

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 130–142.
Forests of Russia and economy in them. 2024. № 4 (91). P. 130–142.

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

DOI: 10.51318/FRET.2024.91.4.013

ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СУХОГО ВЕЩЕСТВА В ДРЕВЕСИНЕ И КОРЕ ВДОЛЬ ПО СТВОЛУ ДЕРЕВА

Владимир Андреевич Усольцев¹, Николай Иванович Плюха²,
Иван Степанович Цепордей³, Елена Михайловна Ангалт⁴

¹⁻³ Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹⁻³ Ботанический сад Уральского отделения, Екатеринбург, Россия

⁴ Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

¹ Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

² nikcskript@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1628-3300>

³ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

⁴ elenaangalt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8401-8288>

Аннотация. Лесные экосистемы, занимающие почти треть свободной ото льда поверхности суши, играют важную роль в глобальном круговороте углерода благодаря своей способности накапливать его в своих тканях и смягчать последствия изменения климата. Актуальной становится количественная оценка продуктивности лесных экосистем, и на первый план выступает точность оценки фитомассы и углерода, а также содержания сухого вещества (ССВ) – одного из наиболее трудозатратных показателей при определении фитомассы деревьев. Содержание влаги в компонентах дерева и ССВ, как его обратная величина, характеризует жизненное состояние дерева и во многом определяется как наследственными причинами, так и условиями произрастания. Известно, что ССВ видоспецифично, однако данные о его распределении в древесине и коре вдоль по стволу довольно редки. Цель нашего исследования состояла в анализе видовых особенностей изменения ССВ в древесине и коре вдоль по стволу дерева. По данным 3 823 дисков, взятых по относительным высотам ствола шести лесообразующих видов вдоль по уральскому меридиану, рассчитаны регрессионные модели смешанного типа, включающие в качестве независимых переменных возраст дерева и диаметр ствола, а также положение диска вдоль по стволу. Видовая принадлежность ССВ учтена вводом в модель фиктивных переменных. Установлен общий для исследованных видов характер изменения ССВ как в древесине, так и в коре, а именно его снижение в направлении от основания ствола к вершине. Некоторые виды существенно различаются по величине ССВ в древесине и коре. Имеются также различия ССВ в древесине сосны разных регионов, по-видимому, вследствие различия в условиях влагообеспечения.

Ключевые слова: содержание сухого вещества вдоль по стволу, древесина и кора ствола, сосна обыкновенная, сосна кедровая сибирская, ель сибирская, пихта сибирская, береза повислая, лиственница Сукачева, регрессионные модели

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

Для цитирования: Видовые особенности изменения содержания сухого вещества в древесине и коре вдоль по стволу дерева / В. А. Усольцев, Н. И. Плюха, И. С. Цепордей, Е. М. Ангальт // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 130–142.

Original article

SPECIES FEATURES OF CHANGES IN THE DRY MATTER CONTENT IN WOOD AND BARK ALONG THE STEM OF A TREE

Vladimir A. Usoltsev¹, Nikolay I. Plyukha², Ivan S. Tsepordey³, Elena M. Anhalt⁴

¹⁻³ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹⁻³ Botanical Garden, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

⁴ Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

¹ Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

² nikskript@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1628-3300>

³ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

⁴ elenaangalt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8401-8288>

Abstract. Forest ecosystems, which occupy almost a third of the ice-free land surface, play an important role in the global carbon cycle due to their ability to store it in their tissues and mitigate the effects of climate change. Quantitative assessment of the productivity of forest ecosystems is becoming relevant, and the accuracy of the assessment of phytomass and carbon, as well as the dry matter content (DMC), one of the most labor-consuming indicators in estimating the phytomass of trees, comes to the fore. The moisture content in the components of the tree and the DMC, as its inverse value, characterizes the vital state of the tree and is largely determined by both hereditary causes and growing conditions. It is known that the DMC is species-specific, however, data on its distribution in wood and bark along the stem are quite rare. The purpose of our study was to analyze the specific features of DMC changes in wood and bark along the stem of the tree. According to the data of 3 823 disks taken from the relative stem heights of six forest-forming species along the Ural meridian, regression models of a mixed type were calculated, including as independent variables the age of the tree and the diameter of the stem, as well as the position of the disk along the stem. The species affiliation of the DMC data is taken into account by entering dummy variables into the model. The common character of the DMC change in both wood and bark has been established for the studied species, namely, its decrease in the direction from the base of the stem to its top. Some species differ significantly in the DMC in wood and bark. There are also differences in DMC of pine wood from different regions, apparently due to differences in moisture conditions.

Keywords: dry matter content along the stem, wood and bark of the stem, Scots pine, Siberian cedar pine, Siberian spruce, Siberian fir, silver birch, larch, regression models

Financing: the work was carried out according to the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Species features of changes in the dry matter content in wood and bark along the stem of a tree / V. A. Usoltsev, N. I. Plyukha, I. S. Tsepordey, E. M. Anhalt // Forests of Russia and economy in them. 2024. № 4 (91). P. 130–142.

