ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079–6080.2024.4.4
УДК 630*52:630*174.754

Моделирование фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам баз данных

© В.А. Усольцев[1,2]

Modeling of root phytomass of trees and stands of Eurasia based on the materials of the databases

V.A. Usoltsev (Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)

Forest phytomass plays an important role in assessing forest productivity, sequestering atmospheric carbon and implementing sustainable forest management. Due to the high labor intensity, root phytomass is determined very rarely compared to aboveground phytomass and is mainly focused on indirect methods, in particular, on the allometric relationship of underground and aboveground phytomass of trees and stands. According to the isometric hypothesis, the regression coefficient (an indicator of allometric scaling) in the logarithmically modified dependence of root phytomass on aboveground is equals to 1, but its validity has been questioned in several studies.

The purpose of this study is to develop models for assessing the phytomass of the roots of trees and stands of Eurasia based on the materials of the author's databases and to verify the compliance of the obtained models with the isometric hypothesis. As a result, allometric models of phytomass of tree roots and stands of forest-forming genera of Eurasia are proposed, including as independent variables the values of aboveground phytomass and taxation indicators of trees and stands, significant at a probability level of $P < 0{,}05$ and higher. Since there is no information on many species in databases, models for both coniferous and deciduous genera as a whole have been calculated to estimate root phytomass for such species. The discrepancy between the obtained models and the isometric hypothesis, established earlier by other researchers, has been confirmed, since the scaling indicator in the models with a variable characterizing the aboveground phytomass deviates from 1 towards underestimation (up to 0,68) or towards overestimation (up to 1,37). Previously published models and taxation standards for various tree species are mainly intended for the assessment of aboveground phytomass. The root phytomass models proposed in this paper complement the available materials on the aboveground phytomass of trees and stands and provide a more correct assessment of the carbon deposition capacity of forests.

Key words: forest-forming species, allometric models, root phytomass, aboveground phytomass, taxation indicators, isometric hypothesis

Моделирование фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам баз данных

В.А. Усольцев

Лесная фитомасса играет важную роль в оценке продуктивности лесов, связывании атмосферного углерода и в реализации устойчивого лесопользования. Вследствие высокой трудоемкости фитомасса корней определяется очень редко по сравнению с надземной фитомассой и сосредоточена в основном на косвенных методах, в частности на аллометрической взаимосвязи подземной и надземной фитомасс деревьев и древостоев. Согласно изометрической гипотезе, угловой коэффициент (показатель аллометрического масштабирования) в логарифмически модифицированной зависимости фитомассы корней от надземной равен 1, однако ее правомерность в нескольких исследованиях была подвергнута сомнению.

Цель настоящего исследования состоит в разработке моделей для оценки фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам авторских баз данных и в проверке соответствия полученных моделей изометрической гипотезе. В результате предложены аллометрические модели фитомассы корней деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии, включающие в качестве независимых переменных значения надземной фитомассы и таксационные показатели деревьев и древостоев, значимые на уровне вероятности $P < 0,05$ и выше. Поскольку в базах данных отсутствует информация по многим древесным видам, для оценки фитомассы корней по таким видам рассчитаны модели как для хвойных, так и для лиственных родов в целом. Подтверждено несоответствие полученных моделей изометрической гипотезе, установленное ранее другими исследователями, поскольку показатель масштабирования в моделях при переменной, характеризующей надземную фитомассу, отклоняется от 1 в сторону занижения (до 0,68) и в сторону завышения (до 1,37). Ранее опубликованные модели и таксационные нормативы для различных древесных видов предназначены в основном для оценки надземной фитомассы. Предложенные в настоящей работе модели фитомассы корней служат дополнением к имеющимся материалам по надземной фитомассе деревьев и древостоев и обеспечивают более корректную оценку углерод-депонирующей способности лесов.

Ключевые слова: лесообразующие виды, аллометрические модели, фитомасса корней, надземная фитомасса, таксационные показатели, изометрическая гипотеза

Усольцев Владимир Андреевич – профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, д-р с.-х. наук
E-mail: Usoltsev50@mail.ru

[1]ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
Телефон: +7(343)254-62-25

[2]ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а
Телефон: +7(343)210-38-59

Введение

Лесная фитомасса играет важную роль в оценке продуктивности лесов, связывании атмосферного углерода и в реализации устойчивого лесопользования [29, 45, 53]. Поскольку фитомасса корней представляет "скрытую половину" (hidden half) большинства наземных экосистем, возможности непосредственно отслеживать динамику корневых систем сильно ограничены [51]. Вследствие высокой трудоемкости фитомасса корней определяется очень редко по сравнению с надземной фитомассой; в частности, из 235 определений фитомассы сосновых древостоев лишь 9 имели данные о фитомассе корней [26]. Трудоемкость непосредственного определения фитомассы корней возрастает экспоненциально по мере увеличения размера дерева [37], и в итоге «полученные результаты редко оправдывают затраченные усилия» [2, с. 178]. Поэтому оценка фитомассы корней сосредоточена в основном на косвенных методах, в частности на аллометрической взаимосвязи подземной и надземной фитомасс деревьев и древостоев.

Известно, что изменения подземной фитомассы (ПФ) по отношению к надземной (НФ) во многом определяют структуру и функции как деревьев, так и древостоев [20, 28, 52]. Однако влияние факторов окружающей среды и биотических факторов на соотношение ПФ и НФ изучено недостаточно [28, 52].

