂ 1	
Западная Европа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центральная Европа	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Восточная Европа	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Белоруссия	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина 2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кавказ	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, северо-запад	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Русской равнины	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Оренбуржье	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Крым	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восток Русской равнины	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Урал	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Западная Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Северный	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Казахстан																				
Китай 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Китай 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Китай 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Япония 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Япония 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Род *Larix* Mill.

Страны (регионы)	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	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉
Западная Европа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центральная Европа	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, северо-запад	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Русской равнины	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, восток Русской равнины	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, север Западной Сибири	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Таймыр	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Средней Сибири	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, юг Средней Сибири	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Восточной Сибири	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, юг Восточной Сибири	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, север Дальнего Востока	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Приморье	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Северный Казахстан	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Монголия	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Китай 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Китай 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Китай 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Китай 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Япония	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Род *Picea* L.

Страны (регионы)	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	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇		
Западная Европа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центральная Европа	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Восточная Европа	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Белоруссия	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Грузия	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, северо-запад	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Русской равнины	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восток Русской равнины	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Урал	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Приморье	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Южный Казахстан	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Китай 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Китай 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Китай 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Япония	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Род *Abies* Mill. (263 пробных площадей в 12 регионах), *Pseudotsuga menziesii* и *Cunninghamia lanceolata* (16 и 97 пробных площадей)

Страны (регионы)	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	X ₁₂	X ₁₃
Европа 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Европа 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кавказ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, восток Русской равнины	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Урал	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, юг Западной Сибири	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Саяны	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
РФ, Приморье	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Япония 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Япония 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Китай	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

5-хвойные кедр (Haploxyton)

Страны (регионы)	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	X ₁₂	
РФ, Урал	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Западная Сибирь	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Алтай	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Саяны	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь 2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь 2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
РФ, Приморье	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
РФ, север Дальнего Востока	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Китай	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Корея	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Япония	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Результаты и обсуждение

Результаты расчета моделей (1) представлены в таблице 3. Для елей и 5-хвойных сосен густота древостоя в качестве независимой переменной оказалась не значимой ($t = 0,28-1,04 < t_{95} = 1,96$), и она была исключена из структуры модели (табл. 2). О степени адекватности моделей (1) и отсутствии корреляции остатков можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений БП (рис. 1).