Введение

Лесные экосистемы, занимающие почти треть свободной ото льда поверхности суши, играют важную роль в глобальном круговороте углеро-

да благодаря своей способности накапливать его в своих тканях (A large and..., 2011; Integrated global assessment..., 2023). В последнее время активно обсуждается возможность инвестирования

в лесовосстановление и/или лесовозобновление для смягчения последствий изменения климата (The global tree..., 2019; Comment on..., 2019). Это побудило научное сообщество исследовать количественную оценку продуктивности лесных экосистем, и на первый план выступает точность оценки фитомассы и углерода различного компонентного состава деревьев. Один из способов решения данной задачи состоит в повышении точности определения содержания сухого вещества (ССВ) – одного из наиболее трудоемких процессов при определении фитомассы и углеродного пула деревьев (Цепордей, 2023). Содержание влаги в компонентах дерева и ССВ, как его обратная величина, характеризуют жизненное состояние дерева и во многом определяются как наследственными причинами, так и условиями произрастания (Исаева, Черепнин, 1988; Наквасина, 2002). Особо важную роль в физиологии растений играет ССВ в листе, в значительной степени определяя интенсивность фотосинтеза (Foliar moisture content..., 2019; Leaf water content..., 2022). ССВ в листьях оливкового дерева (*Phillyrea latifolia* L.) объясняет около 92 % изменчивости удельной листовой поверхности, или отношения поверхности листовой к ее сухой массе (A standardized protocol..., 2001). Информация о влажности и ССВ во фракциях фитомассы насаждений необходима при моделировании лесных пожаров (Hiemstra, Jong, 2006).

Для той или иной фракции фитомассы часто приводятся средние значения ССВ (Усольцев, 1985; Shipley, Vu, 2002) или влажности, как ее обратной величины (Усольцев, 1975). В продвинутых вариантах оценки ССВ даются в связи с возрастом дерева, его высотой или диаметром ствола (Молчанов, 1964; Bergstedt, Olesen, 2000; Baturaygil et al., 2021). При моделировании фитомассы и первичной продукции деревьев вклад ССВ может объяснять до 55 % их изменчивости (Leaf dry matter..., 2017).

Известно, что ССВ тесно коррелирует с базисной плотностью (Полубояринов и др., 1982; Shipley, Vu, 2002). Поскольку изменчивость базисной плотности ниже, чем ССВ (или влажности), показатель базисной плотности как наименее изменчивый и более легко устанавливаемый используется для определения ССВ в древесине. Коэффициент

корреляции при этом может составлять у березы $-0,520$, у сосны $-0,890$, у ели $-0,810$ (Полубояринов и др., 1982) и у маниока (*Manihot esculenta* Crantz) $-0,999$ (Determination..., 2011).

Производство биоэнергии – важный компонент усилий по снижению зависимости от ископаемых видов топлива (Тюкавина и др., 2018), а основной биоэнергетической характеристикой является теплотворная способность (Теплотворная способность..., 2024). Названный показатель характеризует не только качество биотоплива, но и используется при индексировании энергетических циклов в лесных экосистемах (Zeng et al., 2014; Energy stored..., 2021). Одним из способов получения биоэнергии является анаэробное расщепление растительного сырья в биореакторах и последовательное преобразование полученного биогаза в электричество и тепло с помощью специального генератора (Weiland, 2010). Учитывая, что выход метана в основном определяется выходом сухого вещества, высокий выход сухого вещества является основной целью выращивания «биогазовых» культур (Herrmann, Rath, 2012).

Для достижения оптимального использования отходов лесозаготовок в энергетике важно знать, как различные методы обработки и хранения влияют на свойства исходного сырья. Анализ изменения содержания влаги в разных вариантах хранения отходов лесозаготовок хвойных пород выявил не только характер снижения влажности в процессе естественной сушки, но и влияние влажности на потерю сухого вещества, варьирующую от 1 до 3 % в месяц (Modelling moisture..., 2011; Open-air storage..., 2015). Поскольку темпы изменения содержания влаги и сухого вещества в процессе высушивания зависят от погоды, были разработаны модели оценки названных показателей во времени с учетом погодных условий (Weather based moisture..., 2018) и степени разложения (Dry matter losses..., 2019).

Таким образом, ССВ анализируется исследователями во многих приложениях как технического, так и биологического характера. Однако многофакторные закономерности изменения ССВ в древесине и коре по относительным высотам ствола по аналогии с моделями чисел сбегания вдоль по стволу (Усольцев, 1984) фактически не изучались.

**Цель, методика
и объекты исследования**

Цель настоящего исследования состояла в анализе видовых особенностей изменения ССВ в древесине и коре вдоль по стволу дерева.

Для достижения поставленной цели мы использовали авторскую базу эмпирических данных о ССВ лесообразующих пород Северной Евразии (Usoltsev, 2020).

Из нее отобрано 3823 модельных дерева, распределение которых по древесным видам представлено в табл. 1.

Мы предполагаем построить аллометрические модели ССВ смешанного типа (mixed-effects models) (Усольцев и др., 2018), включающие как численные (дендрометрические показатели), так и фиктивные переменные, кодирующие видовую принадлежность исходных данных (табл. 2).