Согласно изометрической гипотезе, угловой коэффициент (показатель аллометрического масштабирования) в степенной зависимости ПФ от НФ, модифицированной в логарифмических координатах, равен 1 [23, 42]. Изометрическая гипотеза была проверена эмпирически и подтверждена на уровне как деревьев, так и древостоев. По данным 257 видов растений была установлена величина показателя масштабирования, равная 1,06 [41]. В другом исследовании, выполненном по материалам 112 насаждений, представленных видовым разнообразием на мировом уровне, установлено, что показатель масштабирования не отличается от 1 в пределах всего исследованного возрастного диапазона [52].

В то же время правомерность изометрической гипотезы в нескольких исследованиях была подвергнута сомнению. По данным, полученным для 17 биомов Китая, обнаружилось, что показатели масштабирования различались, и утверждалось, что универсального показателя не существует, при этом влияние факторов окружающей среды на анализируемую взаимосвязь не изучалось [35]. В других исследованиях локального и глобального уровней было установлено, что величина показателя масштабирования зависит от густоты древостоя, возраста и высоты дерева или древостоя, эдафических и климатических факторов [10, 12, 16, 17, 20, 33, 39, 40, 44]. Известно также, что в зависимости от условий произрастания приоритеты в распределении ассимилятов смещаются в пользу либо надземной фитомассы, либо фитомассы корней: в условиях недостаточной освещенности приоритет в росте имеет надземная фитомасса, а при ограниченных запасах подземных ресурсов – фитомасса корней [24, 31, 48]. В итоге было высказано мнение, что концепция универсального показателя масштабирования, по-видимому, была истолкована некорректно [30].

В литературе имеется немалое количество адекватных моделей ПФ (как правило, без учета фракции сосущих корней) на уровнях дерева или древостоя, построенных в зависимости от массообразующих (таксационных) показателей [3, 5, 9, 32, 38, 43, 49]. Однако вследствие многократно меньшего количества данных о ПФ по сравнению с данными о НФ, более предпочтительным можно считать рекуррентный (рекурсивный) метод оценки [3, 4]. Суть его состоит в том, что вначале рассчитываются модели НФ, в которых в качестве независимых переменных используются таксационные показатели деревьев или древостоев. Затем рассчитываются модели ПФ, в которых в качестве независимых переменных включены не только таксационные показатели, но и значения НФ, представленной, как уже отмечалось, многократно большими данными по сравнению с ПФ.

Ситуация с многократно большим количеством данных о НФ по отношению к данным о ПФ повторяется на соотношении фитомассы древостоев и их чистой первичной продукции (ЧПП). Было показано, что расчет ЧПП только по таксационным показателям древостоев давал 2–3-кратное смещение результата по сравнению с вариантом, когда в модель ЧПП в качестве независимых переменных были включены не только таксационные показатели, но и величина фитомассы [50].

Цель настоящего исследования:

– разработать модели для оценки фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам авторских баз данных [7, 8];

– проверить соответствие полученных моделей изометрической гипотезе.

Объекты и методы исследования

Для осуществления поставленной цели исследования из сформированных баз данных в количестве 15800 определений фитомассы деревьев [7] и 8575 определений фитомассы древостоев [8] для основных лесообразующих родов Евразии отобраны значения НФ и ПФ, а также соответствующие таксационные показатели деревьев и древостоев. Характеристика исходных данных для хвойных и лиственных родов представлена в таблице 1.

Представленность родов (подродов) различными видами в исходных данных была показана ранее [11]. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (http://www.statgraphics.com/). Поскольку, согласно литературным источникам, соотношения РФ и ПФ у хвойных и лиственных различаются [21, 36, 46, 47], в данном исследовании они анализируются раздельно. Модели и таксационные нормативы, опубликованные разными исследователями для различных древесных видов в разных странах, предназначены в основном для оценки надземной фитомассы. Предложенные в настоящей работе модели фитомассы корней служат своеобразным дополнением к имеющимся материалам по надземной фитомассе деревьев и древостоев.

Основная проблема при эмпирическом определении ПФ у модельных деревьев состоит в сложности учета фитомассы тонких (сосущих) корней (толщиной менее 1–2 мм), доля которых в зависимости от эдафических условий варьирует в ПФ в пределах от 20 % [22] до 95 % [1]. Фитомасса тонких корней определяется наиболее точно методом минирizотронов, помещаемых в корнеобитаемую толщу почвы по некоторой схеме [14, 34], и фактически она не связана с таксационными показателями деревьев и древостоев [6, 19]. Поэтому в будущем необходимы специальные исследования по выявлению факторов, определяющих долю тонких корней в ПФ. Несмотря на игнорирование фитомассы тонких корней при измерении ПФ, согласно последним исследованиям, оценки ПФ оказываются более низкими по сравнению с предыдущими результатами как минимум на 24 % предположительно вследствие наличия сегодня более совершенных методов учета [27]. Поскольку доля тонких корней в ПФ обычно неизвестна, в базах данных о фитомассе деревьев и древостоев приводятся значения ПФ без учета тонкой фракции [18]. Это так называемые скелетные корни (coarse roots), фитомасса которых обычно анализируется в зависимости от таксационных показателей или НФ [15, 22, 46]. В настоящей работе анализируется ПФ, включающая в себя только скелетные корни.

