

Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14

Forests of Russia and economy in them. 2022. № 1. P. 4–14

Научная статья

УДК 630*52

Doi: 10.51318/FRET.2022.85.72.001

АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД УРАЛА

**Владимир Андреевич Усольцев^{1,2}, Иван Степанович Цепордей¹,
Денис Витальевич Норицин³**

¹ Ботанический сад Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

³ ПАО «Сбербанк», Центр компетенций аналитики, Екатеринбург, Россия

^{1,2} Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

¹ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

³ norritsin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-6384>

Аннотация. Для оценки углероддепонирующей способности лесов Уральского региона необходимы аллометрические модели зависимости биомассы от диаметра ствола. Подобные модели особенно перспективны в условиях Урала, где преобладают древостои смешанного породного состава, и модели биомассы, рассчитанные на уровне древостоев, могут иметь смещения, вызванные изменчивостью породного состава. В работе предложены аллометрические модели для компонентов надземной биомассы деревьев лесообразующих пород Урала, которые характеризуются высокими показателями адекватности исходным данным. Вследствие нехватки фактических данных о биомассе корней для каждой породы предложены средние значения относительного показателя как отношения массы корней к надземной. Полученные результаты могут быть полезны при мониторинге углероддепонирующей способности лесного покрова Уральского региона.

Ключевые слова: надземная биомасса, компоненты биомассы, масса корней, относительная масса корней, аллометрические модели биомассы

Scientific article

ALLOMETRIC MODELS OF SINGLE-TREE BIOMASS FOR FOREST-FORMING SPECIES OF THE URALS

Vladimir A. Usoltsev^{1,2}, Ivan S. Tsepordey¹, Denis V. Noritsin³

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

² Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia,

³ Sberbank PJSC, Analytics Competence Center, Yekaterinburg, Russia

^{1,2} Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

¹ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

³ norritsin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-6384>

Abstract. To assess the carbon depositing capacity of forests in the Ural region, allometric models of the dependence of biomass on stem diameter are needed. Such models are especially promising in the conditions of the Urals, where stands of mixed species composition prevail, and biomass models calculated at the level

of stands will have displacements caused by the variability of the species composition. The paper proposes allometric models for the components of the aboveground biomass of trees of forest-forming species of the Urals, which are characterized by high indicators of adequacy in relation to the initial data. Due to the lack of actual data on root biomass, average values of the relative indicator as the ratio of root mass to aboveground one are proposed for each species. The results obtained can be useful in monitoring the carbon depositing capacity of the forest cover of the Ural region.

Keywords: aboveground biomass, biomass components, root mass, relative root mass, allometric models of biomass

Введение

Леса являются как источником получения древесины, так и своеобразной «лабораторией» по изыманию атмосферного углерода и депонированию его в биомассе. Учет этих свойств лесов требует точной оценки их биомассы. Обычно для этого закладываются пробные площади, для которых подбираются участки относительно равномерной горизонтальной структуры, лишённые вкраплений полей и крупных «окоп». Поэтому данные пробных площадей не отражают всего многообразия возрастной, видовой и морфологической структуры лесов. Данные о биомассе древостоев, полученные на пробных площадях, характеризуют потенциальную, но не фактическую, продуктивность лесного покрова. Более корректную информацию о запасах биомассы и органического углерода в ней, а также об их изменениях во времени и пространстве, дают аллометрические уравнения, рассчитанные на уровне модельных деревьев. Вначале они получили распространение в биологии (Huxley, 1932; Gould, 1966; Zar, 1968; Ищенко, 1969; Мина, Клевезаль, 1976; Кофман, 1986; Фракталы и мультифракталы..., 2013), а затем в лесоводстве при

описании зависимости биомассы от массообразующих легко измеряемых показателей дерева. Сегодня предложены тысячи подобных уравнений для бореальных, умеренных, тропических, субтропических и полуаридных лесов (Schroeder et al., 1997; Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Návar et al., 2002), однако возможность их применения в локальных условиях местообитаний обычно неизвестна.

Считалось, что эти всеобщие уравнения могут быть использованы для оценки надземной биомассы деревьев (Pastor et al., 1984; Singh, 1986; Feller, 1992). Однако недавние исследования показали, что всеобщие аллометрические модели, построенные с использованием данных о биомассе деревьев в пределах Евразии, дают неприемлемые систематические ошибки обоих знаков в условиях конкретных экорегионов. Например, биомасса листвы берёзы бумажной, определённая в Китае по опубликованным обобщённым уравнениям, составила по отношению к фактическим значениям региональных пробных площадей от 50 до 140 % и биомасса ветвей – соответственно от 155 до 239 %, а биомасса листвы и ветвей осины – соответственно от 72 до 81 % и от 55 до 165 %

от фактических локальных значений (Wang et al., 2002). Систематические ошибки уравнений биомассы деревьев, рассчитанных по фактическим данным для всей Евразии, варьировали от +95 до -52 % для лиственницы (Усольцев и др., 2017а), от +311 до -99 % для ели (Усольцев и др., 2017б), от +316 до -68 % для пихты, от +94 до -92 % для двухвойных сосен и от +34 до -56 % для пятихвойных сосен (Усольцев и др., 2017в), что исключает любую возможность их использования на региональном уровне.

