

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО FORESTRY

Научная статья

УДК 603.907.3:528.94

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>

EDN: CVACMC

Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии

В. А. Усольцев^{1✉}, Н. И. Плюха^{1,2}

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

² Ботанический сад УрО РАН,
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а
Usoltsev50@mail.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты исследование квалитетических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений. Содержание сухого вещества (ССВ) в тканях растений является важным, но недостаточно изученным фактором. Определение ССВ в фитомассе деревьев как меры концентрации в ней органического вещества и углерода является одним из составных этапов при исследовании биологической продуктивности, фитомассы и чистой первичной продукции деревьев и древостоев. Различные фракции фитомассы деревьев различаются по соотношению ССВ и влаги, что влияет на скорость естественного разложения и возврата углерода и элементов питания в окружающую среду. Поскольку ССВ во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии на трансконтинентальном уровне ранее не исследовалось, сформулирована цель исследования – выявить видовые особенности ССВ во фракциях надземной фитомассы, а также соотношения ССВ в различных её фракциях, для чего разработать видоспецифичные регрессионные модели ССВ в фитомассе, описывающие его зависимость от дендрометрических показателей деревьев на территории Евразии. *Объекты и методы.* Для осуществления поставленной цели из авторской базы данных о квалитетических показателях основных пород Северной Евразии взяты 7 068 показателей ССВ в разных фракциях надземной фитомассы 14 лесообразующих видов. На их основе построены модели смешанного типа, в которых вклад дендрометрических показателей и фиктивных переменных, кодирующих видовую принадлежность ССВ, составил соответственно 8 и 92 %. *Результаты.* Установлено, что ССВ в древесине ствола изменяется от 72,5 % у ясеня до 42,7 % у пихты; ССВ в коре ствола – соответственно от 63,4 % у робинии до 44,3 % у ели; ССВ в хвое (листве) от 52,0 % у сосны чёрной до 28,4 % у липы; ССВ в ветвях – соответственно от 69,4 % у ясеня до 46,1 % у липы. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до -10,1 % у ясеня; разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола изменяется от +10,1 % у пихты до -10,3 % у берёзы пушистой; разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) изменяется от +31,4 % у ясеня до -1,2 % у сосны чёрной. *Вывод.* Разработанные регрессионные модели ССВ во фракциях фитомассы показали наличие существенных различий ССВ между фракциями и видами, что необходимо учитывать при оценках углероддепонирующей способности лесообразующих видов Евразии.

Ключевые слова: содержание сухого вещества; древесина и кора ствола; хвоя; листва; ветви; смешанные модели; видовые различия

Финансирование: работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

© Усольцев В. А., Плюха Н. И., 2025

Для цитирования: Усольцев В. А., Плюха Н. И. Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Евразии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 6–18. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>; EDN: CVACMC

Введение

В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты исследование квалитетических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений [1]. Содержание сухого вещества (ССВ) в тканях растений является важным, но недостаточно изученным показателем. Известна положительная взаимосвязь между скоростью фотосинтеза и содержанием воды в тканях [2–5]. Наличие воды в тканях является одним из фундаментальных факторов, регулирующих метаболизм и рост растений [6–9] и влияющих на круговорот углерода и энергетический баланс лесных экосистем [10]. В прикладном аспекте знание соотношений влаги и сухого вещества во фракциях фитомассы растений важно при оценке её калорийности [11, 12].

Известно, что вода необходима для всего живого, поскольку она служит биохимическим реагентом, растворителем и переносчиком питательных веществ. Наличие воды в значительной степени определяет продуктивность экосистем и их углеродный баланс [8], о чём свидетельствует гибель деревьев во всём мире, вызванная засухами [13, 14], хотя есть и иное мнение [15].

Определение ССВ в фитомассе деревьев как меры концентрации в ней органического вещества и углерода [16] является одним из составных этапов при исследовании фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) деревьев и древостоев. ССВ в листе наиболее тесно связано с ЧПП по сравнению с удельной поверхностью листовой (отношением её поверхности к сухой массе). Показатель ССВ в листе рекомендован также в качестве наиболее надёжного показателя плодородия почвы, по крайней мере, в условиях достаточного влагообеспечения [17]. Было показано, что ССВ в листьях

отражает адаптационную стратегию растений, снижаясь по мере увеличения нестабильности субстрата в первичных вулканических отложениях [18].

По другим источникам, для диагностики почвенного плодородия и теневыносливости растений показатель ССВ в листе менее предпочтителен по сравнению с её удельной поверхностью [19]. Установлено, что ССВ в листьях достоверно ($P < 0,05$) отличается у однолетних растений (20 %) по сравнению с многолетними (31 %) [20]. Различные фракции фитомассы деревьев различаются анатомически и по соотношению ССВ и влаги, что влияет на скорость естественного разложения и возврата углерода и элементов питания в окружающую среду [21]. Сегодня в исследованиях фитомассы стволов деревьев превалирует раздельная оценка ССВ в древесине и коре [22, 23].