На основе анализа литературных источников приняты следующие структуры аллометрических моделей:

для деревьев:

$$\ln(PT_r) = a_0 + a_1 \ln PT_a + a_2 \ln H, \quad (1)$$

для древостоев:

$$\ln(PS_r) = a_0 + a_1 \ln PS_a + a_2 \ln A + a_3 \ln N. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета моделей (1) и (2) представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 1

Характеристика фактических данных о 1204 деревьях и 2625 древостоях, использованных в последующем регрессионном анализе

Род (подрод)	n	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей деревьев			n	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей древостоев			
		H, м	PT_a, кг	PT_r, кг		A, лет	N, тыс. экз./га	PS_a, т/га	PS_r, т/га
Хвойные									
Pinus L.	588	1,7–32,4	0,2–1222	0,02–259	1098	6–236	0,1–120,0	2,0–351	0,4–84,9
Picea L.	366	1,0–32,4	0,4–1601	0,06–445	516	3–317	0,1–281,0	0,04–503	0,01–183
Abies Mill.	30	4,5–27,5	3,4–646	0,8–121	64	4–283	0,22–1000	12,6–501	3,7–146
Larix Mill.	107	1,4–34,0	0,02–2448	0,003–768	183	10–380	0,01–15,8	3,3–478	0,8–109
Haploxylon (Koehne) Pilg.	-	-	-	-	57	15–380	0,12–10,8	0,75–300	0,2–70,7
Лиственные									
Betula L.	65	2,2–26,5	0,12–216	0,03–60,5	162	6–120	0,15–144	1,4–286	0,4–55,4
Populus L.	27	2,5–28,0	0,15–337	0,04–51,0	189	10–222	0,1–32,2	5,8–252	1,0–116
Quercus L.	17	5,2–32,6	1,8–4291	0,5–844	356	5–280	0,07–41,2	9,5–511	3,0–126
Alnus Gaertn.	4	4,5–14,0	1,8–79,2	0,5–15,5	-	-	-	-	-

Примечания. H – высота дерева, м; A – возраст древостоя, лет; N – число деревьев на 1 га, тыс. экз; PT_a – НФ дерева, кг; PSa – НФ древостоя, т/га; PT_r – ПФ дерева, кг; PS_r – ПФ древостоя, т/га; n – количество наблюдений. Подрод *Pinus* представлен двухвойными соснами, подрод *Haploxylon* – пятихвойными соснами (кедрами сибирским и корейским). Материалы по корням деревьев пятихвойных сосен и по корням ольховых древостоев в базах данных отсутствуют.

Таблица 2

Характеристика моделей (1)

Зависимая переменная $\ln(PT_r)$ для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных модели (1)			$adjR^2$**	SE***
	a_0*	$a_1 \ln PT_a$	$a_2 \ln H$		
Хвойные					
Pinus L.	-1,4567	0,9316	-	0,902	0,511
Picea L.	-1,4287	0,9922	-	0,969	0,366
Abies Mill.	-0,3313	1,2816	-0,9813	0,948	0,348
Larix Mill.	0,0543	1,3735	-1,0874	0,955	0,425
Все хвойные	-1,3157	1,0883	-0,2167	0,930	0,499
Лиственные					
Betula L.	-0,4731	1,1664	-0,6232	0,978	0,265
Populus L.	-0,2544	1,1519	-0,6513	0,985	0,240
Quercus L.	0,6910	0,6780	-	0,884	0,453
Alnus Gaertn.	-1,2525	0,9080	-	0,999	0,036
Все лиственные	-0,3457	1,1484	-0,6469	0,978	0,325

Примечание. Здесь и далее:
*Свободный член скорректирован на логарифмическое преобразование [13];
**Коэффициент детерминации $adjR^2$ скорректирован на количество переменных;
***SE – стандартная ошибка моделей (1) и (2).

Таблица 3

Характеристика моделей (2)

Зависимая переменная $\ln(PS_r)$ для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных модели (2)				$adjR^2$**	SE***
	a_0*	$a_1 \ln PS_a$	$a_2 \ln A$	$a_3 \ln N$		
Хвойные						
Pinus L.	-1,6327	0,8421	0,1919	0,0817	0,801	0,324
Picea L.	-1,7024	0,8986	0,1890	0,0729	0,936	0,357
Abies Mill.	-2,3960	1,1760	0,1082	-	0,951	0,179
Larix Mill.	-1,3371	0,7545	0,2872	0,2425	0,764	0,371
Haploxylon (Koehne)Pilg.	-2,2401	0,8055	0,3569	0,1056	0,915	0,263
Все хвойные	-1,8565	0,8681	0,2376	0,1061	0,872	0,350
Лиственные						
Betula L.	-1,1526	0,7743	0,1844	0,1262	0,774	0,353
Populus L.	-1,0154	0,9773	-	0,0436	0,805	0,294
Quercus L.	-1,1604	0,7543	0,2417	0,2965	0,711	0,344
Все лиственные	-0,8558	0,8275	0,0778	0,1090	0,708	0,352

Поскольку в базах данных отсутствует информация по многим видам, для оценки ПФ по таким видам рассчитаны модели (1) и (2) в целом для хвойных и в целом для лиственных родов. О степени их адекватности и отсутствии корреляции остатков можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений ПФ (рис.). Модели (1) и (2) действительны в диапазонах действующих факторов, показанных в таблице 1, и их независимые переменные значимы на уровне вероятности $P < 0{,}05$ и выше.