Оценка биомассы корней представляет наибольшую проблему по сравнению с определением фракционного состава надземной биомассы. Это происходит прежде всего вследствие трудоемкости процесса определения их биомассы, а также вследствие того, что биомасса тонких корней в имеющейся базе данных в большинстве случаев не определялась. В результате этого фактические значения биомассы корней оказываются заниженными в два-три и более раз (Усольцев, 2018).

Цель, методика и объекты исследования

Целью настоящего исследования была разработка аллометрических моделей биомассы

деревьев лесообразующих древесных пород Урала, предназначенных для оценки запасов и годичного депонирования углерода на региональном уровне. Для осуществления поставленной цели использована авторская база данных о биомассе лесообразующих древесных пород Евразии, включающая 15,3 тыс. определений (Usoltsev, 2020). Из нее были отобраны фактические данные, полученные разными исследователями на пробных площадях, заложенных в разное время исследователями биомассы лесов Урала.

В упомянутых выше сводках (Schroeder et al., 1997; Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Navar et al., 2002) представлены в основном уравнения для надземной биомассы деревьев, имеющих разное количество элементов питания, разную скорость круговорота веществ и разный вклад в годичную продукцию, тогда как уравнения должны быть «фракционными», т. е. рассчитанными по каждой из фракций (ствол, ветви, хвоя, корни) (рисунок). Вследствие этого уравнения, приемлемые для использования только по надземной биомассе

в целом, могут быть неприемлемы по фракционному составу, поскольку при одной и той же надземной биомассе соотношения фракций в разных условиях существенно изменяется (Усольцев, 1985; Vi et al., 2004; Wolf et al., 2011). Поэтому в нашем исследовании модели рассчитывались как по фракционному составу биомассы в отдельности, так и для надземной биомассы в целом.

При разработке аллометрических моделей биомассы важным этапом является выбор структурной формы модели, т. е. выбор независимых переменных (Chave et al., 2004). В нашем исследовании при оценке биомассы дерева применена вышеупомянутая функция простой статической аллометрии, известная как уравнение Беркута, которая после ее линейаризации путем логарифмирования имеет вид (Kittredge, 1944)

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D, \quad (1)$$

где P_i – биомасса i -й фракции (P_s, P_b, P_f, P_a – соответственно биомасса ствола, ветвей, листы (хвои), надземная) в абсолютно сухом состоянии, кг;

D – диаметр ствола на высоте груди, см.

Необходимо отметить, что наряду с (1) при оценке биомассы ствола незаслуженно получило распространение уравнение, имеющее вид

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D^2 H), \quad (2)$$

где H – высота дерева, м.

Методическое несовершенство структуры модели (2) и

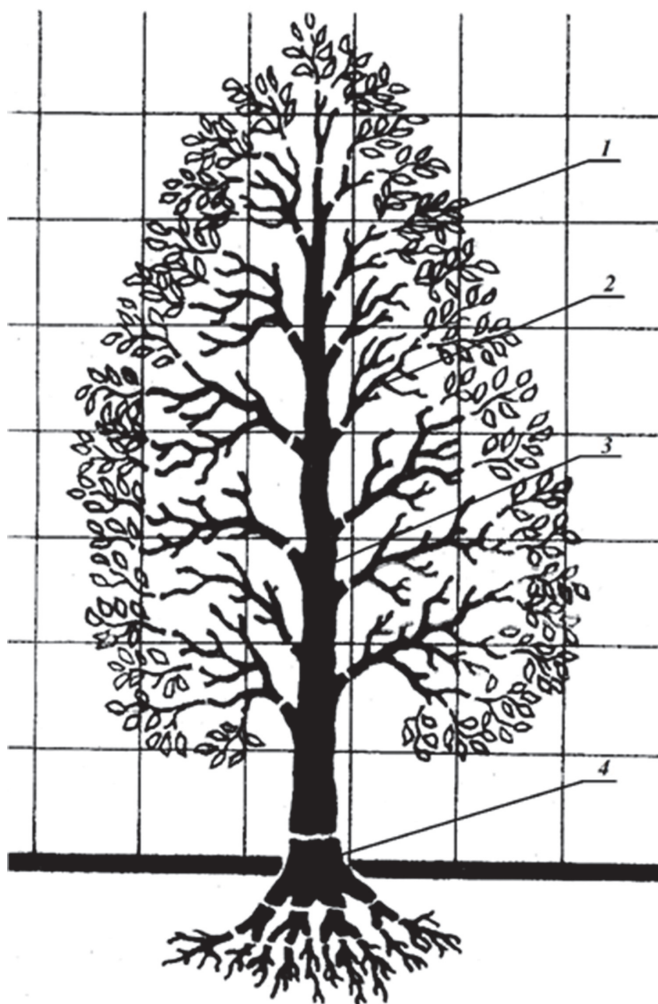


Схема деления дерева на фракции, подлежащие весовому учёту:

1 – листья, 2 – ветви, 3 – ствол, 4 – корни

The scheme of dividing the tree into fractions subject to weight accounting:

1 – foliage, 2 – branches, 3 – stem, 4 – roots

ее более низкая объясняющая способность по сравнению с (1) были показаны в процессе специального анализа (Биомасса ассимиляционного аппарата..., 2020). В дальнейшем нашем изложении мы оперируем только с моделью (1). Коэффициенты регрессии уравнений (1) были рассчитаны с использованием программного обеспечения Statgraphics (для получения дополнительной информации см. <http://www.statgraphics.com/>).