Таблица 1
Table 1

Статистики показателей 3823 модельных деревьев, включенных в регрессионный анализ
Statistics of 3823 sample trees included in the regression analysis

Статистики Statistics	Показатели исходных данных Indicators of the initial data			
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>Sw</i>	<i>Sbk</i>
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L., Тургайский прогиб <i>Pinus sylvestris</i> L., Turgai Depression				
Среднее значение The average value	27,0	7,0	44,2	48,2
Минимальное значение Minimum value	5,0	0,3	27,1	25,0
Максимальное значение Maximum value	110,0	34,5	70,0	83,5
Стандартное отклонение Standard deviation	18,0	5,3	7,2	11,5
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	67,7	75,6	16,4	23,8
Число наблюдений Number of observations	3500	3492	3180	3180
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L., Средний Урал <i>Pinus sylvestris</i> L., Middle Urals				
Среднее значение The average value	24,0	8,9	39,4	40,1
Минимальное значение Minimum value	15,0	2,4	30,0	28,6
Максимальное значение Maximum value	32,0	20,0	55,6	56,5
Стандартное отклонение Standard deviation	6,5	4,6	5,0	5,6
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	27,4	51,5	12,8	14,1
Число наблюдений Number of observations	110	110	110	110
Сосна сибирская <i>Pinus sibirica</i> Du Tour., Средний Урал <i>Pinus sibirica</i> Du Tour., Middle Urals				
Среднее значение The average value	92,0	19,4	46,8	53,9
Минимальное значение Minimum value	50,0	8,1	35,7	42,4

Продолжение табл. 1
Continuation of table 1

Статистики Statistics	Показатели исходных данных Indicators of the initial data			
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>Sw</i>	<i>Sbk</i>
Максимальное значение Maximum value	146,0	29,3	63,9	61,9
Стандартное отклонение Standard deviation	33,1	6,0	7,1	5,7
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	36,1	30,9	15,2	10,6
Число наблюдений Number of observations	38	38	38	38
Ель сибирская <i>Picea obovata</i> L., Средний Урал <i>Picea obovata</i> L., Middle Urals				
Среднее значение The average value	77,0	20,4	46,2	43,9
Минимальное значение Minimum value	37,0	6,1	33,4	35,0
Максимальное значение Maximum value	134,0	37,9	66,8	60,0
Стандартное отклонение Standard deviation	28,1	10,2	8,1	5,5
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	36,5	49,9	17,5	12,6
Число наблюдений Number of observations	84	84	84	84
Сосна сибирская <i>Abies sibirica</i> L., Средний Урал <i>Abies sibirica</i> L., Middle Urals				
Среднее значение The average value	69,0	13,7	43,0	42,1
Минимальное значение Minimum value	20,0	0,8	31,3	25,0
Максимальное значение Maximum value	164,0	40,3	57,2	57,1
Стандартное отклонение Standard deviation	28,0	8,6	5,5	6,3
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	40,7	62,9	12,7	15,1
Число наблюдений Number of observations	214	214	213	213
Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth, Южный Урал <i>Betula pendula</i> Roth, Southern Urals				
Среднее значение The average value	57,0	15,2	57,0	35,5
Минимальное значение Minimum value	31,0	7,0	47,7	28,7
Максимальное значение Maximum value	86,0	26,3	71,1	46,1
Стандартное отклонение Standard deviation	15,0	5,3	5,7	3,0
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	26,5	34,8	10,0	8,4

Окончание табл. 1
The end of table 1

Статистики Statistics	Показатели исходных данных Indicators of the initial data			
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>Sw</i>	<i>Sbk</i>
Число наблюдений Number of observations	159	159	159	159
Лиственница Сукачева <i>Larix Sukaczewii</i> N. Dyl., Тургайский прогиб (культуры) <i>Larix Sukaczewii</i> N. Dyl., Turgai Depression (plantation)				
Среднее значение The average value	40,0	16,1	58,7	47,5
Минимальное значение Minimum value	40,0	6,2	45,0	32,8
Максимальное значение Maximum value	40,0	28,0	71,3	66,7
Стандартное отклонение Standard deviation	0	6,3	6,9	9,3
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	0	39,1	11,8	19,6
Число наблюдений Number of observations	81	81	39	39

Примечание. *A* – возраст дерева, лет; *D* – диаметр ствола на высоте груди, см; *Sw* и *Sbk* – соответственно ССВ в древесине и коре ствола, %.

Note. *A* – is the age of the tree, years; *D* – is the diameter of the trunk at chest height, cm; *Sw* and *Sbk* – are, respectively, the DMC in the wood and bark of the trunk, %.