Обычно ССВ определяется гравиметрически, т. е. деструктивным способом путём взятия, обмера и взвешивания образцов тканей растений, что чрезвычайно затрудняет отслеживание динамики этого показателя в живом растении. Имеются различные сенсорные технологии, позволяющие коррелировать ССВ с другими, легко измеряемыми параметрами. Однако большинство существующих методов не позволяют неинвазивно измерять ССВ напрямую. Этот методологический пробел может восполнить релаксометрия на основе ядерного магнитного резонанса, который даёт возможность неинвазивно обнаруживать протоны в тканях растений и на основе этих измерений количественно определять ССВ в них [24].

Насколько нам известно, ССВ во фракциях надземной фитомассы лесообразующих видов Северной Евразии на трансконтинентальном уровне ранее не исследовалось.

Таблица 1. Распределение 7 068 измерений ССВ в надземной фитомассе 14 видов с характеристикой исходных данных
Table 1. Distribution of 7,068 measurements of DMC in the aboveground phytomass of 14 species with the characteristics of the source data

Вид	Регион	n	Диапазоны							
			A, лет	D, см	S _{sw} , %	S _{sb} , %	S _f , %	S _b , %	Координаты	
									с. ш., °	в. д., °
<i>Pinus sylvestris</i> L.	Центр Северной Евразии	879	7-290	1,0-56,0	31,2-68,8	33,3-72,4	31,0-61,2	25,0-65,5	44,6-64,3	24,3-97,0
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>Pallasiana</i> (Lamb.) Holmboe	Крым	17	7-72	6,7-33,0	43,0-55,3	51,0-67,7	46,0-56,7	43,9-55,5	44,6-45,2	33,4-35,1
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	Центр Северной Евразии	210	10-185	1,0-51,5	32,9-65,3	31,3-77,6	29,3-56,5	32,1-65,4	48,5-64,0	24,0-39,5
<i>Abies alba</i> Mill.	Украинские Карпаты	46	8-94	1,6-46,2	33,1-57,2	31,8-57,2	41,3-53,1	42,0-61,1	48,2-49,5	22,7-25,0
<i>Betula pubescens</i> Ehrh	Северо-запад РФ	111	10-142	1,0-40,0	32,4-69,4	48,6-86,6	20,7-59,9	23,6-74,3	61,5-64,0	34,5-39,5
<i>B. pendula</i> Roth.	Центр Северной Евразии	194	8-98	1,0-44,0	41,1-67,2	35,6-77,7	23,8-67,6	40,2-76,6	48,1-55,8	25,9-83,0
<i>Populus tremula</i> L.	Центр Северной Евразии	74	3-55	1,1-32,0	43,9-68,0	34,0-67,5	28,1-66,0	42,9-79,8	51,2-61,8	30,7-82,8
<i>Tilia cordata</i> Mill.	Центр Русской равнины	18	26-77	1,6-38,6	47,9-58,1	47,2-54,0	24,4-34,0	43,2-49,5	51,4-55,8	37,4-42,0
<i>Quercus robur</i> L.	Украинская лесостепь	67	8-128	3,0-46,1	40,4-66,1	44,7-77,2	38,0-62,0	47,7-67,6	49,0-51,5	31,0-33,0
<i>Fagus sylvatica</i> L.	Украинские Карпаты	17	10-62	2,5-23,3	51,3-62,4	39,0-55,2	36,0-52,0	47,3-58,8	48,0-49,0	23,5-26,0
<i>Alnus glutinosa</i> L.	Украинское Полесье	71	7-71	3,2-33,3	42,4-60,7	38,0-68,1	29,0-49,0	45,8-60,9	49,0-51,5	24,0-33,2
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Украинская лесостепь	21	7-80	3,6-39,6	62,7-77,8	46,6-79,6	28,7-44,0	61,7-72,1	49,0-50,0	27,0-30,0
<i>Carpinus betulus</i> L.	Украинская лесостепь	27	7-89	1,7-24,8	42,5-70,6	38,5-65,0	24,2-54,3	48,7-64,1	49,0-50,0	27,0-32,5
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Украинская степь	15	3-89	4,5-28,6	49,7-69,5	47,6-70,4	38,8-52,3	47,8-70,5	48,2-48,5	34,3-36,0

Примечание: n – число модельных деревьев; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; S_{sw}, S_{sb}, S_f, S_b – соответственно ССВ в древесине, коре, хвое и ветвях, %.

Цель предлагаемого исследования – выявить видовые особенности ССВ во фракциях надземной фитомассы, а также соотношения ССВ в различных её фракциях на основе регрессионного моделирования ССВ в фитомассе.

Объекты и методы исследования

Основу нашего исследования составила база данных о квалитетических показателях фитомассы деревьев лесообразующих древесных видов Центральной Евразии [25]. Из упомянутой базы данных отобраны 7 068 показателей ССВ в надземной фитомассе 14 лесообразующих видов. Их характеристика дана в табл. 1. Методика получения фактических данных о ССВ была изложена ранее [26]. В упомянутой работе [26] была применена модель смешанного типа [27, 28], в которую включены в качестве независимых переменных возраст дерева и диаметр ствола, а региональная принадлежность исходных данных была учтена введением в модель

фиктивных переменных. В настоящем исследовании фиктивными переменными кодируется видовая принадлежность исходных данных согласно табл. 2.