Результаты исследования

Результаты выполненного регрессионного анализа с кратким описанием объектов и перечнем используемых источников исходных данных представлены в табл. 1. Полученные аллометрические модели надземной биомассы деревьев характеризуются высокими показателями адекватности, но разными объемами исходных данных, варьирующими для отдельных пород от 5 до 275 деревьев. Для осины,

ольхи и ивы в Уральском регионе данных о биомассе деревьев нет, и пришлось использовать исходные данные, полученные для этих пород в европейской части России.

В последнее время для облегчения расчетов объема стволов, биомассы и запасов углерода разработано программное обеспечение Fantallometrik®. Это гибкое программное обеспечение, которое объединяет большинство аллометрических уравнений и

Таблица 1
Table 1

Характеристика уравнений (1)
Characteristics of equations (1)

Порода Breed	Описание объекта Description of object	Фракция Fraction	Коэффициенты Coefficients		adjR ²	SE	n	Источник A source
			a ₀	a ₁				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L.	Северное Предуралье, естественные древостой	<i>Ps</i>	-2,9053	2,5981	0,941	0,33	22	Кутявин, 2018
		<i>Pb</i>	-4,5348	2,4624	0,853	0,52		
		<i>Pf</i>	-2,7995	1,5196	0,704	0,47		
		<i>Pa</i>	-2,2657	2,4389	0,955	0,27		
	Среднее Предуралье, культуры 1 класса возраста	<i>Ps</i>	-1,6667	1,4327	0,784	0,25	5	Федорков, Гутый, 2022
		<i>Pb</i>	-4,5173	2,6778	0,758	0,50		
		<i>Pf</i>	-4,1557	2,3943	0,635	0,59		
		<i>Pa</i>	-2,0434	2,0345	0,788	0,35		
	Средний Урал, естественные древостой	<i>Ps</i>	-2,3376	2,3699	0,986	0,16	182	Усольцев, 1997; 1998
		<i>Pb</i>	-5,3177	2,5603	0,947	0,35		
		<i>Pf</i>	-4,6602	2,0765	0,870	0,46		
		<i>Pa</i>	-2,1411	2,3420	0,976	0,21		
	Средний Урал, культуры 1 и 2 класса возраста	<i>Ps</i>	-3,1610	2,6343	0,935	0,36	52	Биологическая продуктивность..., 2004
		<i>Pb</i>	-4,5639	2,4669	0,846	0,54		
		<i>Pf</i>	-3,7695	1,9900	0,762	0,57		
		<i>Pa</i>	-2,6598	2,5272	0,964	0,25		
	Южный Урал, естественные древостой	<i>Ps</i>	-3,3262	2,7131	0,968	0,21	42	Усольцев и др., 2012а
		<i>Pb</i>	-4,5186	2,4074	0,869	0,39		
		<i>Pf</i>	-4,1904	2,0384	0,754	0,49		
		<i>Pa</i>	-2,8895	2,6219	0,979	0,16		
Южный Урал, культуры 1 класса возраста	<i>Ps</i>	-2,5844	2,0798	0,977	0,25	27	Фитомасса лесных..., 2007	
	<i>Pb</i>	-3,3026	2,1332	0,917	0,50			
	<i>Pf</i>	-1,8822	1,5805	0,874	0,47			
	<i>Pa</i>	-1,3686	1,8974	0,946	0,35			

