

УДК 630*52:630*174.754

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ БАЗИСНОЙ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ЕВРАЗИИ

В. А. Усольцев^{1,2}, И. С. Цепордей¹

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.02.2022 г.

Квалиметрия надземной и подземной фитомассы деревьев является составной частью исследований биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в его пространственных градиентах и в связи с изменением климата. Основная доля углерода депонируется в стволах деревьев и в значительной степени зависит от базисной плотности (БП) древесины и коры. В работе использована авторская база данных о квалиметрии лесообразующих видов Северной Евразии. Из нее отобраны 3450 модельных деревьев 9 видов древесных. Построенные модели смешанного типа, описывающие зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев, позволили выявить 0.25%-е снижение БП древесины на 1° с. ш. в направлении с юга на север и 0.26%-е на 1° в. д. – в направлении с запада на восток. Снижение БП коры составляет в тех же градиентах соответственно 0.55 % на 1° с. ш. и 0.28 % на 1° в. д. Наибольшая доля объясненной изменчивости БП приходится на видовую принадлежность деревьев – 74 % по древесине и 87 % по коре, существенно меньшая – на географическое положение, соответственно 12 и 9 %, и наименьшая доля – на дендрометрические показатели деревьев, соответственно 14 и 4 %. Выполнено ранжирование древесных видов равновеликих деревьев по значениям БП, которое показало, что каждый вид имеет специфическое соотношение БП древесины и коры. Это означает, что для более точной оценки базисной плотности и депонирования углерода в древесине и коре необходимо обрабатывать изымаемые из стволов диски отдельно по древесине и коре, а не диски в коре в целом.

Ключевые слова: *древесина и кора ствола, модель смешанного типа, географическая широта и долгота.*

DOI: 10.15372/SJFS20220307

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая лесная экология характеризуется интенсивными исследованиями биологической продуктивности лесов в предположении антропогенного изменения климата и поиска возможностей его стабилизации. Роль лесов в мире становится все более значимой, поскольку мы вступаем в новую эру, характеризующуюся глобальным стремлением к достижению экономической, социальной и экологической устойчивости. В настоящее время сформировано несколько глобальных баз данных не только по количественным показателям

фитомассы деревьев (Kattge et al., 2020), но и по квалиметрическим показателям, в частности по базисной плотности (БП) древесины различных древесных видов мира, охватывающих различные регионы и имеющих различный объем, качество и доступность (Reyes et al., 1992; Chave et al., 2006; Donegan et al., 2014). Крупнейшая из них (Zanne et al., 2009) содержит данные о БП более 8412 таксонов (1638 родов, 191 семейство) деревьев, что, тем не менее, составляет лишь 10 % от имеющихся 100 тыс. древесных видов. Обсуждается также необходимость стандартизации методов оценки БП (Nogueira et al., 2008). Квалиметрия надземной и подземной фи-

томассы является составной частью исследований биологической продуктивности и углерод депонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в земной биосфере в связи с изменением климата (Fujiwara et al., 2007; Pretzsch et al., 2018; Vaughan et al., 2019).

БП древесины относится к ключевым показателям, используемым для определения лесной фитомассы и запасов углерода (Yeboah et al., 2014; Pascoa et al., 2020) и считается одним из наиболее широко используемых критериев оценки качества древесины и ее прочностных свойств. Она представляет собой отношение массы древесины в абсолютно сухом состоянии к ее объему в свежем (растущем) состоянии. Преимущества использования сухой массы в числителе формулы БП древесины заключаются в трех аспектах: (1) корреляция с физико-механическими свойствами древесины; (2) воспроизводимость и сопоставимость результатов; (3) простота преобразования в различные условия влажности при наличии информации об усадке (Koch, 1972).

Известно, что древесина обладает необычным сочетанием полезных свойств. БП является показателем пригодности древесины для многих важных применений и связана с механической прочностью древесины. Это определяет ее использование в качестве сырья для пиломатериалов, конструкционной фанеры и других изделий из древесины, а ее значения определяют выход целлюлозы из данного объема древесины (Koch, 1972; Shepard, Shottafer, 1992). Из-за полезности БП в качестве предиктора качества и прочностных свойств древесины исследователи на протяжении многих лет искали некую легко определяемую ее связь с условиями произрастания деревьев. В первые годы исследований качества древесины (с конца XIX в.) было распространено мнение, что медленно растущая древесина хвойных пород с узкими кольцами превосходит по БП быстрорастущую древесину с широкими кольцами (Larson et al., 2001). Это мнение было подтверждено и современными исследованиями (Roque, Fo, 2007; Zhu et al., 2007; Yeboah et al., 2014; Sousa et al., 2016).

Позднее было установлено, что ширина годичного кольца сама по себе не является достоверным критерием оценки качества древесины. Исследования разных видов сосен (*Pinus* L.) продемонстрировали, что широкие годичные кольца не обязательно связаны со снижением БП (Larson et al., 2001; Gutiérrez et al., 2006). Ког-

да было показано, что плотность поздней древесины хвойных деревьев в 2–3 раза превышает плотность ранней древесины (Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955), то при последующем учете доли поздней древесины в годичных кольцах оказалось, что она сильно коррелирует с БП (Полубояринов, 1976; Мелехов и др., 2003). БП возрастает в направлении от сердцевины к наружным слоям ствола, и это определяет ее увеличение с возрастом дерева для всего ствола. Данная закономерность имеет общий характер и наблюдается как у быстро-, так и медленно растущих деревьев (Молчанов, 1964; Hakkila, 1966; Полубояринов, 1976; Андрущенко, 1977; Larson et al., 2001; Kiaei et al., 2016).