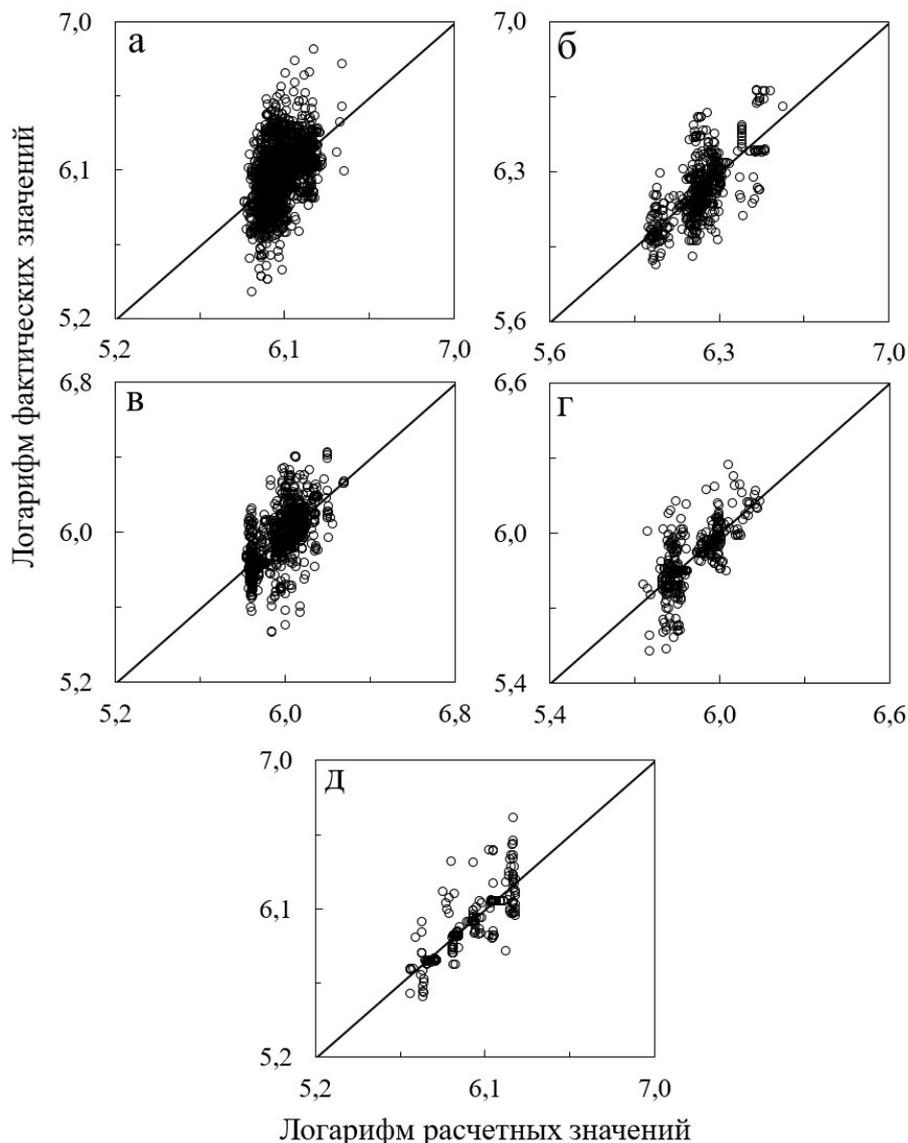


Рисунок 1. Соотношение расчетных и фактических значений БП согласно модели (1). Здесь и далее: а – *Pinus*, б – *Larix*, в – *Picea*, г – *Abies*, д – *Haploxyton*

Можно отметить, что у лиственниц связь БП с возрастом и густотой отрицательная, тогда как у 2-хвойных сосен и пихт она положительная. Это может быть связано с большой долей коры у лиственниц. Известно, что толщина коры у спелых лиственниц может достигать 27 см (Симон, 1910), а ее БП вдвое меньше, чем БП древесины (Usoltsev, 2020). В результате специфичное изменение БП ствола в коре с возрастом и густотой у лиственниц во многом определяется более высокой долей коры, чем у остальных хвойных.

Таблица 3. Характеристика уравнений (1) для БП стволов в коре 2-хвойные сосны

Зависимая переменная	Константы и независимые переменные																	
	a_0	$a_1(\ln A)$	$a_2(\ln M)$	$a_3 X_1$	$a_4 X_2$	$a_5 X_3$	$a_6 X_4$	$a_7 X_5$	$a_8 X_6$	$a_9 X_7$	$a_{10} X_8$	$a_{11} X_9$	$a_{12} X_{10}$	$a_{13} X_{11}$	$a_{14} X_{12}$	$a_{15} X_{13}$	$a_{16} X_{14}$	$a_{17} X_{15}$

ме н- ная																		
$n(BD)$	5,9 73 7	0,0 69 2	0,0 20 0	0,1 42 2	- 0,0 2	- 0,1 2	- 0,2 1	- 0,1 3	0,1 00 4	0,0 52 0	- 0,1 7	- 0,1 5	0,1 37 3	- 0,2 5	- 0,2 6	- 0,1 0	- 0,2 5	- 0,2 1

Продолжение

Константы и независимые переменные						adjR ²	SE
$a_{18}X_{16}$	$a_{19}X_{17}$	$a_{20}X_{18}$	$a_{21}X_{19}$	$a_{22}X_{20}$	$a_{23}X_{21}$		
-0,2009	-0,0808	-0,2772	-0,1727	-0,1611	0,0501	0,227	0,144