Результаты и их обсуждение

С учётом изложенного принята структура модели:

$$\ln(Si) = a_0 + a_1 \ln(A) + a_2 \ln(D) + \sum b_i X_i, \quad (1)$$

где Si – ССВ в i -й фракции фитомассы; $\sum b_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве $(i+1)$. Результаты расчёта модели (1) даны в табл. 3, где численные (дендрометрические) независимые переменные значимы на уровне от $p < 0,001$ до $p < 0,05$. Соотношение фактических и расчётных по модели (1) данных (рис. 1) свидетельствует об отсутствии корреляции остатков. Результаты анализа вкладов численных и фиктивных независимых переменных модели (1) в объяснение изменчивости ССВ во фракциях приведены в табл. 4.

Таблица 2. Схема кодирования блоком фиктивных переменных принадлежности исходных данных к разным видам

Table 2. The coding scheme using a set of dummy variables to encode the belonging of source data to different species

Вид	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
<i>Pinus sylvestris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinus nigra</i> subsp.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea abies</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Abies alba</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Betula pubescens</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>B. pendula</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Populus tremula</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Tilia cordata</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Quercus robur</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Fagus sylvatica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Alnus glutinosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Fraxinus excelsior</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Carpinus betulus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 3. Результаты расчёта модели (1)

Table 3. Calculation results according to the model (1)

Обозначение регрессионных коэффициентов и независимых переменных	Зависимая переменная			
	$\ln S_{sw}$	$\ln S_{sb}$	$\ln S_f$	$\ln S_b$
a_0^*	3,5520	3,7678	3,7698	3,7679
$a_1 \ln A$	0,1051	0,0583	0,0198	0,0328
$a_2 \ln D$	-0,0383	-	-	-0,0143
<i>Pinus sylvestris</i> $b_0 X_0$	3,5520	3,7678	3,7698	3,7679
<i>Pinus nigra</i> $b_1 X_1$	0,0880	0,1467	0,1057	0,0728
<i>Picea abies</i> $b_2 X_2$	0,0266	-0,1987	-0,0133	0,0771
<i>Abies alba</i> $b_3 X_3$	-0,0955	-0,1475	0,0062	0,1052
<i>Betula pubescens</i> $b_4 X_4$	0,1103	0,1428	-0,1636	0,0508
<i>B. pendula</i> $b_5 X_5$	0,1989	0,1378	-0,2204	0,1769
<i>Populus tremula</i> $b_6 X_6$	0,2532	-0,0372	-0,0635	0,2130
<i>Tilia cordata</i> $b_7 X_7$	0,0956	-0,0964	-0,4982	-0,0244
<i>Quercus robur</i> $b_8 X_8$	0,2371	0,0721	-0,0372	0,1965
<i>Fagus sylvatica</i> $b_9 X_9$	0,2247	-0,0751	-0,0476	0,1261
<i>Alnus glutinosa</i> $b_{10} X_{10}$	0,1258	-0,0134	-0,1854	0,0913
<i>Fraxinus excelsior</i> $b_{11} X_{11}$	0,4342	0,1348	-0,2330	0,3859
<i>Carpinus betulus</i> $b_{12} X_{12}$	0,2220	0,0010	-0,0685	0,2031
<i>Robinia pseudoacacia</i> $b_{13} X_{13}$	0,2580	0,1606	-0,0640	0,2619
Показатели адекватности модели				
Коэффициент детерминации**	0,570	0,355	0,333	0,365
Стандартная ошибка модели	0,100	0,131	0,131	0,106

Примечание: здесь и далее – * свободный член в моделях скорректирован на величину поправки $\exp(SE^2/2)$ [29]; ** – коэффициент детерминации здесь и далее скорректирован на число переменных.

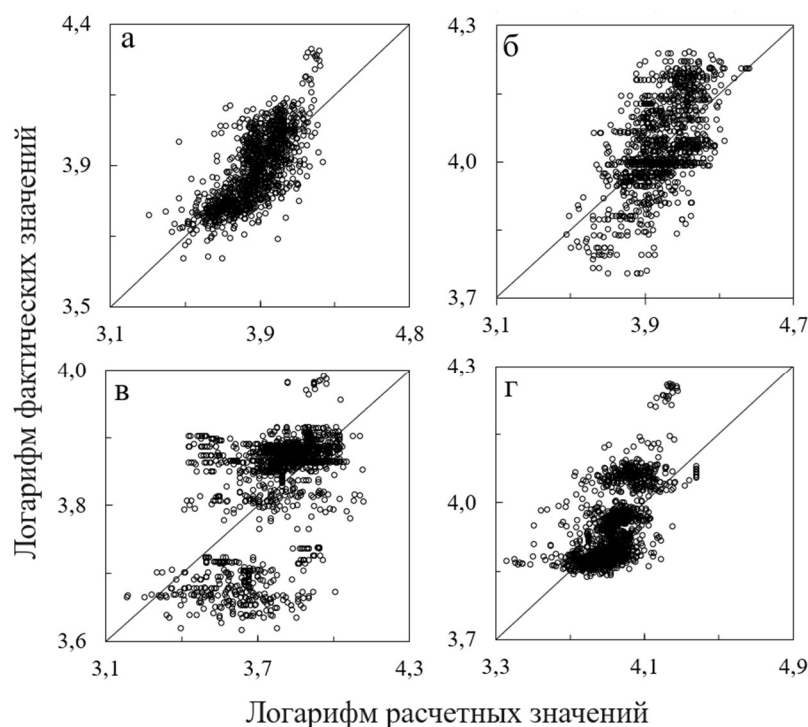


Рис. 1. Соотношение фактических и расчётных по модели (1) данных для ССВ в древесине (а), коре (б), листве (хвое) (в) и ветвях (г)