Продолжение табл. 1
Continuation of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ель сибирская <i>Picea obovata</i> Ledeb.	Средний Урал, естественные древостои	<i>Ps</i>	-3,2816	2,5949	0,985	0,21	40	Усольцев и др., 2012а
		<i>Pb</i>	-3,2395	2,2068	0,949	0,34		
		<i>Pf</i>	-3,3035	2,1321	0,937	0,37		
		<i>Pa</i>	-2,3278	2,4285	0,990	0,17		
	Средний Урал, культуры 1 и 2 класса возраста	<i>Ps</i>	-1,6123	1,7003	0,927	0,37	275	Терехов, Усольцев, 2008
		<i>Pb</i>	-1,8169	1,4496	0,789	0,57		
		<i>Pf</i>	-1,4637	1,2771	0,716	0,62		
		<i>Pa</i>	-0,5842	1,5328	0,912	0,37		
	Средний Урал, западный склон Конжаковского Камня, 960 м н. у. м.	<i>Ps</i>	-1,0182	1,4253	0,897	0,42	8	Оценка запасов углерода..., 2014
		<i>Pb</i>	-1,3329	1,4086	0,834	0,52		
		<i>Pf</i>	-1,6785	1,4042	0,807	0,58		
		<i>Pa</i>	-0,2162	1,4146	0,868	0,47		
	Средний Урал, западный склон Конжаковского Камня, 924 м н. у. м.	<i>Ps</i>	-1,1461	1,7166	0,882	0,51	5	Усольцев и др., 2014
		<i>Pb</i>	-1,6234	1,4248	0,917	0,35		
		<i>Pf</i>	-1,5628	1,2058	0,976	0,15		
		<i>Pa</i>	-0,4506	1,6008	0,933	0,35		
Средний Урал, западный склон Конжаковского Камня, 864 м н. у. м.	<i>Ps</i>	-2,8688	2,2689	0,979	0,19	6	Усольцев и др., 2014	
	<i>Pb</i>	-4,1462	2,5507	0,978	0,22			
	<i>Pf</i>	-2,9402	1,9291	0,952	0,25			
	<i>Pa</i>	-1,1162	2,1209	0,987	0,14			
Пихта сибирская <i>Abies sibirica</i> Ledeb.	Средний Урал, спелые древостои	<i>Ps</i>	-2,5969	2,4343	0,966	0,32	121	Регрессионные модели..., 1994
		<i>Pb</i>	-2,5113	1,7968	0,888	0,45		
		<i>Pf</i>	-2,5710	1,7208	0,887	0,43		
		<i>Pa</i>	-1,6564	2,2065	0,962	0,31		
Лиственница сибирская <i>Larix sibirica</i> Ledeb.	Северный Урал, лесотундра, плакоры	<i>Ps</i>	-2,6152	2,3458	0,983	0,16	27	Usoltsev, 2020
		<i>Pb</i>	-3,3183	1,9486	0,855	0,42		
		<i>Pf</i>	-4,2080	1,7880	0,798	0,47		
		<i>Pa</i>	-2,1464	2,2416	0,982	0,16		
	Северный Урал, лесотундра, поймы (аналог северной тайги)	<i>Ps</i>	-2,6853	2,5202	0,988	0,19	79	Нагимов и др., 2013; Usoltsev, 2020
		<i>Pb</i>	-4,4733	2,2840	0,916	0,47		
		<i>Pf</i>	-4,8629	1,9419	0,886	0,47		
		<i>Pa</i>	-2,4661	2,4780	0,991	0,16		
	Южный Урал, лесостепь, культуры 2 класса возраста	<i>Ps</i>	-1,9606	2,2435	0,971	0,16	28	Usoltsev, 2020
		<i>Pb</i>	-4,7553	2,4678	0,871	0,40		
		<i>Pf</i>	-6,2852	2,5956	0,907	0,35		
		<i>Pa</i>	-1,8980	2,2708	0,977	0,15		
Кедр сибирский <i>Pinus sibirica</i> Du Tour	Средний Урал, естественные спелые древостои	<i>Ps</i>	-2,4378	2,3529	0,993	0,17	17	Количественная и квалиметри- ческая..., 2012
		<i>Pb</i>	-2,4665	1,6835	0,889	0,50		
		<i>Pf</i>	-2,4916	1,5480	0,820	0,61		
		<i>Pa</i>	-1,3901	2,0695	0,975	0,28		
	Средний Урал, культуры 1–2 класса возраста (20–40 лет)	<i>Ps</i>	-2,9033	2,3261	0,954	0,29	57	Терехов, Усольцев, 2015
		<i>Pb</i>	-3,4171	2,1977	0,879	0,46		
		<i>Pf</i>	-2,8799	1,6796	0,739	0,56		
		<i>Pa</i>	-1,9898	2,1957	0,948	0,29		