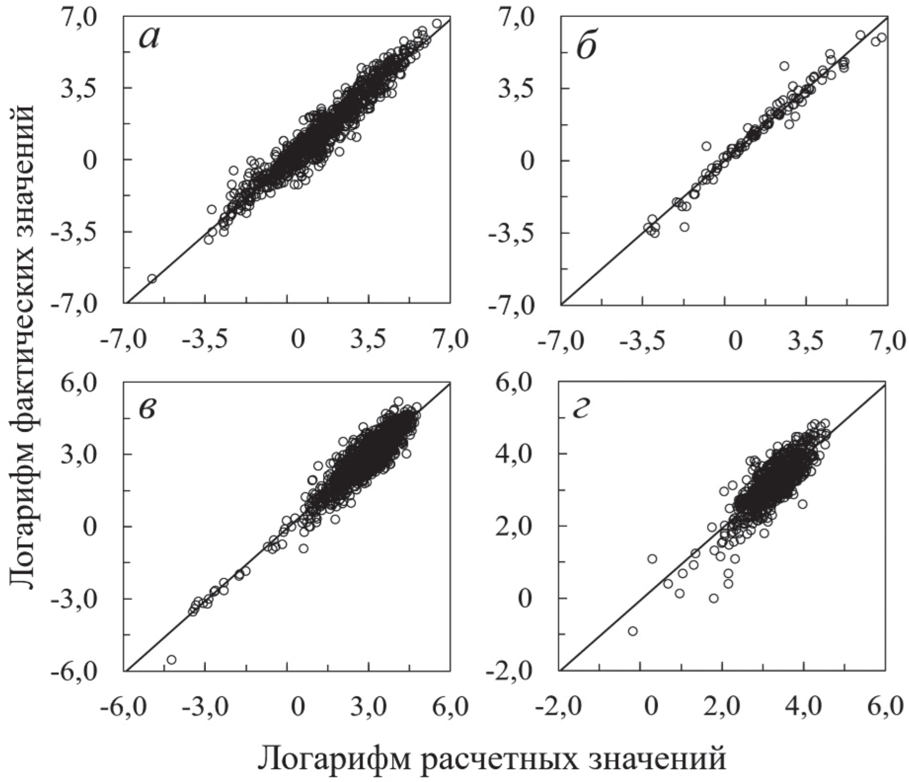

Рис. Соотношение расчетных и фактических значений ПФ согласно моделям (1) для хвойных (*а*) и лиственных (*б*) родов и согласно моделям (2) для хвойных (*в*) и лиственных (*г*) родов

По большинству родов очевидно несоответствие моделей (1) и (2) изометрической гипотезе. Особенно большие отклонения наблюдаются в модели (1) у дубов (0,68 < 1), а в модели (2) – у лиственниц, дубов и берез (соответственно 0,75; 0,75 и 0,77). В моделях (1) у всех родов при одной и той же НФ установлена отрицательная связь ПФ с высотой дерева. В моделях (2) при неизменной НФ имеется положительная связь ПФ как с возрастом, так и с густотой древостоя, что во многих случаях подтверждает закономерности, полученные исследователями во многих регионах для разных древесных видов.

Судя по данным таблицы 2, в моделях для некоторых родов регрессионные коэффициенты при независимой переменной, характеризующей высоту дерева, хотя и имели знак минус, как по остальным видам, тем не менее не были значимы на уровне вероятности $P < 0{,}05$ и были исключены при расчете моделей. Однако в обобщенных моделях как для хвойных, так и для лиственных родов, вклад высоты дерева в объяснение изменчивости ПФ деревьев оказался статистически значимым. Основной вклад в объяснение изменчивости ПФ вносит НФ, а таксационные показатели – существенно меньший, и тем не менее значимый; в модели (1) – на НФ и высоту дерева приходится соответственно 89 и 11 %, а в модели (2) на НФ, возраст и густоту древостоя – соответственно 78, 10 и 12 % объясненной изменчивости ПФ.

Коэффициенты детерминации моделей (1) для ПФ деревьев оказались несколько выше по отношению к моделям (2) для древостоев: в первом случае они были в диапазоне от 0,88 до 0,99, во втором – от 0,71 до 0,95. Эти значения находятся на том же или на более высоком уровне по сравнению с имеющимися результатами исследований мировых лесов: аллометрическая зависимость ПФ от НФ древостоев в Китае характеризовалась коэффициентами детерминации в лиственничниках на уровне 0,29, в сосняках – 0,85, в елово-пихтовых древостоях – 0,67, в вечнозеленых лесах субтропиков – 0,97, в целом по лиственным видам – 0,94 и по хвойным – 0,75 [20]. Аналогичные зависимости, полученные по мировым данным для мягколиственных видов, имели коэффициенты детерминации 0,80 и для твердолиственных – 0,56 [36], а по другим данным – 0,83 [17]. Подобная всеобщая модель для лесов Китая характеризовалась коэффициентом детерминации 0,93 [30].

Заключение

В результате исследования предложены аллометрические модели фитомассы корней деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии, включающие в качестве независимых переменных надземную фитомассу и таксационные показатели. В основу моделей положены фактические материалы замеров 1204 модельных деревьев и 2625 древостоев, заимствованные из авторских баз данных.

Подтверждено несоответствие полученных моделей изометрической гипотезе, установленное ранее другими исследователями, так как показатель масштабирования в моделях при переменной, характеризующей надземную фитомассу, отклоняется от 1 в сторону занижения (до 0,68) и в сторону завышения (до 1,37).

Поскольку в базах данных отсутствует информация по многим видам и родам, для оценки фитомассы корней по таким видам и родам рассчитаны модели как для хвойных, так и для лиственных родов в целом.

При фиксированном значении надземной фитомассы в моделях установлена отрицательная связь фитомассы корней деревьев с высотой дерева и положительная связь фитомассы корней древостоев как с их возрастом, так и с густотой. Вклады надземной фитомассы и таксационных показателей в объяснение изменчивости фитомассы корней составляют в моделях для деревьев соответственно 89 и 11 % и в моделях для древостоев – соответственно 78 и 22 %.