Fig. 1. The ratio of actual data and data calculated according to the model (1) for DMC in wood (a), bark (b), (needle) foliage (c), and branches (d)

Таблица 4. Вклад независимых переменных модели (1) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %

Table 4. Contribution of the independent variables of the model (1) to the explanation of the variation of dependent variables, %

Вклад в объяснение изменчивости зависимой переменной:	Зависимая переменная				
	lnSbk	lnSt	lnSf	lnSb	в среднем по всем фракциям
- численных переменных	6	14	5	8	8,3±4,0
- фиктивных переменных	94	86	95	92	91,7±4,0

Судя по данным табл. 4, численные переменные объясняют изменчивость ССВ на уровне от 5 до 14 % (в среднем 8,3±4,0 %), и наибольший вклад в объяснение общей изменчивости ССВ вносит видовая принадлежность деревьев – 86–95 % (в среднем 91,7±4,0 %).

Путём подстановки в модели (1) средних значений возраста (43 года) и диаметра ствола (14,2 см) деревьев получены средние для каждого вида значения ССВ со среднеквадратическими отклонениями, ранжирование которых в убывающем порядке представлено на рис. 2.

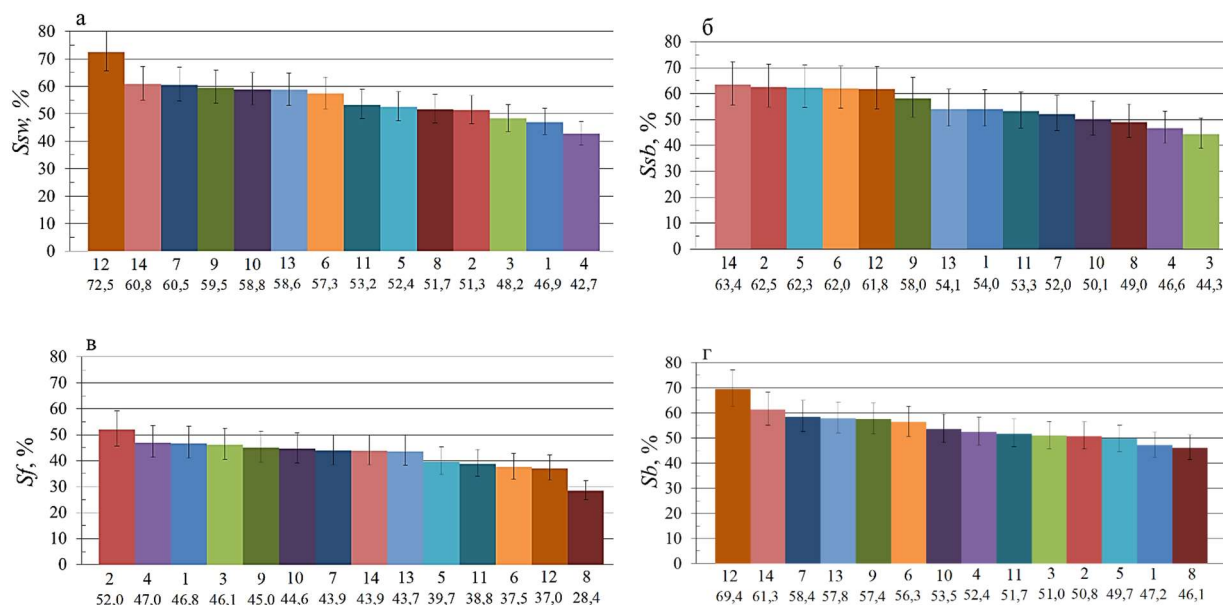


Рис. 2. Ранжирование видов по величине ССВ в разных фракциях надземной фитомассы; а, б, в, г – соответственно ССВ в древесине ствола, коре ствола, хвое и ветвях, %. Цифры вдоль оси абсцисс показывают значения ССВ для соответствующих видов. Обозначения видов: 1 – *Pinus sylvestris*, Центр Северной Евразии; 2 – *Pinus nigra*, Крым; 3 – *Picea abies*, Центр Северной Евразии; 4 – *Abies alba*, Украинские Карпаты; 5 – *Betula pubescens*, Северо-запад РФ; 6 – *B. pendula*, Центр Северной Евразии; 7 – *Populus tremula*, Центр Северной Евразии; 8 – *Tilia cordata*, Центр Русской равнины; 9 – *Quercus robur*, Украинская лесостепь; 10 – *Fagus sylvatica*, Украинские Карпаты; 11 – *Alnus glutinosa*, Украинское Полесье; 12 – *Fraxinus excelsior*, Украинская лесостепь; 13 – *Carpinus betulus*, Украинская лесостепь; 14 – *Robinia pseudoacacia*, Украинская степь