Исследование изменчивости БП у нескольких видов сосен показало, что она объясняется не столько лесорастительными условиями, сколько генетическими особенностями видов (Thor, Bates, 1970; Fujimoto et al., 2008). Тем не менее в тропических лесах выявлено существенное увеличение БП по мере перехода от влажных к сухим местообитаниям (Pascoa et al., 2020). Связь БП древесины с типами леса показана также в сосновых древостоях России (Мелехов и др., 2003). Во Франции установлено снижение БП древесины в высотном градиенте в направлении вверх по горному склону (Kerfriden et al., 2021). На глобальном уровне сделан анализ изменчивости БП древесины в широтном диапазоне от 52° с. ш. до экватора и установлено увеличение БП на 0.5 % на каждый градус среднегодовой температуры и снижение на 0.02 % на каждый сантиметр среднегодовых осадков (Wiemann, Williamson, 2002). Положительная связь БП с среднегодовой температурой установлена в древостоях дугласии в Новой Зеландии (Kimberley et al., 2017).

У нескольких видов елей (*Picea* A. Dietr.) и сосен выявлено увеличение БП древесины по мере увеличения густоты древостоя (Гордина, 1985; Yang, 2002; Zhu et al., 2007; Yang, Hazenberg, 2011; Yeboah et al., 2014). Однако в 27-летних культурах тополя (*Populus xiaohei* T.S. Hwang & Liang) в Китае и 12-летних культурах клена бархатистого (*Acer velutinum* Boiss.) на севере Ирана связи БП с густотой древостоя не обнаружено (Jiang et al., 2007; Naji et al., 2015).

Таким образом, моделирование связей БП с независимыми переменными, характеризующими морфоструктуру, возраст и физиологию дерева, выполнено лишь в местообитаниях отдельных регионов. Поскольку определяющим фактором роста деревьев является географичес-

кое положение (Zhang, Shi, 2004), необходимо знание географических особенностей изменения БП деревьев. Насколько нам известно, результаты ее исследований в географических градиентах Евразии в открытых источниках отсутствуют, а по показателю БП коры приводятся лишь немногочисленные средние значения (Гусев, 1976; Усольцев, 1985)

Значения БП варьируют не только в поперечном сечении ствола, но и вдоль по стволу (Полубояринов, 1976; Исаева, 1978; Fujimoto et al., 2008; Télles et al., 2011; Sousa et al., 2016; Billard et al., 2021). В настоящем исследовании мы ограничиваемся моделированием средних его показателей для всего ствола дерева, как это было представлено во французской базе данных (Leban et al., 2021).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований – выявить географические закономерности изменения БП древесины и коры лесобразующих видов Северной Евразии. Для ее достижения поставлены следующие задачи:

– разработать регрессионные зависимости БП от дендрометрических показателей деревьев, географических координат и видовой принадлежности;

– оценить вклад дендрометрических показателей, географического положения и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры;

– выполнить ранжирование древесных видов по значениям БП древесины и коры.

Для решения поставленных задач использована авторская база данных о квалитметрии лесобразующих пород Северной Евразии (Usoltsev, 2020). Из нее отобраны 3450 модельных деревьев 9 древесных видов, имеющих данные о дендрометрических показателях и БП древесины и коры стволов, а также о положении пробных площадей по широте и долготе (табл. 1). Эмпирические данные БП на пробных площадях получены по 3–10 дискам, выпиленным вдоль по стволу. БП (отдельно древесины и коры) рассчитана в результате обмера и взвешивания дисков, сушки до постоянной массы и повторного взвешивания. БП всего ствола рассчитана как средневзвешенная по площади поперечного сечения дисков.

Таблица 1. Статистики показателей 3450 модельных деревьев, включенных в регрессионный анализ

Обозначение статистик	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>DW</i>	<i>DB</i>	<i>Lat</i>	<i>Lon</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.)</i>							
Mean	46	12.5	11.9	398.4	290.7	–	–
Min	5	1.1	1.4	254.0	164.3	44.6	24.3
Max	186	55.0	36.6	640.4	636.4	79.4	97.0
<i>SD</i>	33.5	9.5	7.1	52.1	61.9	–	–
<i>CV</i> , %	72.8	76.3	59.5	13.1	21.3	–	–
<i>n</i>	966	957	965	966	966	–	–
<i>Кедр сибирский (Pinus sibirica Du Tour) и к. корейский (P. koraiensis Siebold & Zucc.)</i>							
Mean	42	9.3	8.0	354.7	717.9	–	–
Min	15	1.5	1.7	245.8	298.7	43.6	59.9
Max	165	29.3	24.0	509.9	969.5	59.8	132.3
<i>SD</i>	37.5	6.7	5.5	51.1	214.4	–	–
<i>CV</i> , %	90.4	71.5	68.7	14.4	29.9	–	–
<i>n</i>	74	74	74	74	74	–	–
<i>Лиственница (Larix Mill.)</i>							
Mean	81	13.7	12.2	511.7	335.8	–	–
Min	15	0.3	1.4	382.4	186.3	49.2	64.5
Max	400	52.8	30.0	735.5	545.3	67.0	148.0
<i>SD</i>	73.2	8.9	5.5	43.0	69.7	–	–
<i>CV</i> , %	90.5	64.7	44.8	8.4	20.8	–	–
<i>n</i>	193	194	193	194	194	–	–