Лиственницы

Завис имая пере менная	Константы и независимые переменные															
	a_0	$a_1(lnA)$	$a_2(lnM)$	a_3X_1	a_4X_2	a_5X_3	a_6X_4	a_7X_5	a_8X_6	a_9X_7	$a_{10}X_8$	$a_{11}X_9$	$a_{12}X_{10}$	$a_{13}X_{11}$	$a_{14}X_{12}$	$a_{15}X_{13}$
$ln(BD)$	6,1 780	- 0,0 276	- 0,0 211	0,0 299	0,3 413	0,1 775	0,1 520	0,1 066	0,2 621	0,2 349	0,1 594	0,2 378	0,3 952	0,2 454	0,1 617	- 0,0 182

Продолжение

Константы и независимые переменные						adjR ²	SE
$a_{16}X_{14}$	$a_{17}X_{15}$	$a_{18}X_{16}$	$a_{19}X_{17}$	$a_{20}X_{18}$	$a_{21}X_{19}$		
0,2035	0,0327	0,1364	0,1768	0,1325	-0,0471	0,449	0,114

Ели

За ви- си мая пе- ре- ме- н- ная	Константы и независимые переменные															
	a_0	$a_1(lnA)$	$a_2(lnM)$	a_3X_1	a_4X_2	a_5X_3	a_6X_4	a_7X_5	a_8X_6	a_9X_7	$a_{10}X_8$	$a_{11}X_9$	$a_{12}X_{10}$	$a_{13}X_{11}$	$a_{14}X_{12}$	$a_{15}X_{13}$
$ln(BD)$	5,9 342	0,0 248	- 0,0 699	- 0,0 162	0,0 995	0,1 446	0,5 399	0,0 094	- 0,0 597	0,0 352	0,0 087	0,0 266	0,0 262	0,0 216	0,18 91	

Продолжение

Константы и независимые переменные				adjR ²	SE
$a_{16}X_{14}$	$a_{17}X_{15}$	$a_{18}X_{16}$	$a_{19}X_{17}$		
0,1499	-0,2148	0,2461	0,1255	0,407	0,121

Пихты

За ви- си	Константы и независимые переменные															djR ²	E
	a_0	$a_1(lnA)$	$a_2(lnM)$	a_3X_1	a_4X_2	a_5X_3	a_6X_4	a_7X_5	a_8X_6	a_9X_7	$a_{10}X_8$	$a_{11}X_9$	$a_{12}X_{10}$	$a_{13}X_{11}$	$a_{14}X_{12}$		

М а я П е р е - м е н - н а я																		
ln(B D)	5, 73 66	0, 05 06	0, 03 12	0, 06 25	0, 05 53	0, 10 28	- 0, 18 73	0, 03 16	- 0, 08 39	0,142 8	0,1 47 7	0, 12 85	0, 06 57	0, 04 49	- 0, 04 36	- 0, 06 87	0,483	0,08 8

5-хвойные сосны

За ви - си ма я пе ре - ме н - н а я	Константы и независимые переменные															ad jR ²	S E	
	0	a ₁ (nA)	a ₂ (nN)	a ₃ X ₁	a ₄ X ₂	a ₅ X ₃	a ₆ X ₄	a ₇ X ₅	a ₈ X ₆	a ₉ X ₇	a ₁₀ X ₈	a ₁₁ X ₉	a ₁₂ X ₁₀	a ₁₃ X ₁₁	a ₁₄ X ₁₂			
ln(BD)	5,7 89 9	0,0 30 1	-	0,1 92 7	0,0 03 1	0,0 07 9	0,05 75	0,0925	-	0,1 22 5	0,2 21 0	0,3 03 5	0,2 31 7	- 0,1 77 6	0,1 28 5	0,2 46 2	0, 66 1	0, 11 9

Примечание.

Коэффициент детерминации adjR² скорректирован на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели (1).

Путем графической интерпретации моделей (1) выполнено ранжирование регионов по величине БП стволов в коре (рис. 2). Предварительно в модели (1) введены значения среднего возраста древостоев (A = 80 лет) и их средней густоты (N = 7,4 тыс. экз./га), рассчитанные по исходным данным.