Fig. 2. Ranking of species based on DMC in different fractions of aboveground phytomass; a, b, c, d – DMC in stem wood, stem bark, needles and branches, respectively, %. The numbers along the abscissa axis show DMC values for respective species. Species designations: 1 – *Pinus sylvestris*, Center of Northern Eurasia; 2 – *Pinus nigra*, Crimea; 3 – *Picea abies*, Center of Northern Eurasia; 4 – *Abies alba*, Ukrainian Carpathians; 5 – *Betula pubescens*, North-West of the Russian Federation; 6 – *B. pendula*, Center of Northern Eurasia; 7 – *Populus tremula*, Center of Northern Eurasia; 8 – *Tilia cordata*, Center of the Russian Plain; 9 – *Quercus robur*, Ukrainian forest-steppe; 10 – *Fagus sylvatica*, Ukrainian Carpathians; 11 – *Alnus glutinosa*, Ukrainian Polesie; 12 – *Fraxinus excelsior*, Ukrainian forest-steppe; 13 – *Carpinus betulus*, Ukrainian forest-steppe; 14 – *Robinia pseudoacacia*, Ukrainian steppe

Как было отмечено выше, важное значение имеет знание соотношений ССВ в разных фракциях фитомассы у разных видов, чему в литературе практически не уделяется внимание. С целью восполнить этот пробел, используя данные 7 068 измерений ССВ в надземной фитомассе 14 видов (табл. 1), нами рассчитаны регрессионные модели для четырёх соотношений ССВ в разных фракциях фитомассы (табл. 5). За основу принята структура модели (1) с той разницей, что в качестве зависимой переменной принимается не ССВ в той или иной фракции фитомассы, а попарная разность ССВ во фракциях, в частности, между корой ствола и его древесиной ($Ssb-Ssw$), ветвями и древесиной ствола ($Sb-Ssw$), корой ствола и вет-

вями ($Ssb-Sb$) и, наконец, между ветвями и листвой (хвоей) ($Sb-Sf$), без их логарифмирования:

$$\Delta Si = a_0 + a_1 A + a_2 D + a_3 D^2 + \sum b_i X_i, \quad (2)$$

где ΔSi – разность ССВ между двумя фракциями фитомассы. Приведённые в табл. 5 численные (дендрометрические) независимые переменные значимы на уровне от $p < 0,001$ до $p < 0,05$.

Путём подстановки в модели (2) средних значений возраста (44 года) и диаметра ствола (14,2 см) деревьев получены средние для каждого вида разности ССВ (%) со среднеквадратическими отклонениями, ранжирование которых в плюсовом и минусовом порядке представлено на рис. 3.

Таблица 5. Результаты расчёта модели (2) для попарных разностей ССВ во фракциях фитомассы
Table 5. Calculation results according to the model (2) for pairwise differences of DMC in phytomass fractions

Обозначение регрессионных коэффициентов и независимых переменных	Зависимая переменная			
	$Ssb-Ssw$	$Sb-Ssw$	$Ssb-Sb$	$Sb-Sf$
a_0	6,561	2,509	5,197	1,072
$a_1 A$	-0,046	-0,022	-	-0,016
$a_2 D$	0,290	-0,071	0,074	-
$a_3 D^2$	-0,0056	-	-	0,0011
<i>Pinus sylvestris</i> $b_0 X_0$	6,561	2,509	5,197	1,072
<i>Pinus nigra</i> subsp. $b_1 X_1$	4,120	-0,282	5,190	-1,759
<i>Picea abies</i> $b_2 X_2$	-10,631	1,744	-14,014	5,079
<i>Abies alba</i> $b_3 X_3$	-3,375	9,545	-12,033	4,456
<i>Betula pubescens</i> $b_4 X_4$	-1,030	-10,852	9,054	10,204
<i>B. pendula</i> $b_5 X_5$	-2,761	0,392	-2,219	17,306
<i>Populus tremula</i> $b_6 X_6$	-14,404	0,075	-14,570	11,948
<i>Tilia cordata</i> $b_7 X_7$	-9,112	-6,581	-2,710	17,441
<i>Quercus robur</i> $b_8 X_8$	-8,148	-0,723	-5,363	11,258
<i>Fagus sylvatica</i> $b_9 X_9$	-15,653	-5,057	-9,561	8,220
<i>Alnus glutinosa</i> $b_{10} X_{10}$	-6,608	-0,765	-4,965	11,827
<i>Fraxinus excelsior</i> $b_{11} X_{11}$	-17,574	-1,483	-15,330	30,791
<i>Carpinus betulus</i> $b_{12} X_{12}$	-11,442	-1,280	-9,088	13,430
<i>Robinia pseudoacacia</i> $b_{13} X_{13}$	-5,622	0,343	-5,083	16,523
Показатели адекватности модели:				
коэффициент детерминации	0,316	0,170	0,303	0,489
стандартная ошибка модели	7,20	6,39	7,87	6,95