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Ель (Picea A. Dietr.)</i>							
Mean	48	12.4	9.1	393.2	433.5	–	–
Min	11	1.0	1.5	238.1	176.7	43.7	12.0
Max	163	51.5	30.6	648.1	866.7	64.0	132.5
SD	32.6	10.2	6.1	64.6	126.5	–	–
CV, %	67.8	81.7	67.5	16.4	29.2	–	–
n	279	279	230	279	279	–	–
<i>Пихта (Abies Mill.)</i>							
Mean	70	20.3	16.3	364.2	429.2	–	–
Min	8	1.6	2.2	272.8	299.1	43.7	22.7
Max	180	46.2	28.9	513.0	606.7	56.8	132.5
SD	40.2	11.0	7.2	41.3	71.1	–	–
CV, %	57.6	54.2	44.5	11.3	16.6	–	–
n	92	92	92	92	92	–	–
<i>Береза (Betula L.)</i>							
Mean	43	14.1	14.3	499.0	532.5	–	–
Min	4	1.0	1.4	312.2	215.1	48.1	26.0
Max	142	48.0	34.5	769.4	993.3	64.0	148.0
SD	22.9	8.0	5.8	46.3	97.9	–	–
CV, %	52.9	57.1	40.7	9.3	18.4	–	–
n	899	901	882	901	901	–	–
<i>Осина (Populus tremula L.)</i>							
Mean	32	15.7	15.3	417.3	468.0	–	–
Min	3	1.1	2.4	301.0	311.0	31.2	30.8
Max	57	45.7	28.8	500.0	692.0	56.7	70.4
SD	13.1	9.0	5.7	23.7	36.1	–	–
CV, %	41.3	57.1	37.3	5.7	7.7	–	–
n	317	317	317	317	317	–	–
<i>Липа (Tilia L.)</i>							
Mean	52	17.7	16.7	415.8	483.8	–	–
Min	10	3.1	4.8	252.3	248.5	43.6	37.4
Max	115	38.6	24.8	647.8	900.0	55.8	132.3
SD	22.2	8.4	5.1	73.6	105.5	–	–
CV, %	42.4	47.7	30.3	17.7	21.8	–	–
n	202	202	187	202	202	–	–
<i>Дуб (Quercus L.)</i>							
Mean	41	16.4	14.9	582.8	412.8	–	–
Min	6	1.9	2.8	450.0	269.6	43.6	27.5
Max	166	50.5	31.5	800.0	800.0	51.5	132.3
SD	23.9	9.4	6.5	50.6	71.4	–	–
CV, %	58.2	57.1	43.9	8.7	17.3	–	–
n	425	425	425	425	425	–	–

Примечание. Mean, min и max соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; (Lat) и (Lon) – соответственно широта и долгота местности, град.; DW и DB – соответственно базисная плотность древесины и коры, кг/м³.

При моделировании биомассы деревьев получили распространение модели смешанного типа (mixed-effects models) (Molteberg, Nøibø, 2007; Zeng et al., 2011; Fu et al., 2012; Zeng, 2017; Usoltsev et al., 2021a, b). Аллометрическая мо-

дель смешанного типа включает два типа независимых переменных – численные, принимающие значения из непрерывного ряда чисел, и фиктивные, представляющие дискретные качественные характеристики (Дрейпер, Смит, 1973). Древес-

Таблица 2. Схема кодирования лесообразующих пород Северной Евразии, у которых определена БП древесины и коры стволов

Порода	Блок фиктивных переменных							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Сосна обыкновенная	0	0	0	0	0	0	0	0
Кедр сибирский и к. корейский	1	0	0	0	0	0	0	0
Лиственница	0	1	0	0	0	0	0	0
Ель	0	0	1	0	0	0	0	0
Пихта	0	0	0	1	0	0	0	0
Береза	0	0	0	0	1	0	0	0
Осина	0	0	0	0	0	1	0	0
Липа	0	0	0	0	0	0	1	0
Дуб	0	0	0	0	0	0	0	1

ные виды (роды) представлены в базе данных крайне неравномерно: от примерно 1000 по сосне обыкновенной до 80 деревьев по кедром сибирскому и корейскому. Разная представленность их как по общему количеству, так и в географических координатах в пределах ареалов, может привести к тому, что закономерности изменения БП для разных древесных видов будут во многом специфичными и несопоставимыми именно по этой причине, тогда как в основе географической изменчивости биологической продуктивности лежат общие для всех видов (родов) биоэкологические и климатические факторы. Всеобщность действия определяющих внешних факторов позволяет предположить однонаправленность реакции видов на эти факторы и соответственно – однотипность (а не видоспецифичность) аллометрических моделей БП (Molteberg, Nøibø, 2007). Исходя из качественного уровня имеющейся базы данных, мы предполагаем в первом приближении построить аллометрические модели БП смешанного типа, включающие как численные (дендрометрические показатели и географические координаты), так и фиктивные переменные, кодирующие видовую принадлежность исходных данных (табл. 2).