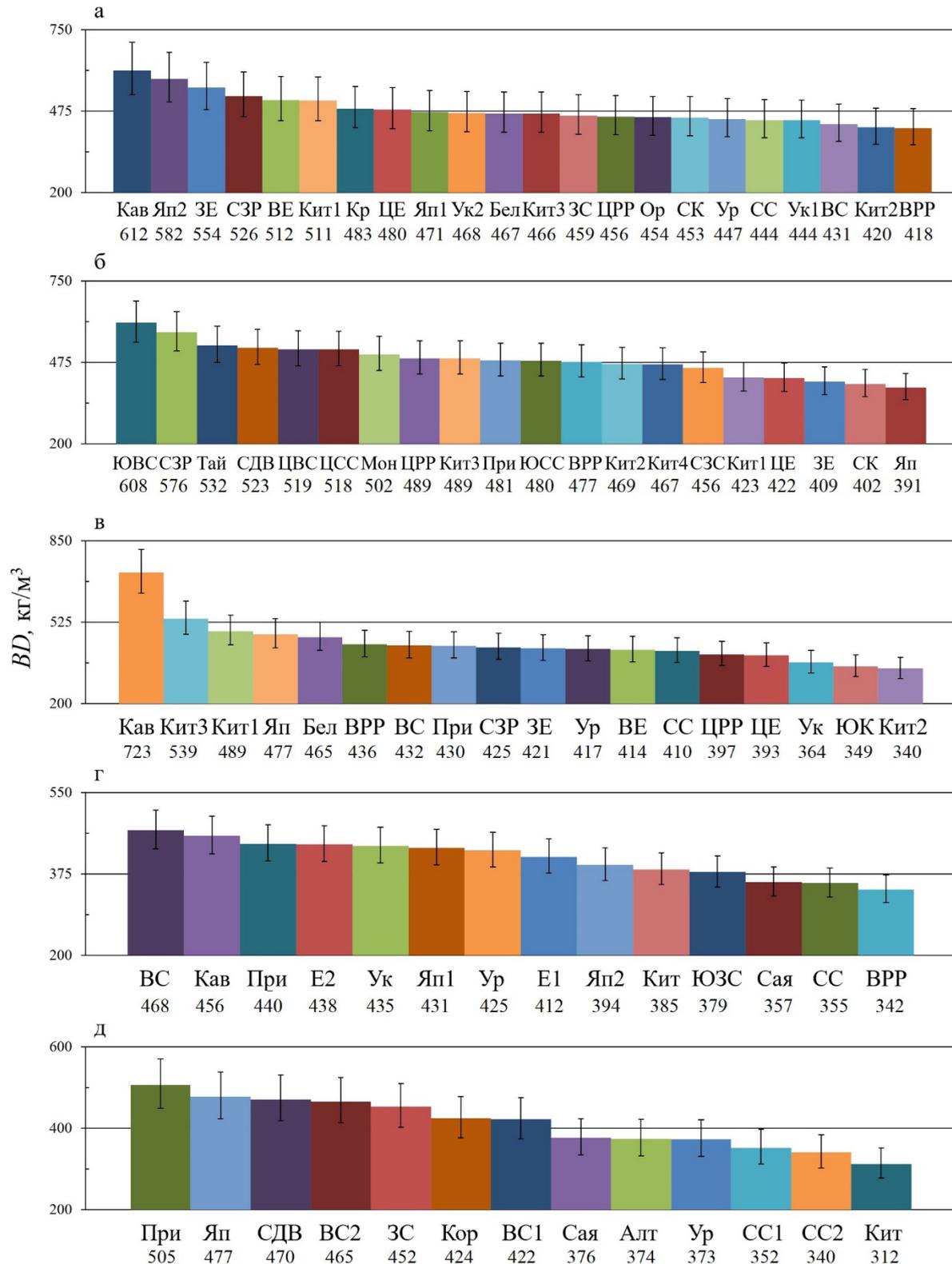


Рисунок 2. Ранжирование принятых в табл. 1 регионов по величине БП стволов в коре в убывающей последовательности для 5 хвойных родов (подродов). Аббревиатура кластеров приведена в табл. 1