Таблица 2
Table 2

Схема кодирования видов с указанием регионов, в которых определено ССВ древесины
и коры по относительным высотам стволов деревьев
Species coding scheme indicating the regions in which the DMC of wood
and bark is determined by the relative heights of tree stems

Вид Types	Регион Region	Фиктивные переменные Dummy variables					
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i>	Тургайский прогиб Turgajskij progib	0	0	0	0	0	0
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i>	Средний Урал Middle Urals	1	0	0	0	0	0
Сосна сибирская <i>Pinus sibirica</i>	Средний Урал Middle Urals	0	1	0	0	0	0
Ель сибирская <i>Picea obovata</i>	Средний Урал Middle Urals	0	0	1	0	0	0
Пихта сибирская <i>Abies sibirica</i>	Средний Урал Middle Urals	0	0	0	1	0	0
Береза повислая <i>Betula pendula</i>	Южный Урал Southern Urals	0	0	0	0	1	0
Лиственница Сукачева <i>Larix Sukaczewii</i> (культуры)	Тургайский прогиб Turgajskij progib	0	0	0	0	0	1

В рассчитываемую модель в качестве независимых переменных, наряду с возрастом и диаметром ствола, включили значения относительной высоты (в долях от общей высоты ствола) в первой, второй и третьей степени. В силу нелинейности исследуемых зависимостей применено логарифмирование переменных. Исключение составила относительная высота ствола как независимая переменная, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 0,9, и поэтому она введена в модель в виде полинома без логарифмирования.

Поскольку известна специфичность реакции древесных видов на изменения климата (Суворова, 2009; Impact of warmer..., 2022), для учета этой видоспецифичности в модель необходимо включать синергизмы, т.е. произведения X_i на структурные и климатические независимые переменные. Но без предварительного качественного анализа взаимодействий механический перебор синергизмов приводит к тому, что модель становится неустойчивой, т.е. некорректной при смене фактических исходных данных. Выход на получение корректных синергизмов в подобных случаях возможен, в частности, путем применения метода последовательного сокращения размерности (Усольцев, 1985). Суть его в том, что вначале выводится связь искомой переменной с одной из независимых переменных, затем рассчитывается связь полученных регрессионных коэффициентов со второй независимой переменной и вставляется в первую зависимость. Затем рассчитывается связь полученных регрессионных коэффициентов с третьей независимой переменной и т.д. (Матвеев, Усольцев, 1991; Регрессионные модели..., 1994). Получаем структуру модели, регрессионные коэффициенты которой уточняются на всем массиве данных. Но для этого нужно иметь хорошо структурированную (близкую к ортогональной) исходную многофакторную матрицу данных, обычно получаемую при планировании активного эксперимента. При планировании пассивного эксперимента, как в нашем случае, ее получить практически невозможно (Налимов, 1971). Поскольку в этой связи имеется риск получения некорректных взаимодействий, мы ограничиваемся включением в модель простого блока фиктивных переменных.

Результаты и их обсуждение

В итоге расчетов получены модели:

– для ССВ в древесине

$$\begin{aligned} \ln(CCB) = & 2,8356 + 0,4875(\ln A) - 0,0362(\ln A)^2 - \\ & - 0,1022(\ln D) + 0,2456h_i - 0,9994h_i^2 + 0,6089h_i^3 - \\ & - 0,0653X_1 - 0,0871X_2 - 0,0775X_3 - 0,1666X_4 + \\ & + 0,1676X_5 + 0,2572X_6; \end{aligned} \quad (1)$$

$$adjR^2 = 0,646; SE = 0,100;$$

– для ССВ в коре

$$\begin{aligned} \ln(CCB) = & 3,5630 + 0,3347(\ln A) - 0,0308(\ln A)^2 - \\ & - 0,0567(\ln D) - 1,6054h_i + 1,7272h_i^2 - 0,5868h_i^3 - \\ & - 0,1031X_1 + 0,1106X_2 - 0,0826X_3 - 0,1817X_4 - \\ & - 0,2850X_5 + 0,0185X_6; \end{aligned} \quad (2)$$

$$adjR^2 = 0,608; SE = 0,140;$$

где A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; h_i – относительная высота, выраженная в долях общей высоты дерева; CCB – содержание сухого вещества в древесине или коре, %. Свободный член моделей (1) и (2) скорректирован на логарифмическое преобразование (Baskerville, 1972). В окончательную структуру моделей включены только независимые переменные, статистически значимые на уровне P_{95} . Коэффициент детерминации $adjR^2$ скорректирован на количество переменных; SE – стандартная ошибка моделей (1) и (2). Равномерность остаточной дисперсии моделей (1) и (2) подтверждает рис. 1.

После подстановки в модели (1) и (2) средних значений возраста (32 года) и диаметра ствола (8,2 см) путем табулирования моделей по задаваемым значениям относительной высоты в диапазоне от 0 до 0,9 построены для каждого вида зависимости, графическое изображение которых дано на рис. 2 и 3.

Судя по рис. 2 и 3, ССВ как в древесине, так и в коре снижается в направлении от основания ствола к его вершине, хотя по конфигурации линии регрессии несколько различаются. Наибольшей долей сухого вещества в древесине отличаются береза и лиственница, а наименьшей – пихта. На Среднем Урале сосна, кедр и ель имеют близкие значения ССВ в древесине, но сосна в Тургайском прогибе существенно превосходит по ССВ сосну Среднего Урала вследствие более жестких условий роста в степи.