Модели и таксационные нормативы, опубликованные многими исследователями для различных древесных видов в разных странах, предназначены в основном для оценки надземной фитомассы. Предложенные в настоящей работе модели фитомассы корней служат дополнением к имеющимся материалам по надземной фитомассе деревьев и древостоев и обеспечивают более корректную оценку углерод-депонирующей способности лесов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН (№ 123112700125–1).

Автор выражает благодарность И.С. Цепордею за содействие при оформлении рукописи статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будаев, Х.Р. Рост и формирование корневой системы сосны в зависимости от типов лесорастительных условий песков / Х.Р. Будаев // Ветровая эрозия почв и меры борьбы с ней. – Улан-Удэ : Бурятский ин-т естественных наук, 1971. – С. 156–180 (Труды Бурятского института естественных наук. – Вып. 9).
2. Ричардсон, С.Д. Изучение развития корней в контролируемой среде / С.Д. Ричардсон // Методы изучения продуктивности корневых систем и организмов ризосферы (Международный симпозиум СССР). – Л. : Наука, Ленинградское отд-ние, 1968. – С. 178–186.
3. Усольцев, В.А. Рост и структура фитомассы древостоев / В.А. Усольцев. – Новосибирск : Наука, Сибирское отд-ние, 1988. – 253 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352 (дата обращения: 19.09.2024).

4. Усольцев, В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов / В.А. Усольцев. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – 541 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224 (дата обращения: 19.09.2024).
5. Усольцев, В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы / В.А. Усольцев. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. – 336 с. – ISBN 978-5-94984-568-4. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696 (дата обращения: 19.09.2024).
6. Усольцев, В.А. В подвалах биосферы: Что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? / В.А. Усольцев // Эко-потенциал. – 2018. – № 4 (24). – С. 24–77. – URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/8024/1/eko4-18-04.pdf (дата обращения: 19.09.2024).
7. Усольцев, В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии / В.А. Усольцев. – Электронная база данных. 3-е дополненное издание. Монография. – Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023а. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-8295-0861-6. – URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (дата обращения: 19.09.2024).
8. Усольцев, В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии / В.А. Усольцев. – Электронная база данных. 4-е дополненное издание. Монография. – Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023б. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-8295-0862-3. – URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452 (дата обращения: 19.09.2024).
9. Усольцев, В.А. Отношение подземной биомассы к надземной лесообразующих видов Евразии в градиентах температур и осадков / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей // Биосфера. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 158–179. – DOI: 10.24855/biosfera.v14i3.683.
10. Усольцев, В.А. Аллометрические модели для оценки биомассы корней лесообразующих родов Евразии дистанционными методами с учетом глобального потепления / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, Д.В. Норицин // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – Т. 40, № 1. – С. 65–75.
11. Цепордей, И.С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии (под ред. проф. В.А. Усольцева) / И.С. Цепордей. – Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2023. – 467 с. – ISBN: 978-5-8295-0860-9. – URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450 (дата обращения: 19.09.2024).
12. Askari, Y. Assessment of root-shoot ratio biomass and carbon storage of *Quercus brantii* Lindl. in the central Zagros forests of Iran / Y. Askari, A. Soltani, R. Akhavan [et al.] // Journal of Forest Science. – 2017. – Vol. 63. – P. 282–289. – DOI: 10.17221/122/2015-JFS.
13. Baskerville, G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass / G.L. Baskerville // Canadian Journal of Forest Research. – 1972. – Vol. 2 (1). – P. 49–53. – Available at: https://www.esf.edu/quest/documents/Baskerville-1972-CJFR.pdf.
14. Bernier, P.Y. Estimating the mass density of pine roots of trees for minirhizotron-based estimates of productivity / P.Y. Bernier, G. Robitaille, D. Rioux // Canadian Journal of Forest Research. – 2005. – Vol. 35, no. 7. – P. 1708–1713. – DOI: 10.1139/x05-099.
15. Bijak, S. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland / S. Bijak, M. Zasada, A. Bronisz [et al.] // Silva Fennica. – 2013. – Vol. 47 (2). – Article id963. – Available at: http://www.silvafennica.fi/article/963.
16. Burkes, E.C. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities / E.C. Burkes, R.E. Will, G.A. Barron-Gafford [et al.] // Forest Science. – 2003. – Vol. 49. – P. 224–234. – DOI: 10.1093/forestscience/49.2.224
17. Cairns, M. Root biomass allocation in the world's upland forests / M. Cairns, S. Brown, E. Helmer [et al.] // Oecologia. – 1997. – Vol. 111. – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s004420050201.
18. Cannell, M.G.R. World forest biomass and primary production data. – London : Academic Press, 1982. – 391 p.
19. Carmona, C.P. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function / C.P. Carmona, C.G. Bueno, A. Toussaint [et al.] // Nature. – 2021. – Vol. 597. – Article 683. – DOI: 10.1038/s41586-021-03871-y.
20. Cheng, D.-L. Above- and below-ground biomass relationships across 1534 forested communities / D.-L. Cheng, K.J. Niklas // Annals of Botany. – 2007. – Vol. 99. – P. 95–102. – DOI: 10.1093/aob/mcl206.
21. Cuevas, E. Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest / E. Cuevas, S. Brown, A.E. Lugo // Plant and Soil. – 1991. – Vol. 135. – P. 257–268. – DOI: 10.1007/BF00010914.