Окончание табл. 1
The end of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Березы повислая <i>Betula pendula</i> Roth и пушистая <i>Betula pubescens</i> Ehrh.	Средний Урал, естественные древостои	<i>Ps</i>	-4,8443	3,1936	0,967	0,43	84	Усольцев, 1997
		<i>Pb</i>	-5,2265	2,6028	0,881	0,70		
		<i>Pf</i>	-4,4165	1,6788	0,741	0,73		
		<i>Pa</i>	-4,2022	3,0191	0,959	0,46		
	Южный Урал, естественные древостои	<i>Ps</i>	-4,4833	3,2403	0,830	0,52	102	Усольцев, 1997
		<i>Pb</i>	-7,1801	3,4742	0,783	0,65		
		<i>Pf</i>	-6,8814	2,8640	0,799	0,51		
		<i>Pa</i>	-4,3367	3,2411	0,833	0,52		
	Средний Урал, западный склон Конжаковского Камня, 864 м н. у. м.	<i>Ps</i>	-1,9200	2,0189	0,957	0,16	5	Усольцев и др., 2014
		<i>Pb</i>	-6,4003	3,3209	0,955	0,27		
		<i>Pf</i>	-5,3590	2,2186	0,885	0,30		
		<i>Pa</i>	-2,2757	2,2843	0,982	0,12		
Осина <i>Populus tremula</i> L.	–	<i>Ps</i>	-2,4928	2,4443	0,982	0,26	73	Смирнов, 1971
		<i>Pb</i>	-4,1713	2,3322	0,933	0,49		
		<i>Pf</i>	-4,3508	1,9179	0,899	0,50		
		<i>Pa</i>	-2,2010	2,3957	0,988	0,21		
Тополь чёрный <i>Populus nigra</i> L.	Южный Урал, пойма р. Тобол	<i>Ps</i>	-2,4641	2,1549	0,981	0,21	8	Фитомасса лесных..., 2007
		<i>Pb</i>	-3,9190	1,9090	0,976	0,22		
		<i>Pf</i>	-4,9735	1,7053	0,944	0,30		
		<i>Pa</i>	-2,2200	2,1147	0,982	0,21		
Липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.	Средний Урал, естественные древостои	<i>Ps</i>	-2,5218	2,3549	0,947	0,24	132	Уварова, 2005
		<i>Pb</i>	-3,6775	1,9321	0,511	0,81		
		<i>Pf</i>	-5,4597	2,0128	0,692	0,58		
		<i>Pa</i>	-2,3023	2,3142	0,945	0,24		
	Южный Урал, естественные древостои	<i>Ps</i>	-3,0906	2,6453	0,979	0,24	139	Габделхаков, 2015
		<i>Pb</i>	-2,3510	1,7311	0,845	0,46		
		<i>Pf</i>	-4,6453	1,8544	0,798	0,58		
		<i>Pa</i>	-2,2169	2,3964	0,987	0,17		
	Южный Урал, культуры	<i>Ps</i>	-2,3566	2,3674	0,957	0,24	66	Габделхаков, 2015
		<i>Pb</i>	-4,9359	2,6210	0,885	0,46		
		<i>Pf</i>	-6,8153	2,6519	0,868	0,50		
		<i>Pa</i>	-2,2780	2,3973	0,970	0,20		
Ольхи серая <i>Alnus incana</i> (L.) Moench и черная <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	–	<i>Ps</i>	-2,7672	2,4731	0,990	0,13	23	Смирнов, 1971 Казимиров и др., 1978
		<i>Pb</i>	-5,4146	2,7164	0,952	0,31		
		<i>Pf</i>	-5,3153	2,1692	0,903	0,36		
		<i>Pa</i>	-2,6552	2,4902	0,991	0,12		
Ива <i>Salix</i> L.	–	<i>Ps</i>	-2,5296	2,2888	0,986	0,21	22	Смирнов, 1971
		<i>Pb</i>	-4,1921	2,4833	0,963	0,38		
		<i>Pf</i>	-3,6491	1,7442	0,936	0,36		
		<i>Pa</i>	-2,1937	2,2897	0,993	0,16		

полевых данных для оптимизации расчетов характеристик биомассы деревьев. Это позволяет сравнивать и выбирать аллометрические уравнения, производить расчеты объема деревьев, биомассы и запасов углерода по фракциям и вводить новые уравнения с целью обновления баз данных (Sola et al., 2012; Trotta et al., 2013).

По причине упомянутой нехватки исходных данных о биомассе корней и возможных смещений оценок вследствие игнорирования исследователями тонкой фракции рассчитать аллометрические модели для биомассы корней не представляется возможным. Для ориентировочных оценок биомассы корней по имеющимся их фактическим данным нами предлагаются относительные показатели в виде отношения массы корней к надземной (root: shoot ratio) (табл. 2).

Относительные значения массы корней варьируют от 0,19 у сосны до 0,31 у лиственницы. Наименьшие значения названного относительного показателя биомассы корней у сосны обыкновенной, возможно, обуслов-

лены тем, что основной объем экспериментальных данных получен в условиях произрастания, оптимальных для этого вида. В pessимальных условиях роста, а именно в условиях сухой степи Тургайского прогиба, относительный показатель массы корней составляет $0,68 \pm 0,27$, т. е. почти вчетверо больше. При этом масса тонких корней превышает массу хвои в 6–8 раз (Усольцев, 1997). Согласно М. А. Абражко (1983), отношение массы тонких корней (<0,6 мм) к массе хвои у ели нарастает экспоненциально по мере ухудшения условий местопроизрастания.

Подобное экстремально высокое значение относительной массы корней в pessимальных условиях обусловлено интенсивным ростом тонких (сосущих) корней, которые в стремлении достичь уровня грунтовых вод (при средних осадках 270 мм) проникают на глубину до 5,3 м (Усольцев, 1997). В результате доля тонких корней по отношению к полной их массе, включая пень, составляет $0,71 \pm 0,09$. Для сосны обыкновенной в экстремальных условиях роста имеются и более

высокие значения доли тонких корней в общей, которые достигают на песчаных почвах Бурятии 0,95 (Будаев, 1971).