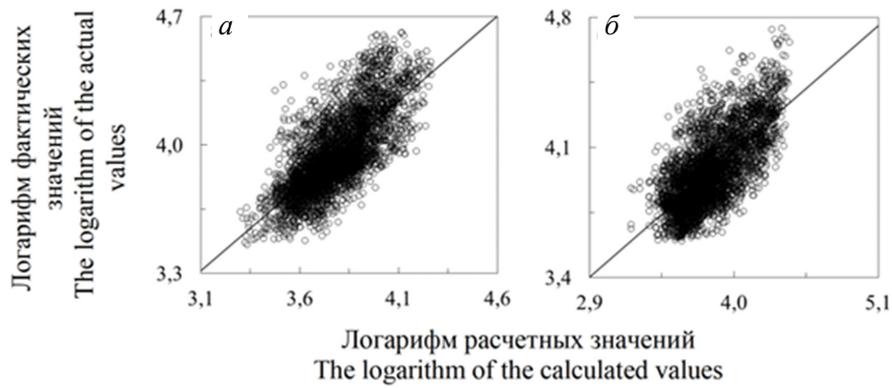


Рис. 1. Соотношение фактических и расчетных данных по моделям (1) и (2):
 а – для древесины, б – для коры
 Fig. 1. The ratio of actual and calculated data for models (1) and (2):
 а – for wood, б – for bark

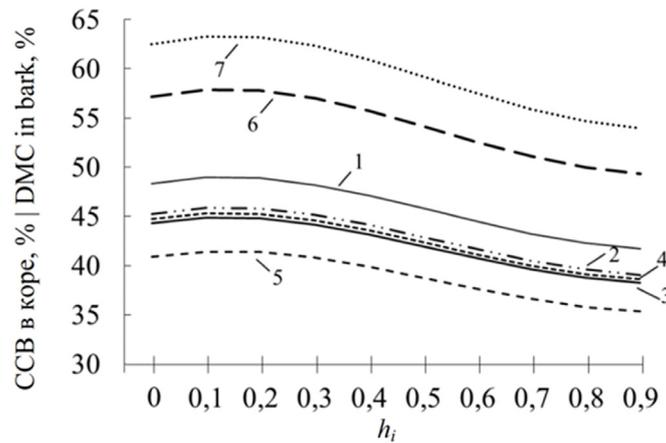


Рис. 2. Изменение ССВ в древесине вдоль по стволу дерева согласно модели (1)
 Обозначения здесь и далее: 1 – *Pinus sylvestris* L., Тургайский прогиб; 2 – *Pinus sylvestris*, Средний Урал;
 3 – *Pinus sibirica* Du Tour., Средний Урал; 4 – *Picea obovata* L., Средний Урал; 5 – *Abies sibirica* L., Средний Урал;
 6 – *Betula pendula* Roth, Южный Урал; 7 – *Larix Sukaczewii* N. Dyl., Тургайский прогиб (культуры)
 Fig. 2. DMC change in wood along the stem of the tree according to the model (1)
 Designations here and further: 1 – *Pinus sylvestris* L., Turgai Depression; 2 – *Pinus sylvestris*, Middle Urals;
 3 – *Pinus sibirica* Du Tour., Middle Urals; 4 – *Picea obovata* L., Middle Urals; 5 – *Abies sibirica* L., Middle Urals;
 6 – *Betula pendula* Roth, Southern Urals; 7 – *Larix Sukaczewii* N. Dyl., Turgai Depression (plantation)

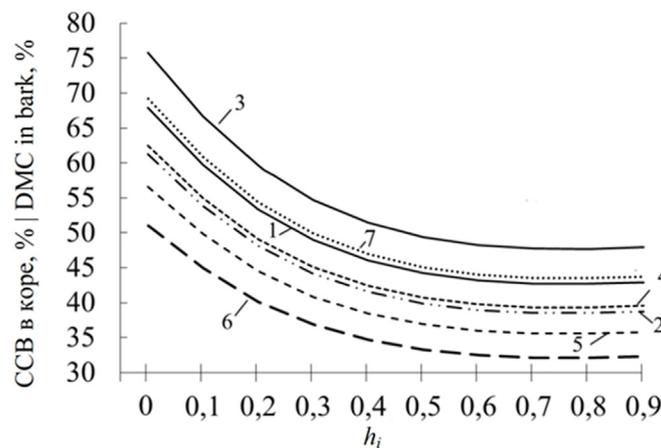


Рис. 3. Изменение ССВ в коре вдоль по стволу дерева согласно модели (2)
 Fig. 3. The change of DMC in the bark along the stem of the tree according to the model (2)

Наибольшее ССВ в коре наблюдается у кедра и наименьшее – у березы. Близкие значения ССВ в коре у сосны и кедра в Тургайском прогибе, а также у сосны и ели на Среднем Урале.

Выводы

Таким образом, установлен общий для исследованных видов характер изменения ССВ как

в древесине, так и в коре, а именно его снижение в направлении от основания ствола к вершине. Некоторые виды существенно различаются по величине ССВ в древесине и коре. Имеются также различия ССВ в древесине сосны разных регионов, по-видимому, вследствие различия в условиях влагообеспечения.