Мы приняли следующую структуру аллометрической модели смешанного типа:

$$\ln(DW) \text{ и } \ln(DB) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(H) + b_4 \ln(Lat) + b_5 \ln(Lon) + \sum a_i X_i, \quad (1)$$

где $\sum a_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве $(i + 1)$; a_0 – свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование модели (Baskerville, 1972); b_1 – b_5 – регрессионные коэффициенты при численных переменных уравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате регрессионного анализа получены модели:

– для БП древесины ствола

$$\ln(DW) = 6.9597 + 0.0876 \ln A - 0.0680 \ln H - 0.1478 \ln(Lat) - 0.1290 \ln(Lon) - 0.1201X_1 + 0.2690X_2 - 0.0559X_3 - 0.1716X_4 + 0.2332X_5 + 0.0878X_6 + 0.0285X_7 + 0.2973X_8; \\ R^2_{adj} = 0.640; SE = 0.10, \quad (2)$$

– и для БП коры ствола

$$\ln(DB) = 7.9764 - 0.0529 \ln H - 0.3665 \ln(Lat) - 0.1598 \ln(Lon) + 0.78741X_1 + 0.1853X_2 + 0.2978X_3 + 0.2711X_4 + 0.5641X_5 + 0.4487X_6 + 0.4477X_7 + 0.1683X_8; \\ R^2_{adj} = 0.554; SE = 0.20. \quad (3)$$

Численные переменные во всех уравнениях (1) оказались значимыми на уровне $p < 0.001$. Диаметр ствола в модели (2) и диаметр ствола и возраст дерева в модели (3) оказались статистически незначимы на уровне $p < 0.05$ и были исключены из числа независимых переменных. Судя по знакам регрессионных коэффициентов при переменных $\ln(Lat)$ и $\ln(Lon)$, БП древесины и коры деревьев всех 9 видов в пределах их ареалов снижается в направлениях с юга на север и с запада на восток.

Для геометрического 3D-изображения моделей (2) и (3) в координатах широты и долготы в них были подставлены средние значения возраста и высоты дерева. Благодаря специфике фиктивных переменных, видовые различия 3D-изображений в координатах широты и долготы определяются только значением свободного члена, т. е. сдвигом 3D-поверхности по оси ор-

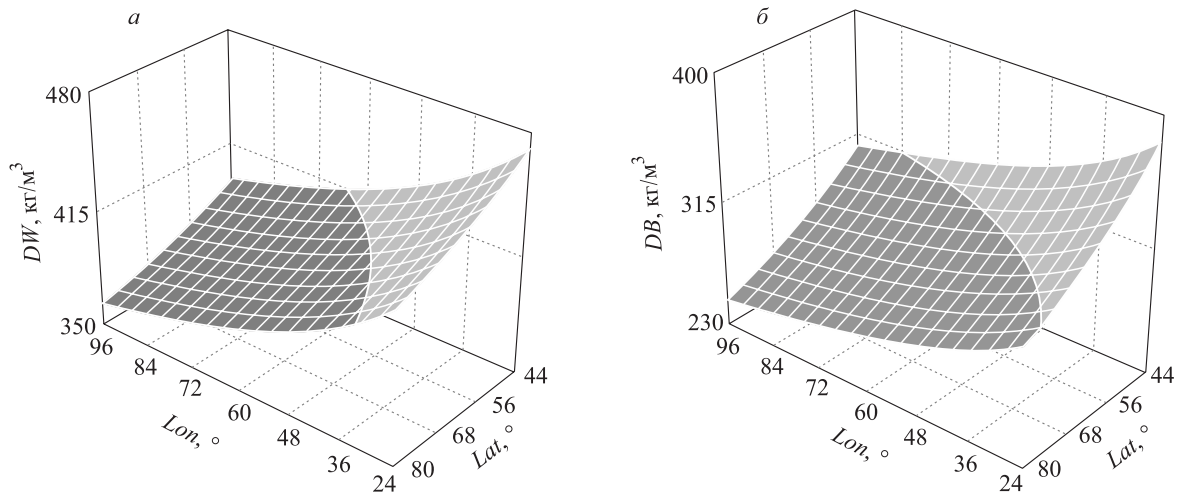


Рис. 1. Расчетные значения БП древесины (а) и коры (б) сосны обыкновенной в градиентах широты и долготы при неизменных дендрометрических показателях дерева.

динат. Поскольку конфигурация трехмерной геометрической интерпретации моделей (2) и (3) для всех древесных видов одна и та же, на рис. 1 она показана только для сосны обыкновенной.