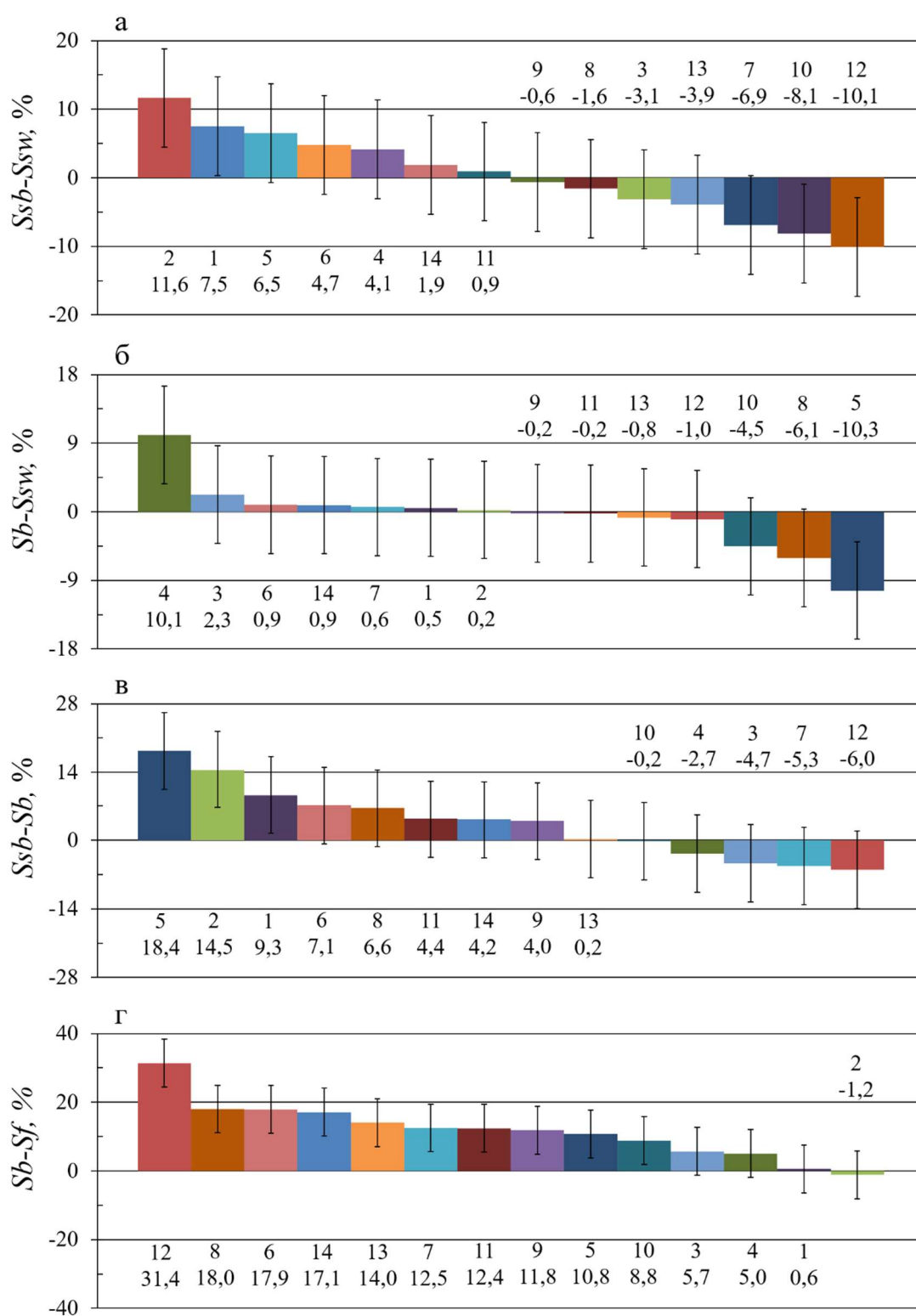


Рис. 3. Ранжирование разностей ССВ различных фракций фитомассы деревьев в плюсовом и минусовом порядке. Обозначения ССВ во фракциях см. табл. 1; обозначения видов см. рис. 2
 Fig. 3. Ranking of differences in DMC of different tree phytomass fractions in positive and negative order. Designations of DMC in fractions are given in Table 1; see Fig. 2 for species designations

Согласно рис. 3, а, разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола последовательно изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до +0,9 % у ольхи, а затем от -0,6 у дуба до -10,1 % у ясеня. Разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола (рис. 3, б) последовательно изменяется от +10,1 % у пихты до +0,2 % у сосны чёрной, а затем от -0,2 у дуба до -10,3 % у берёзы пушистой. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях (рис. 3, в) изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до +0,2 % у граба, а затем от -0,2 % у бука до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) (рис. 3, г) изменяется от +31,4 % у ясеня до +0,6 % у сосны обыкновенной и составляет -1,2 % у сосны чёрной.

Выводы

1. Построенные в нашей работе модели зависимости ССВ во фракциях фитомассы деревьев от возраста дерева и диаметра ствола, дифференцированные по лесообразующим видам Евразии, характеризуются коэффициентами детерминации в диапазоне от 0,333 до 0,570 и значимостью коэффициентов регрессии на уровне $p < 0,05$.

2. Ранжирование видов по величине ССВ во фракциях фитомассы показало наличие существенных различий между фракциями и видами. ССВ в древесине ствола изменяется от 72,5 % у ясеня до 42,7 % у пихты; ССВ в коре ствола – соответственно от 63,4 % у робинии до 44,3 % у ели; ССВ в хвое (листве) от 52,0 % у сосны чёрной до 28,4 % у липы; ССВ в ветвях – соответственно от 69,4 % у ясеня до 46,1 % у липы.

3. Разность ССВ в коре ствола минус ССВ в древесине ствола изменяется от +11,6 % у сосны чёрной до -10,1 % у ясеня; разность ССВ в ветвях минус ССВ в древесине ствола изменяется от +10,1 % у пихты до -10,3 % у берёзы пушистой; разность ССВ в коре ствола минус ССВ в ветвях изменяется от +18,4 % у берёзы пушистой до -6,0 % у ясеня. Наконец, разность ССВ в ветвях минус ССВ в хвое (листве) изменяется от +31,4 % у ясеня до -1,2 % у сосны чёрной.