Экспоненциальное увеличение массы тонких корней по отношению к массе ствола установлено в Уральских горах по мере подъема от сомкнутых древостоев подножий к высокогорной тундре. Относительная масса корней возрастает по вертикальному профилю еловых сообществ на Южном Урале от 0,37 до 0,90 и в лиственничных сообществах на Полярном Урале от 0,50 до 2,40 (Solly et al., 2017). Тем самым относительная масса корней в условиях горной тундры Полярного Урала достигает почти той же величины, которая установлена в пустынной зоне у саксаула, – от 2,6 до 3,0 (Миросниченко, 1974), где корни в поисках грунтовых вод уходят вглубь до 10 м и более (Байтулин, 1979). Таким образом, существует ярко выраженная неопределенность в отношении биомассы корней всех лесообразующих пород Урала, особенно сосущей фракции, определяющей в значительной степени

Таблица 2

Table 2

Относительные показатели массы корней как отношение массы корней к надземной, средние для древесных пород Урала

Relative indicators of root mass as the ratio of root mass to aboveground one (R:S ratio), average for tree species of the Urals

Сосна <i>Pinus L.</i>	Ель <i>Picea Ledeb.</i>	Пихта <i>Abies Ledeb.</i>	Лиственница <i>Larix Ledeb.</i>	Кедр <i>Pinus Du Tour</i>
$0,19 \pm 0,04$	$0,22 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,07$	$0,31 \pm 0,13$	$0,29 \pm 0,12$
Береза <i>Betula Roth</i>	Осина <i>Populus L.</i>	Липа <i>Tilia Mill.</i>	Ольха <i>Alnus L.</i>	Ива <i>Salix L.</i>
$0,25 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,06$	$0,25 \pm 0,11$	$0,23 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,09$

продуктивность всей биомассы деревьев и древостоев.

Заключение

Предложенные аллометрические модели для компонентов надземной биомассы деревьев лесобразующих пород Урала характеризуются высокими показателями адекватности исход-

ным данным, однако экспериментальный материал по разным породам представлен крайне неравномерно.

Отсутствие базы данных о корнях древесных растений, достаточной для проведения какого-либо их анализа, порождает крайнюю неопределенность в оценках биомассы корней,

которая усугубляется отсутствием надежных данных о массе сосущих корней, их сезонном массообороте, а также о наличии или отсутствии микоризы, существенно повышающей эффективность функционирования сосущих корней.

Список источников

- Абражко М. А. Пространственное распределение и динамика биомассы корней ели // Факторы регуляции экосистем еловых лесов. Л. : Наука, 1983. С. 89–97.
- Байтулин И. О. Корневая система растений аридной зоны Казахстана. Алма-Ата : Наука, 1979. 184 с.
- Биологическая продуктивность культур сосны в Сухоложском лесхозе Свердловской области / В. А. Усольцев, Е. В. Белоусов, Г. Г. Терехов, В. В. Терентьев, И. В. Платонов, А. А. Терин // Актуальн. проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. Вып. 9. Брянск : БГИТА, 2004. С. 57–60.
- Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования / В. А. Усольцев, В. Ф. Ковязин, И. С. Цепордей, В. П. Часовских, В. А. Азаренок // Изв. СПб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 232. С. 50–78.
- Будаев Х. Р. Рост и формирование корневой системы сосны в зависимости от типов лесорастительных условий песков // Ветровая эрозия почв и меры борьбы с ней. Улан-Удэ : Бурят. ин-т естествен. наук, 1971. С. 156–180 (Тр. Бурят. ин-та естествен. наук. Вып. 9).
- Габделхаков А. К. Надземная фитомасса деревьев липы мелколистной в культурах и порослевых древостоях // Эко-потенциал. 2015. № 3 (11). С. 7–13.
- Ищенко В. Г. Применение аллометрических уравнений в популяционной экологии животных // Тр. Ин-та экологии растений и животных УрО РАН. Вып. 71 : Вопросы эволюционной и популяционной экологии животных. Свердловск, 1969. С. 8–15.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1978. 216 с.
- Количественная и квалитетическая составляющие биологической продуктивности кедровников Урала / В. А. Усольцев, И. С. Лазарев, В. В. Крудышев, Н. В. Сенчило // Сб. науч. тр. ученых и специалистов ф-та экономики и управления УГЛТУ. Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. Вып. 3. С. 261–270.
- Кофман Г. Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск : Наука, 1986. 211 с.
- Кутявин И. Н. Сосновые леса Северного Предуралья: структура, прирост, продуктивность. Сыктывкар : Ин-т биологии Коми науч. центра, 2018. 176 с.
- Мина Н. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М. : Наука, 1976. 291 с.
- Мирошниченко Ю. М. Биологическая продуктивность асс. *Haloxylon ammodendron* – *Carex physodes* в Восточных Каракумах // Растительные ресурсы. 1974. Т. 10. Вып. 3. С. 329–337.
- Нагимов З. Я., Усольцев В. А., Гаврилин Д. С. Фитомасса деревьев лиственницы сибирской в низовьях р. Пур // Сб. науч. тр. ученых и специалистов ф-та экономики и управления УГЛТУ. Екатеринбург : УГЛТУ, 2013. Вып. 4. С. 182–185.
- Оценка запасов углерода в насаждениях высотного и зонального экотонов Урала / В. А. Усольцев, В. П. Часовских, О. А. Богословская, Ю. В. Норицина, В. А. Галако, Г. Г. Терехов // Сиб. лесн. журн. 2014. № 5. С. 77–92.