Снижение БП древесины составляет в широтном градиенте 0.25 % на 1° с. ш. и в долготном – 0.26 % на 1° в. д. (рис. 1, а, а для коры – соответственно 0.55 % на 1° с. ш. и 0.28 % на 1° в. д. (рис. 1, б).

Результаты регрессионного анализа дали возможность выполнить вторую задачу нашего исследования – оценить вклады дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры стволов (табл. 3).

Судя по данным табл. 3, дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на уровне 4–14 %, географическое положение – 7–10 %, и наибольший вклад в общую изменчивость БП вносит видовой принадлежность деревьев – 74–87 %. Это соответствует выводу французских исследователей (Kerfriden et al., 2021), что внутривидовая изменчивость БП несопоставимо меньше по сравнению с межвидовой.

Столь высокий вклад в изменчивость БП видовой принадлежности предполагает очень большое различие видов по данному показателю, и в этой связи представляет интерес их ранжирование.

Диаграмма распределения древесных видов по БП построена по средним для всех видов значениям возраста дерева (45 лет) и его высоты (13.8 м), в координатах 60° с. ш. и 60° в. д. Диаграмма убывающей последовательности видов по величине БП представлена на рис. 2.

Базисная плотность древесины снижается в последовательности: дуб, лиственница, береза, осина, липа, сосна, ель, кедр и пихта (рис. 2). Закономерность снижения БП коры совершенно другая: кедр, береза, осина, липа, ель, пихта, лиственница, дуб и сосна. Это означает, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Следовательно, при оценке фитомассы стволов деревьев в абсолютно сухом состоянии с целью повышения точности результата необходимо замерять объем и массу диска отдельно для древесины и коры, а не диска в коре в целом, как это часто практиковалось и продолжает практиковаться в отечественных (Молчанов, 1971; Казимиров, Морозова, 1973; Казимиров и др., 1977; Семечкина, 1978; Колтунова и др., 2007) и зарубежных (Burger, 1953; Karizumi, 1974; Vyskot, 1981; Broshtilova, 1983; Le Goff, 2019) исследованиях фитомассы деревьев.

Таблица 3. Влияние дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности на изменчивость БП древесины и коры стволов, %

Номер модели	A (I)	H (II)	(I) + (II)	(Lat) (III)	(Lon) (IV)	(III) + (IV)	$\Sigma a_i X_i$
(2)	8.4	5.9	14.3	2.0	10.0	12.0	73.7
(3)	–	4.0	4.0	2.5	6.9	9.4	86.6

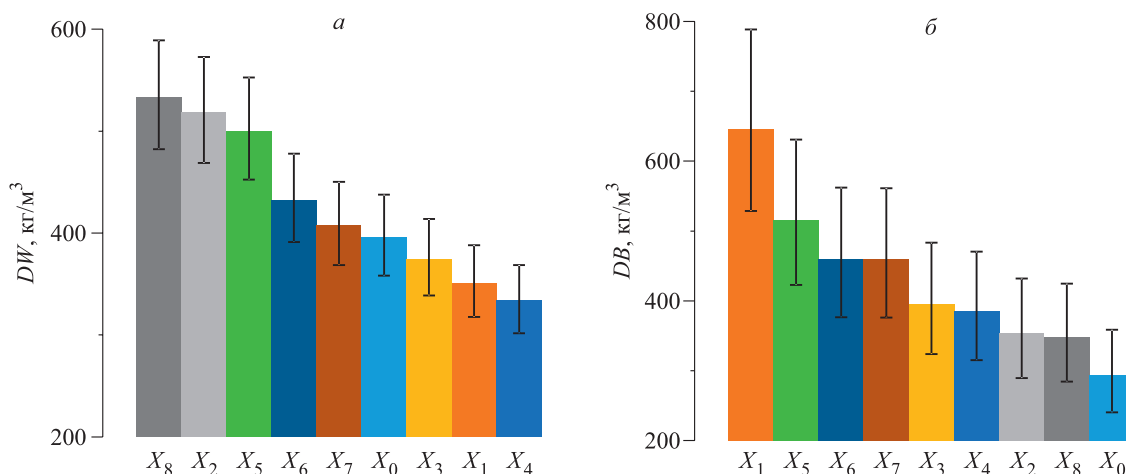


Рис. 2. Базисная плотность древесины (а) и коры (б) равновеликих деревьев 9 лесообразующих видов Евразии в убывающей последовательности. Кодировку древесных видов X₀–X₈ см. в табл. 2.

Таким образом, мы установили статистически значимую закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих стволов деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток в пределах ареалов 9 лесообразующих видов Евразии. Тем самым мы подтвердили ранее выявленное увеличение БП древесины в направлении от полюсов к экватору как в Северном, так и в Южном полушариях (Полубояринов, 1976; Tsoumis, Panagiotidis, 1980). Увеличение БП в направлении с севера на юг было также выявлено в США для некоторых видов сосен, но лишь в отдельных штатах – Техасе, Флориде, Алабаме, а также вдоль Атлантического побережья от Северной Каролины до Флориды (Taras, Saucier, 1968; Koch, 1972). Аналогичные тренды установлены в направлении с севера на юг в Норвегии и Финляндии (Полубояринов, 1976). Иной результат получен по данным 1012 деревьев 60 видов Японии: практически ни по одному виду не было выявлено региональных различий по БП (Fujiwara et al., 2007). Не установлено географических закономерностей в изменении БП также по некоторым видам сосен в США (Saucier, Taras, 1969).