22. Deans, J.D. Dynamics of coarse root production in a young plantation of *Picea sitchensis* / J.D. Deans // Forestry: An International Journal of Forest Research. – 1981. – Vol. 54 (2). – P. 139–155. – DOI: 10.1093/forestry/54.2.139.
23. Enquist, B.J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants / B.J. Enquist, K.J. Niklas // Science. – 2002. – Vol. 295. – P. 1517–1520. – DOI: 10.1126/science.1066360.
24. Freschet, G.T. Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and belowground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction / G.T. Freschet, E.M. Swart, J.H.C. Cornelissen // New Phytologist. – 2015. – Vol. 206. – P. 1247–1260. – DOI: 10.1111/nph.13352.
25. Gerhardt, K. Biomass allocation by broad-leaf mahogany seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in abandoned pasture and secondary dry forest in Guanacaste, Costa Rica / K. Gerhardt, D. Fredriksson // Biotropica. – 1995. – Vol. 27. – P. 174–182. – DOI: 10.2307/2388993.
26. Gower, S.T. Production and carbon allocation pattern of pine forests / S.T. Gower, H.L. Gholz, K. Nakane [et al.] // Ecological Bulletins. – 1994. – Vol. 43. – P. 115–135. – Available at: https://www.jstor.org/stable/20113136.
27. Huang, Y. A global map of root biomass across the world's forests / Y. Huang, P. Ciais, M. Santoro [et al.] // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13. – P. 4263–4274. – DOI: 10.5194/essd-13-4263-2021.
28. Hui, D. Geographical and inter-annual variability in biomass partitioning in grassland ecosystems: a synthesis of field data / D. Hui, R.B. Jackson // New Phytologist. – 2006. – Vol. 169 (1). – P. 85–93. – DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01569.x.
29. Hui, D. Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China / D. Hui, J. Wang, X. Le [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2012. – Vol. 264. – P. 72–80. – DOI: 10.1016/j.foreco.2011.10.012.
30. Hui, D. Near isometric biomass partitioning in forest ecosystems of China / D. Hui, J. Wang, W. Shen [et al.] // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9 (1). – Article e86550. – DOI: 10.1371/journal.pone.0086550.
31. Iwasa, Y. Shoot/root balance of plants: optimal growth of a system with many vegetative organs / Y. Iwasa, J. Roughgarden // Theoretical Population Biology. – 1984. – Vol. 25 (1). – P. 78–105. – DOI: 10.1016/0040-5809(84)90007-8.
32. Jenkins, J.C. National-scale biomass estimators for United States tree species / J.C. Jenkins, D.C. Chojnacky, L.S. Heath [et al.] // Forest Science. – 2003. – Vol. 49 (1). – P. 12–35. – DOI: 10.1093/forestscience/49.1.12.
33. Jokela, E.J. Effects of ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stands / E.J. Jokela, T.A. Martin // Canadian Journal of Forest Research. – 2000. – Vol. 30. – P. 1511–1524. – DOI: 10.1139/cjfr-30-10-1511.
34. Katayama, A. Estimating fine root production from ingrowth cores and decomposed roots in a Bornean tropical rainforest / A. Katayama, L.K. Kho, N. Makita [et al.] // Forests. – 2019. – Vol. 10. – Article 36. – DOI: 10.3390/f10010036.
35. Li, H.T. Lack of evidence of ¾ scaling of metabolism in terrestrial plants / H.T. Li, X.G. Han, J.G. Wu // Journal of Integrative Plant Biology. – 2005. – Vol. 47. – P. 1173–1183. – DOI: 10.1111/j.1744-7909.2005.00167.x.
36. Li, Z. Belowground biomass dynamics in the carbon budget model of the Canadian forest sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP / Z. Li, W.A. Kurz, M.J. Apps [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2003. – Vol. 33. – P. 126–136. – DOI: 10.1139/x02-165.
37. Lieth, H. The determination of plant dry-matter production with special emphasis on the underground parts // In: F.E. Eckardt (ed.). Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level. Proc. Copenhagen Symposium. – Paris : UNESCO, 1968. – P. 179–186. (Natural Resources Research. – Vol. 5).
38. Litton, C.M. Belowground and aboveground biomass in young post fire lodgepole pine forests of contrasting tree density / C.M. Litton, M.G. Ryan, D.B. Tinker [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2003. – Vol. 33 (2). – P. 351–363. – DOI: 10.1139/x02-181.
39. Litton, C.M. Carbon allocation in forest ecosystems / C.M. Litton, J.W. Raich, M.G. Ryan // Global Change Biology. – 2007. – Vol. 13 (10). – P. 2089–2109. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x.
40. Mokany, K. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes / K. Mokany, R.J. Raison, A.S. Prokushkin // Global Change Biology. – 2006. – Vol. 12. – P. 84–96. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x.
41. Niklas, K.J. Modelling below- and aboveground biomass for non-woody and woody plants / K.J. Niklas // Annals of Botany. – 2005. – Vol. 95. – P. 315–321. – DOI: 10.1093/aob/mci028.
42. Niklas, K.J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates / K.J. Niklas // Annals of Botany. – 2006. – Vol. 97. – P. 155–163. – DOI: 10.1093/aob/mcj021.