4. Представленные закономерности изменения ССВ в различных фракциях фитомассы могут быть полезны при оценках углероддепонирующей способности лесообразующих видов Евразии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Morrow C. D., Gorman T. M., Evans J. W. et al. Prediction of Wood Quality in Small-Diameter Douglas-Fir Using Site and Stand Characteristics. *Wood and Fiber Science*. 2013;45(1):49–61.
2. Williams T. G., Flanagan L. B. Effects of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against $^{13}\text{CO}_2$ and $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ in *Pleurozium* and *Sphagnum*. *Oecologia*. 1996;108(1):38–46. DOI: 10.1007/BF00333212
3. Lawlor D. W., Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*. 2002;25(2):275–294. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x
4. Lawlor D. W., Tezara W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*. 2009;103(4):561–579. DOI: 10.1093/aob/mcn244
5. Sibby R. M., Brown J. H., Kodric-Brown A. (Eds.) *Metabolic Ecology: A Scaling Approach*. Chichester, UK, Wiley-Blackwell Press; 2012. 392 p. DOI: 10.1002/9781119968535
6. Wilson P., Thompson K., Hodgson J. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist*. 1999; 143(1):155–162. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x
7. Breshears D. D., Myers O. B., Meyer C. W. et al. Tree die-off in response to global change-type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2009;7(4):185–189. DOI: 10.1890/080016
8. Anderson-Teixeira K. J., Delong J. P., Fox A. M. et al. Differential responses of production and respiration to temperature and moisture drive the carbon balance across a climatic gradient in New Mexico. *Global Change Biology*. 2011;17(1):410–424. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02269.x

9. Huang H., Ran J., Ji M. et al. Water content quantitatively affects metabolic rates over the course of plant ontogeny. *New Phytologist*. 2020;228(5): 1524–1534. DOI: 10.1111/nph.16808
10. Wang Z., Huang H., Wang H. et al. Leaf water content contributes to global leaf trait relationships. *Nature Communications*. 2022;13(1): 5525. DOI: 10.1038/s41467-022-32784-1
11. Kumar H., Baredar P., Agrawal P. et al. Effect of moisture content on gasification efficiency in down draft gasifier. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014;3(4):411–413.
12. Kirsanovs V., Žandeckis A., Blumberga D. et al. The influence of process temperature, equivalence ratio and fuel moisture content on gasification process: A review. In: *27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014)*: Proceedings (Finland, Turku, June 15–19, 2014). Turku: Abo Akademi University; 2014;1:1046–1060.
13. Anderegg W. R. L., Kane J. M., Anderegg L. D. L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*. 2013;3(1):30–36. DOI: 10.1038/nclimate1635
14. Chen R. F., Ran J. Z., Huang H. et al. Life history strategies drive size-dependent biomass allocation patterns of dryland ephemerals and shrubs. *Ecosphere*. 2019;10(4):e02709. DOI: 10.1002/ecs2.2709
15. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Bazhina E. V. et al. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains. *Forests*. 2022;13(9):1378. DOI: 10.3390/f13091378
16. Shipley B., Vu T.-T. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts. *New Phytologist*. 2002;153(2):359–364. DOI: 10.1046/j.0028-646X.2001.00320.x
17. Smart S. M., Glanville H. C., del Carmen Blanes M. et al. Leaf dry matter content is better at predicting above-ground net primary production than specific leaf area. *Functional Ecology*. 2017;31(6): 1336–1344. DOI: 10.1111/1365-2435.12832
18. Korablev A. P., Sandalova E. V., Arapov K. A. et al. Biomorphological traits and leaf dry matter content are important to plant persistence in a highly unstable volcanic ground. *Nature Conservation Research*. 2024;9(2):73–89. DOI: 10.24189/ncr.2024.015
19. Hodgson J. G., Montserrat-Marti G., Charles M. et al. Is leaf dry matter content a better predictor of soil fertility than specific leaf area. *Annals of Botany*. 2011;108(7):1337–1345. DOI: 10.1093/aob/mcr225
20. Li Y., Johnson D. A., Su Y. et al. Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. 2005;46(2):127–134.
21. Huet S., Forgeard F., Nys C. Above- and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. *Annals of Forest Science*. 2004;61(7): 683–694. DOI: 10.1051/forest:2004063
22. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Содержание сухого вещества в биомассе деревьев 13 видов Евразии: географические аспекты // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 3. С. 194–201. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-194-201; EDN: IXXMOW
- Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Dry matter content in the biomass of trees of 13 species of Eurasia: geographical aspects *Conifers of the Boreal Area*. 2022;40(3):194–201. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-194-201; EDN: IXXMOW (In Russ.).
23. Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии: монография. Екатеринбург: Учебно-методический центр УПИ, 2023. 467 с. URI: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- Tsepordey I. S. Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia. *Monograph*. Yekaterinburg, Publishing House of the UPI Educational and Methodological Centre; 2023. 467 p. Available from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450> (In Russ.).
24. Windt C. W., Nabel M., Kochs J. et al. A mobile NMR sensor and relaxometric method to non-destructively monitor water and dry matter content in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12: 617768. DOI: 10.3389/fpls.2021.617768
25. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. *Monograph*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. Available from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
26. Усольцев В. А., Плюха Н. И., Цепордей И. С. Региональные особенности содержания сухого вещества во фракциях фитомассы деревьев сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 3 (63). С. 6–19. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.3.6; EDN: MQBVKU
- Usoltsev V. A., Plukha N. I., Tsepordey I. S. Regional peculiarities of dry matter content in the phytomass fractions of Scots pine trees. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024;(3):6–19. DOI: 10.25686/2306-2827.2024.3.6; EDN: MQBVKU (In Russ.).
27. Zeng W. S. Using nonlinear mixed model and dummy variable model approaches to construct origin-based single tree biomass equations. *Trees*. 2015;29(1):275–283. DOI: 10.1007/s00468-014-1112-0
28. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width