В результате проведенного исследования выявлена статистически значимая положительная связь БП древесины с возрастом дерева и отрицательная с его высотой, что, как отмечалось выше, связано с увеличением доли поздней древесины как с возрастом дерева, так и с изменением его положения в древесном пологе по классу Крафта. Тем самым мы подтвердили ранее установленные закономерности повышения БП с возрастом дерева у сосны ладанной (*Pinus*

taeda L.) (Larson et al., 2001), в культурах сосны обыкновенной (Андрущенко, 1977), а также у дуба, ясеня (*Fraxinus* L.), ильма (*Ulmus* L.), липы и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в Европейской части России (Молчанов, 1964).

Отрицательная связь БП древесины с размером дерева (связанным с его классом Крафта) показана ранее в сосняках-беломошниках Архангельской области в разных классах возраста (Молчанов, 1974), у ели в Карелии (Казимиров, Морозова, 1973) и у псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) в США (Vahey et al., 2007). Однако противоположная закономерность показана в сосняках Сибири (Гордина, 1985), а также в сосняках, ельниках и березняках Латвии (Lierpiņš J., Lierpiņš K., 2017). Согласно исследованию, проведенному в субтропиках Китая (Chen et al., 2017), повышенная БП у подавленных деревьев по отношению к деревьям-лидерам наблюдалась лишь у теневыносливых видов, а у светолюбивых закономерность была противоположной.

Выявленная отрицательная связь БП коры с высотой дерева связана, по-видимому, с увеличением доли корки (омертвевшей наружной части коры) по мере увеличения высоты дерева и связанного с ней возраста. Насколько нам известно, какие-либо закономерности изменения БП коры с размером и возрастом дерева в литературе отсутствуют. Косвенно указанную закономерность изменения БП с высотой дерева подтверждают результаты А. П. Андрущенко (1977), установившего снижение БП коры в культурах сосны обыкновенной с 330 до 306 кг/м³ при увеличении возраста с 26 до 100 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенные в нашей работе модели зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев позволили установить статистически значимую закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток, действительную в пределах ареалов 9 лесообразующих видов Евразии.

В построенных моделях дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на 4–14 % и географическое положение – на 7–10 %. Наибольший вклад в объяснение общей изменчивости БП (74–87 %) вносит видовой принадлежность деревьев.

Установлено, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Следовательно, при оценке фитомассы стволов деревьев в абсолютно сухом состоянии с целью повышения точности результата необходимо замерять объем и массу диска отдельно для древесины и коры, а не диска в коре в целом.

Установленные закономерности изменения БП древесины и коры основных лесообразующих видов Евразии в зависимости от возраста, линейных размеров деревьев и географического положения должны внести вклад в более корректную оценку депонирования углерода в стволах, составляющих наибольшую долю в фитомассе деревьев.

Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрущенко А. П. Надземная фитомасса древостоев разного возраста в свежей субори // Тр. Харьков. с.-х. ин-та. Т. 240. Харьков, 1977. С. 53–56.

Гордина Н. П. Пространственная структура и продуктивность сосняков Нижнего Енисея. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 128 с.

Гусев И. И. Фракционный состав елового древостоя по элементам фитомассы // Учет лесного фонда и организация лесного хозяйства. Красноярск: СибТИ, 1976. Вып. 5. С. 25–30.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Исаева Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90–94.

Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в

сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 304 с.

Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1973. 175 с.

Колтунова А. И., Усольцев В. А., Пальмова Н. В., Балицкий М. И., Кузьмин Н. И., Канунникова О. В. Фитомасса лесных культур в Оренбургской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск: БГИТА, 2007. Вып. 17. С. 176–179.

Мелехов В. И., Бабич Н. А., Корчагов С. А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с.

Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. М.: Наука, 1964. 255 с.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в сосняках-беломошниках // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 24–42.

Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 165 с.

Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. 191 с.

Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.

Billard A., Bauer R., Mothe F., Colin F., Longuetaud F. Vertical variations in wood basic density for two softwood species // Europ. J. For. Res. 2021. V. 140. P. 1401–1416.

Broshtilova M. Aboveground phytomass of young *Quercus longipes* Stev. plantations on two site types // For. Sci. (Sofia). 1983. V. 20. Iss. 6. P. 40–50.

Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. XIII. Mitteilung. Fichten im gleichalterigen Hochwald // Mitteil. Schweiz. Anst. forstl. Versuchsw. 1953. V. 29. Iss. 1. P. 37–130.

Chave J., Muller-Landau H. C., Baker T. R., Easedale T. A., Ter Steege H., Webb C. O. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species // Ecol. Appl. 2006. V. 16. Iss. 6. P. 2356–2367.

Chen L., Xiang W., Wu H., Lei P., Zhang S., Ouyang S., Deng X., Fang X. Tree growth traits and social status affect the wood density of pioneer species in secondary subtropical forest // Ecol. Evol. 2017. V. 7. Iss. 14. P. 5366–5377.