Регрессионные модели и таблицы древесной зелени деревьев пихты сибирской / В. А. Усольцев, Н. Н. Чернов, В. В. Кириллова, С. В. Тепикин // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург : УГЛТА, 1994. Вып. 17. С. 128–154.

Смещения всеобщих видоспецифичных аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев сосны, кедра и пихты / В. А. Усольцев, К. В. Колчин, Ю. В. Норицина, М. В. Азарёнок, О. А. Богословская // Эко-потенциал. 2017. № 2 (18). С. 47–58.

Смирнов В. В. Органическая масса некоторых лесных фитоценозов европейской части СССР. М. : Наука, 1971. 362 с.

Терехов Г. Г., Усольцев В. А. Надземная фитомасса деревьев в культурах кедра сибирского на Урале // Эко-потенциал. 2015. № 4 (12). С. 7–9.

Терехов Г. Г., Усольцев В. А. Формирование, рост и биопродуктивность опытных культур ели сибирской на Урале : Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург : УрО РАН, 2008. 215 с.

Уварова С. С. Динамика биомассы деревьев *Tilia cordata* на примере Ачитского лесхоза Свердловской области // Леса Урала и хоз-во в них. Екатеринбург : УГЛТУ, 2005. Вып. 26. С. 38–40.

Усольцев В. А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1997. 216 с.

Усольцев В. А. В подвалах биосферы: Что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? // Эко-потенциал. 2018. № 4 (24). С. 24–77.

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

Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 541 с.

Усольцев В. А., Воробейчик Е. Л., Бергман И. Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. 365 с.

Усольцев В. А., Колчин К. В., Воронов М. П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea L.*) // Эко-потенциал. 2017б. № 1 (17). С. 22–39.

Усольцев В. А., Колчин К. В., Маленко А. А. Смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев лиственницы // Вестник Алтайс. гос. аграрн. ун-та. 2017а. № 4 (150). С. 85–90.

Федорков А., Гутий Л. Надземная фитомасса сосны скрученной (*Pinus contorta Dougl.*) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в экспериментальных насаждениях, расположенных в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми // Лесн. журн. 2022. Препринт.

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

Фракталы и мультифракталы в биоэкологии / Д. Б. Гелашвили, Д. И. Иудин, Г. С. Розенберг, В. Н. Якимов, Л. А. Солнцев. Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2013. 370 с.

References

Abrazhko M. A. Spatial distribution and dynamics of biomass of spruce roots // Factors of regulation of ecosystems of spruce forests. Leningrad : Nauka, 1983. P. 89–97.

Baitulin I. O. Root system of plants of the arid zone of Kazakhstan. Alma-Ata : Nauka, 1979. 184 p.

Biases of generic species-specific allometric models in the local assessment of phytomass of pine, cedar and fir trees / V. A. Usoltsev, K. V. Kolchin, Yu. V. Noritsina, M. V. Azarenok, O. A. Bogoslovskaya // Eco-Potential. 2017. № 2 (18). P. 47–58.

Biological productivity of Scots pine plantations in Sukhoi Log forest enterprise of Sverdlovsk region / V. A. Usoltsev, E. V. Belousov, G. G. Terekhov, V. V. Terentiev, I. V. Platonov, A. A. Terin // Modern Problems of Forest Complex : Collection of scientific works. Issue 9. Bryansk : Engineering and Technical Academy, 2004. P. 57–60.

Biomass of assimilation apparatus of Eurasian forests: correction of empirical modeling methods / V. A. Usoltsev, V. F. Kovyazin, I. S. Tsepordey, V. P. Chasovskikh, V. A. Azarenok // News of the St. Petersburg Forestry Academy. 2020. Issue 232. P. 50–78. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.50-78.

Budaev Kh. R. Growth and formation of the pine root system as dependent on the types of forest-growing conditions of sands // Wind erosion of soils and measures to combat it. Ulan-Ude : Buryat Institute of Natural Sciences, 1971. P. 156–180.

Estimating Forest Carbon Stock in Alpine and Arctic Ecotones of the Urals / V. A. Usoltsev, V. P. Chasovskikh, O. A. Bogoslovskaya, Yu. V. Noritsina, V. A. Galako, G. G. Terekhov // Siberian Journal of Forest Science. 2014. № 5. P. 77–92.

Fedorov A., Gutiy L. Aboveground phytomass of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in experimental plantations located in Syktyvkar Forest District of Komi Republic // Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal], 2022. Preprint.

Fractals and multifractals in bioecology / D. B. Gelashvili, D. I. Yudin, G. S. Rosenberg, V. N. Yakimov, L. A. Solntsev. Nizhny Novgorod : Publishing House of Nizhny Novgorod State University, 2013. 370 p.