При анализе рисунка 2 можно видеть, что у 2-хвойных сосен ряд ранжирования БП начинается с сосны Сосновского на Кавказе (612 кг/м³) и заканчивается сосной обыкновенной на востоке Русской равнины (418 кг/м³). У лиственниц последовательность ранжирования начинается с лиственницы

Чекановского в Восточной Сибири (608 кг/м^3), и заканчивается лиственницей Кемпфера на Японских островах (391 кг/м^3). У елей ряд начинается с ели восточной на Кавказе (723 кг/м^3) и заканчивается елью аянской в Китае (340 кг/м^3). У пихт ряд начинается с пихты сибирской в Восточной Сибири (468 кг/м^3) и заканчивается пихтой сибирской на востоке Русской равнины (342 кг/м^3). Ряд 5-хвойных сосен начинается и заканчивается кедром корейским, соответственно БП равна 505 кг/м^3 в российском Приморье и 312 кг/м^3 в Китае.

Согласно таблице 1, территориально выделенные регионы заполнены фактическими данными неравномерно, и представленные ранжирования (рис. 2) характеризуются множеством «белых пятен». Для заполнения этих «белых пятен» при оценках биомассы стволов в коре на соответствующих пробных площадях мы приводим ранжирование средних видоспецифичных значений БП, когда данные всех регионов объединены в пределах вида (рис. 3).

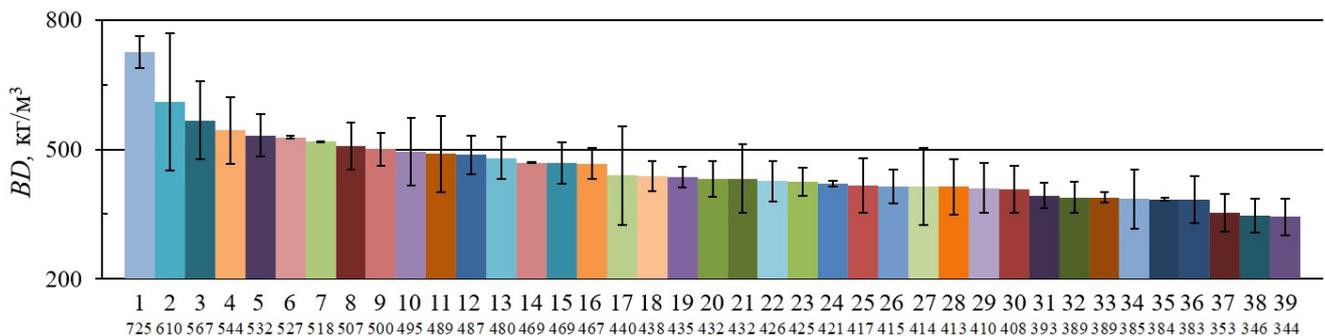


Рисунок 3. Диаграмма распределения 39 лесобразующих видов Евразии по величине БП стволов в коре

Обозначения цифр по оси абсцисс:

1 – *Picea orientalis* (L.) Link; 2 – *Pinus sosnowskyi* Nakai; 3 – *Larix chekanovskii* Szafer; 4 – *Larix sukaczewii* Dylis; 5 – *Larix cajanderi* Mayr; 6 – *Picea purpurea* Mast.; 7 – *Larix olgensis* A.Henry; 8 – *Pinus thunbergii* Parl.; 9 – *Larix komarovii* Kolesn.; 10 – *Larix Principis-Rupprechtii* Mayr; 11 – *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.; 12 – *Larix decidua* Mill.; 13 – *Larix sibirica* Ledeb.; 14 – *Pinus pumila* (Pall.) Regel; 15 – *Picea koraiensis* Nakai; 16 – *Pinus tabuliformis* Carr.; 17 – *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.; 18 – *Abies nordmanniana* (Steven) Spach; 19 – *Pinus pallasiana* Lamb.; 20 – *Picea ajanensis* Fisch. & Carrière; 21 – *Pinus sylvestris* L.; 22 – *Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.; 23 – *Pinus densiflora* S.&Z.; 24 – *Pinus nigra* J.F.Arnold; 25 – *Pinus massoniana* Lamb.; 26 – *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière; 27 – *Picea schrenkiana* Fisch. & C.A.Mey; 28 – *Picea obovata* Ledeb.; 29 – *Picea sitchensis* (Bong.) Carr.; 30 – *Picea abies* (L.) H. Karst.; 31 – *Abies alba* Mill.; 32 – *Abies veitchii* Lindl.; 33 – *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; 34 – *Pinus sibirica* Du Tour; 35 – *Abies sachalinensis* (F.Schmidt) Mast.; 36 – *Pinus taiwanensis* Hayata; 37 – *Abies sibirica* Ledeb.; 38 – *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; 39 – *Picea jezoensis* Siebold & Zucc.