Donegan E., Sola G., Cheng Z., Birigazzi L., Gamarra J. G.-P., Henry M., Vieilledent G., Chiti T. GlobAllomeTree's wood density database. Rome, Italy, 2014. P. 1–29.

Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z., Sharma R. P., Li H. K. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // J. For. Sci. 2012. V. 58. Iss. 3. P. 101–115.

Fujimoto T., Kita K., Kuromaru M. Genetic control of intraring wood density variation in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) // Wood Sci. Technol. 2008. V. 42. Iss. 3. P. 227–240.

Fujiwara T., Yamashita K., Kuroda K. Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal

- by forests and their variation // Bull. FFPRI. 2007. V. 6. Iss. 4. P. 215–226.
- Gutiérrez O. A., Baonza M. V., Fernández-Golfín Seco J. I., Conde G. M., Hermoso P. E. Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra* // Wood Sci. Technol. 2006. V. 40. Iss. 3. P. 190–204.
- Hakkila P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood // Comm. Inst. For. Fenn. 1966. V. 61. Iss. 5. P. 1–98.
- Jiang Z.-H., Wang X.-Q., Fei B.-H., Ren H.-Q., Liu X.-E. Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohai* // Ann. For. Sci. 2007. V. 64. P. 807–814.
- Karizumi N. The mechanism and function of tree root in the process of forest production. (I). Methods of investigation and estimation of the root biomass // Bull. Gov. For. Exp. Sta. 1974. V. 259. P. 1–99.
- Katze J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I. C., Leadley P. et al. TRY plant trait database – enhanced coverage and open access // Glob. Change Biol. 2020. V. 26. Iss. 1. P. 119–188.
- 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 Ecol. 2021. V. 222. Iss. 3. P. 289–303.
- Kiaei M., Naji H. R., Abdul-Hamid H., Farsi M. Radial variation of fiber dimensions, annual ring width, and wood density from natural and plantation trees of alder (*Alnus glutinosa*) wood // Wood Res. 2016. V. 61. Iss. 1. P. 55–64.
- Kimberley M. O., McKinley R. B., Cown D. J., Moore J. R. Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir // N. Z. J. For. Sci. 2017. V. 47. Iss. 1. P. 1–15.
- Koch P. Utilization of the southern pines. 1. The raw material. USDA For. Serv. Agr. Handbook, 1972. V. 420. 736 p.
- Larson P. R., Kreischmann D. E., Clark A. III, Isebrands J. G. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129P, 2001. 42 p.
- Le Goff N. Above and belowground biomass data for a set of beech trees of different age and crown classes sampled in Hesse state forest (NE France) with a view to analyzing the distribution and the allocation of biomass in the tree, 2019.
- Leban J.-M., Kerfriden B., Jacquin P., Lacarin M., Taupin A., Mola C., Duprez C., Chabot S., Dauffy V., Morneau F., Wurpillot S., Hervé J.-C. Wood basic density for 125 tree forest species from the French forests, 2021.
- Liepiņš J., Liepiņš K. Mean basic density and its axial variation in Scots pine, Norway spruce and birch stems // Res. Rural Dev. 2017. V. 1. P. 21–27.
- Molteberg D., Høibø O. Modelling of wood density and fibre dimensions in mature Norway spruce // Can. J. For. Res. 2007. V. 37. Iss. 8. P. 1373–1389.
- Naji H. R., Nia M. F., Kiaei M., Abdul-Hamid H., Soltani M., Faghihi A. Effect of intensive planting density on tree growth, wood density and fiber properties of maple (*Acer velutinum* Boiss.) // IForest. 2015. V. 9. P. 325–329.
- Nogueira E. M., Fearnside P. M., Nelson B. W. Normalization of wood density in biomass estimates of Amazon forests // For. Ecol. Manag. 2008. V. 256. Iss. 5. P. 990–996.
- Pascoa K., Gomide L., Tng D. Y. P., Scolforo J. R. S., Filho A. C. F., Mello J. M. de. How many trees and samples are adequate for estimating wood-specific gravity across different tropical forests? // Trees. 2020. V. 34. P. 1383–1395.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Kemmerer J., Uhl E. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 // For. Ecol. Manag. 2018. V. 429. P. 589–616.
- Reyes G., Brown S., Chapman J., Lugo A. E. Wood densities of tropical tree species. USDA For. Serv., Southern For. Exp. St., New Orleans. Gen. Tech. Rep. SO-88, 1992. 15 p.
- Roque R. M., Fo M. T. Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate // Invest. Agr.: Sistemas y Recursos For. 2007. V. 16. Iss. 3. P. 267–276.
- Saucier R., Taras M. A. Regional variation in specific gravity of seven pines in the Southern United States. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-45, 1969. 16 p.
- Shepard K. R., Shottafer J. E. Specific gravity and mechanical property-age relationships in red pine // For. Prod. J. 1992. V. 42. Iss. 7/8. P. 60–66.
- Sousa V. B., Louzada J. L., Pereira H. Age trends and within-site effects in wood density and radial growth in *Quercus faginea* mature trees // For. Syst. 2016. V. 25. Iss. 1. e053.
- Taras M. A., Saucier J. R. Wood density surveys of the minor species of yellow pine in the Eastern United States. I. Spruce pine (*Pinus glabra* Walt.). USDA For. Serv. Res. Pap. SE-34, 1968. 15 p.
- Télles J. R. G., Martínez A. V., la Rosa A. B. de, Grande J. C., Mendoza C. P. Radial variation of basic density in *Pinus patula* Schltdl. et Cham. in three locations from Hidalgo state // Rev. Mex. Cien. For. 2011. V. 2. Iss. 7. P. 71–78.
- Thor E., Bates A. L. Relationships of some wood properties of shortleaf pine with radial growth and site factors // TAPPI. 1970. V. 53. P. 290–294.
- Trendelenburg R., Mayer-Wegelin H. Das Holz als Rohstoff. München: Carl Hanser Verlag, 1955. 541 p.
- Tsoumis G., Panagiotidis N. Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.) // Wood Sci. Technol. 1980. V. 14. P. 301–310.
- Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: CD-monograph. Yekaterinburg: Ural St. For. Engineer. Univ.; Bot. Garden Rus. Acad. Sci., Ural Br., 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- Usoltsev V. A., Shobairi S. O. R., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. Augmentative modelling: A template for *Populus* sp. stand biomass in Eurasia region // Ind. For. 2021a. V. 147. Iss. 3. P. 224–229.
- Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest // Ecol. Quest. 2021b. V. 32. Iss. 1. P. 29–36.
- Vahey D. W., Zhu J. Y., Scott C. T. Wood density and anatomical properties in suppressed-growth trees: Comparison of two methods // Wood Fiber Sci. 2007. V. 39. Iss. 3. P. 462–471.
- 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 // Ann. For. Sci. 2019. V. 76. Iss. 3. P. 1–12.