Список источников

- Исаева Л. Н., Черепнин В. Л. Качество древесины географических культур сосны обыкновенной в Средней Сибири // Лесоведение. 1988. № 2. С. 80–83.
- Матвеев П. М., Усольцев В. А. Послепожарный отпад и возобновление лиственницы на многолетней мерзлоте // Экология. 1991. № 4. С. 3–15.
- Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. М. : Наука, 1964. 255 с.
- Наквасина Е. Н. Дегидратация хвои сосны обыкновенной в географических культурах Архангельской области // Известия вузов. Лесной журнал. 2002. № 6. С. 16–21.
- Налимов В. В. Теория эксперимента. М. : Наука, 1971. 208 с.
- Полубояринов О. И., Некрасова Г. Н., Федоров Р. Б. О взаимосвязи влажности и плотности древесины растущих деревьев // Известия вузов. Лесной журнал. 1982. № 2. С. 7–11.
- Регрессионные модели и таблицы древесной зелени деревьев пихты сибирской / В. А. Усольцев, Н. Н. Чернов, В. В. Кириллова, С. В. Тепикин // Леса Урала и хозяйство в них. Вып. 17. Екатеринбург : УГЛТА, 1994. С. 128–154.
- Суворова Г. Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. Новосибирск : ГЕО, 2009. 195 с.
- Теплотворная способность фракций надземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях северо-таежного лесного района / О. Н. Тюкавина, Д. Н. Клевицов, В. И. Мелехов, Н. А. Невверов // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28. № 2. С. 27–33. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-27-33
- Тюкавина О. Н., Клевицов Д. Н., Адаи Д. М. Биоэнергетический потенциал надземной фитомассы культур сосны обыкновенной таежной зоны // Известия вузов. Лесной журнал. 2018. № 4 (364). С. 49–55.
- Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с.
- Усольцев В. А. Оценка формы и полндревесности стволов с использованием множественных связей // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1984. № 7. С. 75–79.
- Усольцев В. А. Тонкомерные сортименты березы и осины для производства древесно-стружечных плит // Плиты и фанера. Реферативная информация. 1975. № 10. С. 6–7.
- Усольцев В. А., Шубаури С. О. Р., Дар Д. А. Проблемы оценки биопродуктивности лесов в аспекте биогеографии: 2. Модели смешанных эффектов // Эко-потенциал. 2018. № 1 (21). С. 9–26.
- Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии / под ред. проф. В. А. Усольцева. Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с.
- A large and persistent carbon sink in the world's forests / Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang et al. // Science. 2011. Vol. 333. P. 988–993.
- A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content / E. Garnier, B. Shipley, C. Roumet, G. Laurent // Functional Ecology. 2001. Vol. 15. P. 688–695.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.

- Baturaygil A., Stetter M.G., Schmid K.* Breeding amaranth for biomass: evaluating dry matter content and biomass potential in early and late maturing genotypes // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Article 970. DOI: 10.3390/agronomy11050970 (accessed 20.06.2024).
- Bergstedt A., Olesen P. O.* Models for predicting dry matter content of Norway spruce // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2000. Vol. 15 (6). P. 633–644.
- Comment on “The global tree restoration potential” / *J. W. Veldman, J. C. Aleman, S. T. Alvarado* [et al.] // *Science*. 2019. Vol. 366. Article 6463. URL: <https://www.researchgate.net/publication> (accessed 20.06.2024).
- Determination of the dry matter content of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) tubers using specific gravity method / *E. Teye, A. P. Asare, R. S. M. Amoah, J. P. Tetteh* // *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*. 2011. Vol. 6 (11). P. 23–28.
- Dry matter losses during biomass storage. Measures to minimize feedstock degradation / *E. Anerud, S. Krigstin, J. Routa* [et al.] // *The IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme; IEA Bioenergy*, 2019. 42 p.
- Energy stored in above-ground biomass fractions and model trees of the main coniferous woody plants / *R. Petraj, J. Mecko, J. Kukla, M. Kuklova* // *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (22). P. 1–17. DOI:10.3390/su132212686
- Foliar moisture content from the spectral signature for wildfire risk assessments in Valparaíso-Chile / *J. Villacrés, T. Arevalo-Ramirez, A. Fuentes* [et al.] // *Sensors*. 2019. Vol. 19. Article 5475. DOI: 10.3390/s19245475
- Herrmann A., Rath J.* Biogas Production from Maize: Current State, Challenges, and Prospects. 1. Methane Yield Potential // *Bioenergy Research*. 2012. Vol. 5. P. 1027–1042.
- Hiemstra P., Jong R.* Estimating leaf water content in Mediterranean oak forests for forest fire models: a comparison between empirical and radiative transfer model inversion using hyperspectral imagery // *MSC Thesis, MSC Fieldwork. Faculty of Geosciences. Department of Physical Geography, Utrecht University*, 2006. 64 p.
- Impact of warmer and drier conditions on tree photo-synthetic properties and the role of species interactions / *M. Didion-Gency, J. Gisler, M. Schaub* [et al.] // *New Phytologist*. 2022. Vol. 236. P. 547–560. DOI: 10.1111/nph.18384
- Integrated global assessment of the natural forest carbon potential / *L. Mo, C. M. Zohner, P. B. Reich* [et al.] // *Nature*. 2023. Vol. 624. P. 92–101.
- Leaf dry matter content is better at predicting aboveground net primary production than specific leaf area / *S.M. Smart, H.C. Glanville, M. del Carmen Blanes* [et al.] // *Functional Ecology*. 2017. Vol. 31. P. 1336–1344.
- Leaf water content contributes to global leaf trait relationships / *Z. Wang, H. Huang, H. Wang* [et al.] // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. Article 5525. DOI: 10.1038/s41467-022-32784-1 (accessed 20.06.2024).
- Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy / *T. Filbakk, O.A. Hoibo, J. Dibdiakova, J. Nurmi* // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2011. Vol. 26 (3). P. 267–277. DOI: 10.1080/02827581.2011.553199
- Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles / *H. Lenz, C. Idler, E. Hartung, R. Pecenka* // *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 83. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.09.018
- Shipley B., Vu T. T.* Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts // *New Phytologist*. 2002. Vol. 153. P. 359–364.
- The global tree restoration potential / *J. F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia* [et al.] // *Science*. 2019. Vol. 365. P. 75–79.
- Usoltsev V. A.* Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia : CD-monograph. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (accessed 20.06.2024).