Ряд ранжирования (рис. 3) начинает ель восточная (725 кг/м^3) и завершает ель аянская (344 кг/м^3).

Заключение

Таким образом, разработаны регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре пяти хвойных родов, специфичные по регионам и видам в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование регионов по БП стволов при условии их равенства по возрасту древостоев и их густоте.

Выполнены два ранжирования по величине БП стволов в коре, а именно, ранжирование регионов в пределах рода (для 5-хвойных сосен – в пределах подрода) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется ель восточная и минимальным – ель аянская.

Полученные модели и ранжирования видов по величине БП запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в хвойных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Список литературы

1. Симон Ф.П. В лесах Общего Сырта // Лесной журнал. 1910. Т. 40. Вып. 10. С. 1119-1140.
2. Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. 4-е дополненное издание. Монография. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023.
3. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии // Сибирский лесной журнал. 2022. № 3. С. 59–68.
4. Billard A., Bauer R., Mothe F., Jonard M., Colin F., Longuetaud F. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components // *Annals of Forest Science*. 2020. № 77. С. 103.
5. Holdaway R.J., McNeill S.J., Mason N.W., Carswell F.E. Propagating uncertainty in plot-based estimates of forest carbon stock and carbon stock change // *Ecosystems*. 2014. № 17. С. 627-640.
6. Li C.M., Zhang H.R. Modeling dominant height for Chinese fir plantation using a non-linear mixed-effects modeling approach // *Scientia Silvae Sinicae*. 2010. Vol. 46. pp. 89-95.
7. MacFarlane D.W. Functional relationships between branch and stem wood density for temperate tree species in North America // *Front. For. Glob.* 2020.
8. 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 Journal of Forestry Science*. 2021. Vol. 51, article 1.
9. McKinley R., Shelbourne C.J.A., Harris J.M., Young G.D. Variation in whole-tree basic wood density for a range of plantation species grown in New Zealand // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2000. № 30(3). pp.: 436-446.
10. Nygard R., Elfving B. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso // *Ann. For. Sci.* 2000. Vol. 57. pp.143-153.
11. Sagang B.T., Momo S.T., Libalah M.B., Rossi V., Fonton N., Mofack, G. I., Kamdem N.G., Nguetsop V.F., Sonké B., Pierre P., Barbier N. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data // *For. Ecol. Manage.* 2018. № 424. pp. 519-528.
12. Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: monogr. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020.

Agroecological regional ranking of the basic density of stem wood stock in coniferous tree species of Eurasia

Vladimir A. Usoltsev

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher
Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Yekaterinburg, Russia
Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management
Ural State Forestry Engineering University
Yekaterinburg, Russia
Usoltsev50@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Nikolai I. Plyukha

Graduate student
Ural State Forestry Engineering University
Yekaterinburg, Russia
nikcskript@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Ivan S. Tsepordey

Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher
Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Yekaterinburg, Russia
ivan.tsepordey@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Victor P. Chasovskikh

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Chess Art and Computer Mathematics
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia
u2007u@ya.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Elena V. Koch

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Chess Art and Computer Mathematics
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia
elenakox@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 04.11.2023