43. Noguchi, K. High belowground biomass allocation in an upland black spruce (*Picea mariana*) stand in interior Alaska / K. Noguchi, M. Dannoura, M. Jomura [et al.] // Polar Science. – 2012. – Vol. 6 (1.l). – P. 133–141. – DOI: 10.1016/j.polar.2011.12.002.
44. Reich, P.B. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots / P.B. Reich, Y. Luo, J.B. Bradford [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2014. – Vol. 111 (38). – P. 13721–13726. – DOI: 10.1073/pnas.1216053111.
45. Robinson, D. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics / D. Robinson // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2007. – Vol. 274. – P. 2753–2759. – DOI: 10.1098/rspb.2007.1012.
46. Russell, M.B. Comparisons of allometric and climate-derived estimates of tree coarse root carbon stocks in forests of the United States / M.B. Russell, G.M. Domke, C.W. Woodall [et al.] // Carbon Balance and Management. – 2015. – Vol. 10. – P. 1–14. – DOI: 10.1186/s13021-015-0032-7.
47. Sanford, R.L. Jr. Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests / R.L. Sanford Jr, E. Cuevas // In: S.S. Mulkey, R.L. Chazdon, A.P. Smith (eds.). Tropical forest plant ecophysiology. – New York : Chapman and Hall, 1996. – P. 268-300. – DOI: 10.1007/978-1-4613-1163-8_10.
48. Tateno, R. Above- and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen / R. Tateno, T. Hishi, H. Takeda // Forest Ecology and Management. – 2004. – Vol. 193. – P. 297–306. – DOI: 10.1016/j.foreco.2003.11.011.
49. Usoltsev, V.A. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan / V.A. Usoltsev, J.K. Vanclay // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1995. – Vol. 10. – P. 305-312. – DOI: 10.1080/02827589509382897.
50. Usoltsev, V.A. Net primary production of Ural forests: Methods and results of automated estimating / V.A. Usoltsev, M.P. Voronov, V.P. Chasovskikh // Russian Journal of Ecology. – 2011. – Vol. 42 (5). – P. 362-370. – DOI: 10.1134/S1067413611050122.
51. Waisel, Y. Plant Roots: The Hidden Half. Third Edition / Y. Waisel, A. Eshel, U. Kafkafi. – New York : Marcel Dekker, Inc., 2002. – 1120 p. – DOI: 10.1201/9780203909423.
52. Yang, Y. Isometric biomass partitioning pattern in forest ecosystems: evidence from temporal observations during stand development / Y. Yang, Y. Luo // Journal of Ecology. – 2011. – Vol. 99. – P. 431–437. – DOI: 10.1111/j.1365-2745.2010.01774.x.
53. Zianis, D. On simplifying allometric analyses of forest biomass / D. Zianis, M. Mencuccini // Forest Ecology and Management. – 2004. – Vol. 187. – P. 311–332. – DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.007.

REFERENCES

1. Budaev Kh.R. The growth and formation of the pine root system depending on the types of vegetation conditions of the sands. In: *Wind erosion of soils and measures to combat it. Proceedings of the Buryat Institute of Natural Sciences*, *iss. 9 [Vetrovaya eroziya pochv i mery bor'by s nej. Trudy Buryatskogo in-ta estestvennykh nauk*, *vyp. 9]*, 1971, pp. 156–180. (In Russian).
2. Richardson S.D. Studying root development in a controlled environment. In: *Methods of studying the productivity of root systems and organisms of the rhizosphere (International Symposium of the USSR)) [Metody izucheniya produktivnosti kornevykh system i organizmov rizosfery (Mezhdunarodnyj simpozium SSSR)]*. Leningrad, Nauka, Leningrad branch, 1968, pp. 178–186. (In Russian).
3. Usoltsev V.A. Growth and structure of phytomass of stands. Novosibirsk, Nauka, Siberian branch, 1988, 253 p. URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
4. Usoltsev V.A. Compiling the data banks on forest phytomass. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998, 541 p., URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
5. Usoltsev V.A. Phytomass of sample trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatically determined geography, taxation standards. Ekaterinburg, Ural. state forestry engineering university, 2016, 336 p., ISBN 978-5-94984-568-4, URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
6. Usoltsev V.A. In the basements of the biosphere: What do we know about the primary production of tree roots? *Eco-Potential [Eko-potentsial*], 2018, № 4 (24), pp. 24–77. URL: http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/8024/1/eko4-18-04.pdf (accessed: 19.09.2024). (In Russian).