- Weather based moisture content modelling of harvesting residues in the stand / *J. Lindblad, J. Routa, J. Ruotsalainen* [et al.] // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52 (2). Article id7830. 16 p. DOI: 10.14214/sf.7830
- Weiland P.* Biogas production: Current state and perspectives // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 85. P. 849–860.
- Zeng W., Tang S., Xiao Q.* Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25 (4). P. 779–786. DOI: 10.1007/s11676-014-0525-3

References

- A large and persistent carbon sink in the world's forests / *Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang* [et al.] // *Science*. 2011. Vol. 333. P. 988–993.
- A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content / *E. Garnier, B. Shipley, C. Roumet, G. Laurent* // *Functional Ecology*. 2001. Vol. 15. P. 688–695.
- Baskerville G. L.* Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // *Canadian Journal of Forest Research*. 1972. Vol. 2. P. 49–53.
- Baturaygil A., Stetter M. G., Schmid K.* Breeding amaranth for biomass: evaluating dry matter content and biomass potential in early and late maturing genotypes // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Article 970. DOI: 10.3390/agronomy11050970 (accessed 20.06.2024).
- Bergstedt A., Olesen P. O.* Models for predicting dry matter content of Norway spruce // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2000. Vol. 15 (6). P. 633–644.
- Comment on “The global tree restoration potential” / *J. W. Veldman, J. C. Aleman, S. T. Alvarado* [et al.] // *Science*. 2019. Vol. 366. Article 6463. URL: <https://www.researchgate.net/publication> (accessed 20.06.2024).
- Determination of the dry matter content of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) tubers using specific gravity method / *E. Teye, A. P. Asare, R. S. M. Amoah, J. P. Tetteh* // *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*. 2011. Vol. 6 (11). P. 23–28.
- Dry matter losses during biomass storage. Measures to minimize feedstock degradation / *E. Anerud, S. Krigstin, J. Routa* [et al.] // *The IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme; IEA Bioenergy*, 2019. 42 p.
- Energy stored in above-ground biomass fractions and model trees of the main coniferous woody plants / *R. Petraj, J. Mecko, J. Kukla, M. Kuklova* // *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (22). P. 1–17. DOI:10.3390/su132212686
- Foliar moisture content from the spectral signature for wildfire risk assessments in Valparaíso-Chile / *J. Villacres, T. Arevalo-Ramirez, A. Fuentes* [et al.] // *Sensors*. 2019. Vol. 19. Article 5475. DOI: 10.3390/s19245475
- Heat-creative ability of fractions of aboveground phytomass of com-mon pine crops in the conditions of the North taiga forest region / *O. N. Tyukavina, D. N. Klevtsov, V. I. Melekhov, N. A. Neverov* // *Forest Bulletin / Forestry Bulletin*, 2024. Vol. 28. № 2. P. 27–33. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-27-33 (In Russ.)
- Herrmann A., Rath J.* Biogas Production from Maize: Current State, Challenges, and Prospects. 1. Methane Yield Potential // *Bioenergy Research*. 2012. Vol. 5. P. 1027–1042.
- Hiemstra P., Jong R.* Estimating leaf water content in Mediterranean oak forests for forest fire models: a comparison between empirical and radiative transfer model inversion using hyperspectral imagery // *MSC Thesis, MSC Fieldwork. Faculty of Geosciences. Department of Physical Geography, Utrecht University*, 2006. 64 p.
- Impact of warmer and drier conditions on tree photo-synthetic properties and the role of species interactions / *M. Didion-Gency, J. Gisler, M. Schaub* [et al.] // *New Phytologist*. 2022. Vol. 236. P. 547–560. DOI: 10.1111/nph.18384
- Integrated global assessment of the natural forest carbon potential / *L. Mo, C. M. Zohner, P. B. Reich* [et al.] // *Nature*. 2023. Vol. 624. P. 92–101.