- Vyskot M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.
- Wiemann M. C., Williamson G. B. Geographic variation in wood specific gravity: Effects of latitude, temperature, and precipitation // Wood Fiber Sci. 2002. V. 34. Iss. 1. P. 96–107.
- Yang K.-C. Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of white spruce (*Picea glauca*) // Taiwan Lin Ye Ke Xue. 2002. V. 17. Iss. 1. P. 13–29.
- Yang K. C., Hazenberg G. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana* // Can. J. For. Res. 2011. V. 24. Iss. 5. P. 996–1007.
- Yeboah D., Burton A. J., Storer A. J., Opuni-Frimpong E. Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana // New For. 2014. V. 45. Iss. 1. P. 35–52.
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen S., Lewis S. L., Miller R. B., Swenson N. G., Wiemann M. C., Chave J. Global wood density database. Dryad, 2009. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>
- Zeng W. S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China // Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Intech Publ., 2017. P. 3–21.
- Zeng W. S., Zhang H. R., Tang S. Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China // Can. J. For. Res. 2011. V. 41. Iss. 7. P. 1547–1554.
- Zhang L., Shi H. Local modeling of tree growth by geographically weighted regression // For. Sci. 2003. V. 50. Iss. 2. P. 225–244.
- Zhu J. Y., Scott C. T., Scallon K. L., Myers G. C. Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.) // Wood Fiber Sci. 2007. V. 39. Iss. 3. P. 502–512.

GEOGRAPHICAL PATTERNS OF CHANGES IN THE BASIC DENSITY OF WOOD AND BARK OF FOREST-FORMING SPECIES OF EURASIA

V. A. Usoltsev^{1, 2}, I. S. Tsepordey¹

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskii trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Qualimetry of aboveground and underground biomass of trees is an integral part of studies of biological productivity and carbon depositing capacity of forest cover, necessary for the correct assessment of the carbon cycle in its spatial gradients and in relation to climate change. The great bulk of carbon is deposited in tree stems and largely depends on the basic density (BD) of wood and bark. The author's database on the qualimetry of forest-forming species of Northern Eurasia is used in the work. About 3.450 model trees of 9 tree species (genera) were selected from it. The constructed mixed-effects models describing the dependences of the BD of wood and bark on their dendrometric indicators, geographical coordinates and species belonging of trees, revealed a 0.25% decrease in the BD of wood by 1 ° N. in the direction from south to north and 0.26 % decrease by 1 ° E. in the direction from west to east. In the same gradients, the decrease in the BD of the stem bark is 0.55 % by 1 ° N. and 0.28 % by 1 ° E., respectively. The largest share of the explained variability of BD is accounted for by the species of trees – 74 % for wood and 87 % for bark, significantly less – by geographical location – 12 and 9 %, respectively, and the smallest share – by dendrometric indicators of trees 14 and 4 %, respectively. The ranking of species of equal-sized trees by BD value was performed, which showed that each species has a specific ratio of BD of wood and bark. This means that for a more correct assessment of the basic density and carbon deposition in wood and bark, it is necessary to process separately wood and bark of the disks removed from stems, and not the disks over bark as a whole.

Keywords: stem wood and bark, mixed-effects model, geographic latitude and longitude.

How to cite: Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Geographical patterns of changes in the basic density of wood and bark of forest-forming species of Eurasia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 59–68 (in Russian with English abstract).