model for Prince Rupprecht larch in northern China. *Forest Ecology and Management*. 2017;389:364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034

29. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*. 1972;2(1):49–53. DOI: 10.1139/x72-009

Статья поступила в редакцию 15.07.2024; одобрена после рецензирования 15.09.2024; принята к публикации 25.11.2024

Информация об авторах

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация, фитогеография. Автор 930 научных публикаций, в том числе 43 монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN-код: 3668-6843

ПЛЮХА Николай Иванович – аспирант, Институт леса и природопользования, Уральский государственный лесотехнический университет; младший научный сотрудник, Ботанический сад УрО РАН. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация. Автор 19 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN-код: 4682-7412

Доступность данных и материалов: наборы данных, проанализированные в ходе исследования, являются общедоступными.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>

EDN: CVACMC

Dry Matter Content in Fractions of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia**V. A. Usoltsev ^{1✉}, N. I. Plyukha^{1,2}**¹ Ural State Forest Engineering University,

37, Sibirskii Trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

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

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

Usoltsev50@mail.ru ✉

Abstract. *Introduction.* In the context of the continuously increasing global role of the planet's forest cover, the study of qualimetric indicators of trees and stands is becoming one of the priorities. The dry matter content (DMC) in plant tissues is an important but insufficiently studied factor. Determination of DMC in the phytomass of trees as a measure of organic matter and carbon concentrations in it is an essential stage in studying biological productivity, phytomass and net primary production of trees and stands. Various fractions of tree phytomass differ in the DMC-moisture ratio, which affects the rate of natural decomposition and the return of carbon and nutrients to the environment. Since DMC in fractions of the aboveground phytomass of forest-forming species of Eurasia have not been previously studied at the transcontinental level, *the aim of this study* is to identify species-specific features of DMC in the aboveground phytomass fractions, as well as the DMC ratios in its various fractions, for which species-specific regression models of DMC in phytomass should be developed that will describe its dependence on dendrometric indicators of trees in Eurasia. *Objects and methods.* To achieve this aim, 7,068 indicators of DMC in different fractions of aboveground phytomass of 14 forest-forming species were selected from the author's database on the qualimetry of the main species of Eurasia. Based on them, mixed-type models were built, in which the contribution of dendrometric indicators and dummy variables encoding the belonging of DMC to certain species amounted to 8 and 92 %, respectively. *Results.* It was found that DMC in the stem wood varies from 72.5 % in *Fraxinus excelsior* to 42.7 % in *Abies alba*; DMC in the stem bark varies from 63.4 % in *Robinia pseudoacacia* to 44.3 % in *Picea abies*, respectively; DMC in (needle) foliage varies from 52.0 % in *Pinus nigra* to 28.4 % in *Tilia cordata*; DMC in branches varies from 69.4 % in *Fraxinus* to 46.1 % in *Tilia*, respectively. The difference between DMC in the stem bark and DMC in the stem wood varies from +11.6 % in *Pinus nigra* to -10.1 % in *Fraxinus*; the difference between DMC in the branches and DMC in the stem wood varies from +10.1 % in *Abies* to -10.3 % in *Betula pubescens*; the difference between DMC in the stem bark and DMC in the branches varies from +18.4 % in *Betula pubescens* to -6.0 % in *Fraxinus*. Finally, the difference between DMC in branches and DMC in foliage varies from +31.4 % in *Fraxinus* to -1.2 % in *Pinus nigra*. *Conclusion.* The developed regression models of DMC in phytomass fractions have demonstrated significant differences in DMC between fractions and species, which must be taken into account when assessing the carbon depositing capacity of the forest-forming species of Eurasia.

Keywords: dry matter content (DMC); stem wood and bark; needles; foliage; branches; mixed-type models; species-specific differences

Funding: the study was carried out under the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Usoltsev V. A., Plyukha N. I. Dry Matter Content in Fractions of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):6–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.6>; EDN: CVACMC

The article was submitted 15.07.2024; approved after reviewing 15.09.2024;
accepted for publication 25.11.2024

Information about the authors

Vladimir A. Usoltsev – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. Research interests – forestry, forest taxation, phytogeography. Author of 930 scientific publications, including 43 monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN: 3668-6843

Nikolai I. Plyukha – postgraduate student of the Ural State Forestry Engineering University, Junior Researcher at the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – forestry, forest taxation. Author of 19 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN: 4682-7412

Availability of data and materials. The datasets analyzed during the study are publicly available.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the paper preparation.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.