- Isaeva L. N., Cherepnin V. L.* The quality of the wood of geographical cultures of scots pine in Central Siberia // Forest science. 1988. № 2. P. 80–83. (In Russ.)
- Leaf dry matter content is better at predicting aboveground net primary production than specific leaf area / *S.M. Smart, H.C. Glanville, M.del Carmen Blanes* [et al.] // Functional Ecology. 2017. Vol. 31. P. 1336–1344.
- Leaf water content contributes to global leaf trait relationships / *Z. Wang, H. Huang, H. Wang* [et al.] // Nature Communications. 2022. Vol. 13. Article 5525. DOI: 10.1038/s41467-022-32784-1 (accessed 20.06.2024).
- Matveev P. M., Usoltsev V. A.* Post-fire decay and renewal of larch on permafrost // Ecology. 1991. № 4. P. 3–15. (In Russ.)
- Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy / *T. Filbakk, O.A. Hoibo, J. Dibdiakova, J. Nurmi* // Scandinavian Journal of Forest Research. 2011. Vol. 26 (3). P. 267–277. DOI: 10.1080/02827581.2011.553199
- Molchanov A. A.* Scientific foundations of farming in the oak forests of the forest steppe. M. : Nauka, 1964. 255 p. (In Russ.)
- Nakvasina E. N.* Dehydration of pine needles in the geographical cul-tures of the Arkhangelsk region // News of universities. Forest magazine. 2002. № 6. P. 16–21. (In Russ.)
- Nalimov V. V.* Theory of experiment. M. : Nauka, 1971. 208 p. (In Russ.)
- Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles / *H. Lenz, C. Idler, E. Hartung, R. Pecenka* // Biomass and Bioenergy. 2015. Vol. 83. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.09.018
- Poluboyarinov O. I., Nekrasova G. N., Fedorov R. B.* On the relation-ship between humidity and density of wood of growing trees // Izvestiya VUZov. Forest magazine. 1982. № 2. P. 7–11. (In Russ.)
- Regression models and tables of arboreal greenery of Siberian fir trees / *V. A. Usoltsev, N. N. Chernov, V. V. Kirillova, S. V. Tepikin* // The forests of the Urals and the economy in them. Issue 17. Yekaterinburg : UGLTA, 1994. P. 128–154. (In Russ.)
- Shipley B., Vu T. T.* Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts // New Phytologist. 2002. Vol. 153. P. 359–364.
- Suvorova G. G.* Photosynthesis of coniferous trees in Siberia. Novosi-birsk : Publishing house “GEO”, 2009. 195 p. (In Russ.)
- The global tree restoration potential / *J. F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia* [et al.] // Science. 2019. Vol. 365. P. 75–79.
- Tsepordey I. S.* Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia (edited by prof. V. A. Usoltsev). Yekaterinburg : Publishing house of UMTS UPI, 2023. 467 p. (In Russ.)
- Tyukavina O. N., Klevtsov D. N., Adai D. M.* Bioenergetic potential of aboveground phytomass of common pine crops of the taiga zone // News of universities. Forest Journal, 2018. № 4 (364). P. 49–55. (In Russ.)
- Usoltsev V. A.* Evaluation of the shape and fullness of trunks using multiple connections // Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan. 1984. № 7. P. 75–79. (In Russ.)
- Usoltsev V. A.* Fine-dimensional sorts of birch and aspen for the pro-duction of chipboard // Plates and plywood. Abstract information. 1975. № 10. P. 6–7. (In Russ.)
- Usoltsev V. A.* Modeling of the structure and dynamics of phytomass of stands. Krasnoyarsk: Publishing House of the Krasnoyarsk University, 1985. 191 p. (In Russ.)
- Usoltsev V. A.* Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia : CD-monograph. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (accessed 20.06.2024).
- Usoltsev V. A., Shubairi S. O. R., Dar D. A.* Problems of forest bio-productivity assessment in the aspect of biogeography: 2. Models of mixed effects // Eco-potential. 2018. № 1 (21). P. 9–26. (In Russ.)

- Weather based moisture content modelling of harvesting residues in the stand / *J. Lindblad, J. Routa, J. Ruotsalainen* [et al.] // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52 (2). Article id7830. 16 p. DOI: 10.14214/sf.7830
- Weiland P.* Biogas production: Current state and perspectives // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 85. P. 849–860.
- Zeng W., Tang S., Xiao Q.* Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25 (4). P. 779–786. DOI: 10.1007/s11676-014-0525-3

Информация об авторах

- В. А. Усольцев* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор;
Н. И. Плюха – аспирант;
И. С. Цепордей – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник;
Е. М. Ангальт – кандидат биологических наук, доцент.

Information about the authors

- V. A. Usoltsev* – Doctor of Agricultural Sciences, Professor;
N. I. Plyukha – postgraduate student;
I. S. Tsepordey – Candidate of Agricultural Sciences, researcher;
E. M. Anhalt – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department.

Статья поступила в редакцию 28.06.2024; принята к публикации 15.09.2024.
The article was submitted 28.06.2024; accepted for publication 15.09.2024.