Accepted 29.12.2023

Published 28.02.2024

UDC 630*232.3(4)

EDN JZJFKG

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

In studies of the carbon cycle and plant ecology, a useful indicator is the basic density of wood (BD) as the ratio of the mass in a dry condition (at 0% humidity) to the «green» volume (the volume of wood in a state of saturation with water). Data on the wood BD of most species within the region are often unavailable, and averages at the level of genera or families are used. However, there may be significant phylogenetic and geographical variability of BP, and the use of its average values at the genus level is possible only in the absence of regional data. Almost all published data contain information on the BP of the wood itself, excluding bark. If it is necessary to calculate the biomass of stems above bark according to the available volume data having in mind the BD, which differs for wood and bark, then it is impossible to obtain the desired result with sufficient accuracy, since in each specific case the ratios of wood and bark are unknown, and they are differ significantly. The presence of huge amounts of data on volume stocks accumulated by traditional forest taxation makes it possible to estimate the dry biomass of stems with the bark over large areas using known values of the stem

BD. The purpose of our research was to analyze the regional features of stem wood BD of coniferous tree species of Eurasia. Using the author's database on the qualimetry of trees of forest-forming species of Eurasia, a sample of 3220 trees of five coniferous tree genera (subgenera) of Eurasia was formed. A mixed-type model structure is applied, including numerical (age and stem diameter) and dummy variables encoding geographical regions. Two rankings were performed according to the BD of stem above bark, namely, the ranking of clusters (regions) within the genus (for five-needled pines – within the subgenus) and a species-specific ranking, according to which the maximum values are characterized by *Picea orientalis* (L.) Link and the minimum ones by *Picea jezoensis* Siebold & Zucc. The obtained models and the ranking of species by the value of the BD of the stems above bark can be used to calculate the carbon pool in coniferous stands according to forest inventory data.

Keywords

genera *Pinus* L., *Larix* Mill., *Picea* L., *Abies* Mill., subgenus *Haploxylon*, stem basic density, regional features, regression models.

References

1. Simon F.P. In the forests of the Common Syrt // *Forest magazine*. 1910. Vol. 40. Iss. 10. pp. 1119-1140.
2. Usoltsev V.A. Biomass and primary production of forests of Eurasia. An electronic database. 4th expanded edition. Monograph. Yekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forestry Engineering University, 2023.
3. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Geographical patterns of changes in the basic density of wood and bark of forest-forming rocks of Eurasia // *Siberian Forest Journal*. 2022. № 3. pp. 59-68.
4. Billard A., Bauer R., Mothe F., Jonard M., Colin F., Longuetaud F. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components // *Annals of Forest Science*. 2020. № 77. pp. 103.
5. Holdaway R.J., McNeill S.J., Mason N.W., Carswell F.E. Propagating uncertainty in plot-based estimates of forest carbon stock and carbon stock change // *Ecosystems*. 2014. № 17. pp. 627-640.
6. Li C.M., Zhang H.R. Modeling dominant height for Chinese fir plantation using a non-linear mixed-effects modeling approach // *Scientia Silvae Sinicae*. 2010. Vol. 46. pp. 89-95.
7. MacFarlane D.W. Functional relationships between branch and stem wood density for temperate tree species in North America // *Front. For. Glob.* 2020.
8. 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 Journal of Forestry Science*. 2021. Vol. 51, artic. 1.
9. McKinley R., Shelbourne C.J.A., Harris J.M., Young G.D. Variation in whole-tree basic wood density for a range of plantation species grown in New Zealand // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2000. № 30(3). pp.: 436-446.
10. Nygard R., Elfving B. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso // *Ann. For. Sci.* 2000. Vol. 57. pp.143-153.
11. Sagang B.T., Momo S.T., Libalah M.B., Rossi V., Fonton N., Mofack, G. I., Kamdem N.G., Nguetsop V.F., Sonké B., Pierre P., Barbier N. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data // *For. Ecol. Manage.* 2018. № 424. pp. 519-528.
12. Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: monogr. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020.