Gabdelkhakov A. K. *Tilia cordata* Mill. tree biomass in plantations and coppice forests // Eco-Potential. 2015. № 3 (11). P. 7–16.

Ishchenko V. G. Application of allometric equations in animal population ecology // Misc. Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Issue 71. Questions of evolutionary and population ecology of animals. Sverdlovsk, 1969. P. 8–15.

Kazimirov N. I., Morozova R. M., Kulikova V. K. Organic mass and matter flows in birch stands of the middle taiga // Leningrad: Nauka Publishing, 1978. 216 p.

Kofman G. B. Growth and shape of trees. Novosibirsk : Nauka, 1986. 211 p.

Kutyavin I. N. Pine forests of the Northern Cis-Urals: structure, growth, productivity. Syktyvkar : Institute of biology, Komi Scientific Centre, 2018. 176 p.

Mina N. V., Klevezal G. A. Animal growth. Moscow : Nauka, 1976. 291 p.

Miroshnichenko Yu. M. Biological productivity of acc. Haloxylon ammodendron – *Carex physodes* in Eastern Karakums // Rastitelnye Resursy. 1974. Vol. 10. Issue 3. P. 329–337.

Nagimov Z. Ya., Usoltsev V. A., Gavrilin D. S. *Larix sibirica* tree biomass at the Lower Pur river // Proceed. of scientific works of the Faculty of Economy and Management of UGLTU. Issue 4. Yekaterinburg : UGLTU, 2013. P. 182–185.

Phytomass of forest plantations of Orenburg region / A. I. Koltunova, V. A. Usoltsev, N. V. Palmova, M. I. Balitskii, N. I. Kuzmin, O. V. Kanunnikova // Urgent problems of forest management. Issue 17. Bryansk : BGITA, 2007. P. 176–179.

Quantitative and qualitative parts of biological productivity of Siberian pine forests on the Ural region / V. A. Usoltsev, I. S. Lazarev, V. V. Krudyshev, N. V. Senchilo // Proceed. of scientific works of the Faculty of Economy and Management of UGLTU. Issue 3. Yekaterinburg : UGLTU, 2012b. P. 261–270.

Regression models and mensuration standards of green shoots biomass of *Abies sibirica* trees / V. A. Usoltsev, N. N. Chernov, V. V. Kirillova, S. V. Tepikin // Ural Forests and their Management. Issue 17. Yekaterinburg : UGLTA, 1994. P. 128–154.

Smirnov V. V. Organic mass of certain phytocoenoses at European part of USSR. Moscow : Nauka, 1971. 362 p.

Terekhov G. G., Usoltsev V. A. Establishment, growth and biological productivity of experimental *Picea obovata* plantations on the Ural forests: A study of the system of relations and patterns. Yekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 215 p.

Terekhov G. G., Usoltsev V. A. *Pinus sibirica* Du Tour tree biomass in plantations on the Urals // Eco-Potential. 2015. № 4 (12). P. 7–9.

Usoltsev V. A. Bio-ecological aspects of tree biomass estimating. Yekaterinburg : Ural Branch of RAS, 1997. 216 p.

Usoltsev V. A. Compiling forest biomass data banks. Sci. issue. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 1998. 541 p.

Usoltsev V. A. In the basements of the biosphere: What do we know about the primary production of tree roots? // Eco-Potential. 2018. № 4 (24). P. 24–77.

Usoltsev V. A. Modeling of the structure and dynamics of forest phytomass. Krasnoyarsk : Publishing house of the Krasnoyarsk University, 1985. 191 p.

Usoltsev V. A., Kolchin K. V., Malenko A. A. Biases of generic allometric models in the local assessment of phytomass of larch trees // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2017a. № 4 (150). P. 85–90.

Usoltsev V. A., Kolchin K. V., Voronov M. P. Dummy variables and biases of generic allometric models in the local assessment of phytomass of trees (on the example of *Picea L.*) // Eco-Potential. 2017b. № 1 (17). P. 22–39.

Usoltsev V. A., Vorobeichik E. L., Bergman I. E. Biological Productivity of Ural Forests under Conditions of Air Pollutions: an investigation of a system of regularities. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, 2012. 365 p.

Uvarova S. S. Biomass dynamics of *Tilia cordata* trees on the example of Achit forest enterprise of Sverdlovsk region // Ural Forests and their Management. Issue 26. Yekaterinburg : State Forest Engineering University, 2005. P. 38–40.

Информация об авторах:

В. А. Усольцев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор;

И. С. Цепордей – кандидат сельскохозяйственных наук;

Д. В. Норицин – исследователь.

Information about the authors:

V. A. Usoltsev – doctor of agricultural sciences, professor;

I. S. Tsepordey – candidate of agricultural sciences;

D. V. Noritsin – researcher.

Статья поступила в редакцию 30.12.2021; принята к публикации 20.01.2022.

The article was submitted 30.12.2021; accepted for publication 20.01.2022.