7. Usoltsev V.A. Phytomass of model trees for remote and ground-based taxation of Eurasian forests: monograph. 3rd edition, revised, Ekaterinburg, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural. state forestry engineering university, 2023a, 1 CD-ROM, ISBN 978-5-8295-0861-6, URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
8. Usoltsev V.A. Biomass and primary production of Eurasian forests: monograph. 4rd edition, revised, Ekaterinburg, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural. state forestry engineering university, 2023b, 1 CD-ROM, ISBN 978-5-8295-0862-3, URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
9. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. The ratio of underground biomass to aboveground one of forest-forming species of Eurasia in temperature and precipitation gradients. *Biosphere [Biosfera]*, 2022, vol. 14 (3), pp. 158–179. DOI: 10.24855/biosfera.v14i3.683. (In Russian).
10. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. Allometric models for estimating the biomass of roots of forest-forming genera of Eurasia by remote methods taking into account global warming. *Conifers of the boreal area [Khvojnye boreal'noj zony]*, 2022, vol. 40 (1), pp. 65–75. (In Russian).
11. Tsepordey I.S. Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia (edited by prof. V.A. Usoltsev). Ekaterinburg, Publishing house UMC UPI, 2023, 467 p. ISBN: 978-5-8295-0860-9. URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450 (accessed: 19.09.2024). (In Russian).
12. Askari Y., Soltani A., Akhavan R., Tahmasebi Kohyani P. Assessment of root-shoot ratio biomass and carbon storage of *Quercus brantii* Lindl. in the central Zagros forests of Iran. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, pp. 282–289. DOI: 10.17221/122/2015-JFS.
13. Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2 (1), pp. 49–53. Available at: https://www.esf.edu/quest/documents/Baskerville-1972-CJFR.pdf.
14. Bernier P.Y., Robitaille G., Rioux D. Estimating the mass density of pine roots of trees for minirhizotron-based estimates of productivity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35 (7), pp. 1708–1713. DOI: 10.1139/x05-099.
15. Bijak Sz., Zasada M., Bronisz A., Bronisz K., Czajkowski M., Ludwisiak Ł., Tomusiak R., Wojtan R. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47 (2), article id 963. Available at: http://www.silvafennica.fi/article/963.
16. Burkes E.C., Will R.E., Barron-Gafford G.A., Teskey R.O., Shiver B. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science*, 2003, vol. 49, pp. 224–234. DOI: 10.1093/forestscience/49.2.224.
17. Cairns M., Brown S., Helmer E., Baumgardner G. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 1997, vol. 111, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s004420050201.
18. Cannell M.G.R. World forest biomass and primary production data. London, Academic Press, 1982, 391 p.
19. Carmona C.P., Bueno C.G., Toussaint A., Träger S., Díaz S., Moora M., Munson A.D., Pärtel M., Zobel M., Tamme R. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function. *Nature*, 2021, vol. 597, article 683. DOI: 10.1038/s41586-021-03871-y.
20. Cheng D.-L., Niklas K.J. Above- and below-ground biomass relationships across 1534 forested communities. *Annals of Botany*, 2007, vol. 99, pp. 95–102. DOI: 10.1093/aob/mcl206.
21. Cuevas E., Brown S., Lugo A.E. Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. *Plant and Soil*, 1991, vol. 135, pp. 257–268. DOI: 10.1007/BF00010914.
22. Deans J.D. Dynamics of coarse root production in a young plantation of *Picea sitchensis*. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 1981, vol. 54 (2), pp. 139–155. DOI: 10.1093/forestry/54.2.139.
23. Enquist B.J., Niklas K.J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. *Science*, 2002, vol. 295, pp. 1517–1520. DOI: 10.1126/science.1066360.
24. Freschet G.T., Swart E.M., Cornelissen J.H.C. Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and belowground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction. *New Phytologist*, 2015, vol. 206, pp. 1247–1260. DOI: 10.1111/nph.13352.
25. Gerhardt K., Fredriksson D. Biomass allocation by broad-leaf mahogany seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in abandoned pasture and secondary dry forest in Guanacaste, Costa Rica. *Biotropica*, 1995, vol. 27, pp. 174–182. DOI: 10.2307/2388993.

26. Gower S.T., Gholz H.L., Nakane K., Baldwin V.C. Production and carbon allocation pattern of pine forests. *Ecological Bulletins*, 1994, vol. 43, pp. 115–135. Available at: https://www.jstor.org/stable/20113136.
27. Huang Y., Ciais P., Santoro M., Makowski D., Chave J., Schepaschenko D., Abramoff R.Z., Goll D.S., Yang H., Chen Y., Wei W., Piao S. A global map of root biomass across the world's forests. *Earth System Science Data*, 2021, vol. 13, pp. 4263–4274. DOI: 10.5194/essd-13-4263-2021.
28. Hui D., Jackson R.B. Geographical and inter-annual variability in biomass partitioning in grassland ecosystems: a synthesis of field data. *New Phytologist*, 2006, vol. 169 (1), pp. 85–93. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01569.x.
29. Hui D., Wang J., Le X., Shen W., Ren H. Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 264, pp. 72–80. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.10.012.
30. Hui D., Wang J., Shen W., Le X., Ganter P., Ren H. Near isometric biomass partitioning in forest ecosystems of China. *PLoS ONE*. 2014, vol. 9 (1), article e86550. DOI: 10.1371/journal.pone.0086550.
31. Iwasa Y., Roughgarden J. Shoot/root balance of plants: optimal growth of a system with many vegetative organs. *Theoretical Population Biology*, 1984, vol. 25 (1), pp. 78–105. DOI: 10.1016/0040-5809(84)90007-8.
32. Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 2003, vol. 49 (1), pp. 12–35. DOI: 10.1093/forestscience/49.1.12.
33. Jokela E.J., Martin T.A. Effects of ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 30, pp. 1511–1524. DOI: 10.1139/cjfr-30-10-1511.
34. Katayama A., Kho L.K., Makita N., Kume T., Matsumoto K., Ohashi M. Estimating fine root production from ingrowth cores and decomposed roots in a Bornean tropical rainforest. *Forests*, 2019, vol. 10, article 36. DOI: 10.3390/f10010036.
35. Li H.T., Han X.G., Wu J.G. Lack of evidence of ¾ scaling of metabolism in terrestrial plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, vol. 47, pp. 1173–1183. DOI: 10.1111/j.1744-7909.2005.00167.x.
36. Li Z., Kurz W.A., Apps M.J., Beukema S.J. Belowground biomass dynamics in the carbon budget model of the Canadian forest sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, pp. 126–136. DOI: 10.1139/x02-165.
37. Lieth H. The determination of plant dry-matter production with special emphasis on the underground parts. In: F.E. Eckardt (ed.). Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level. Proc. Copenhagen Symp., Paris, UNESCO, 1968, pp. 179–186 (Natural Resources Research, vol. 5).
38. Litton C.M., Ryan M.G., Tinker D.B., Knight D.H. Belowground and aboveground biomass in young post fire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Canadian Journal of Forest Research*. 2003, vol. 33 (2), pp. 351–363. DOI: 10.1139/x02-181.
39. Litton C.M., Raich J.W., Ryan M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13 (10), pp. 2089–2109. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x.
40. Mokany K., Raison R.J., Prokushkin A.S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, vol. 12, pp. 84–96. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x.
41. Niklas K.J. Modelling below- and aboveground biomass for non-woody and woody plants. *Annals of Botany*, 2005, vol. 95, pp. 315–321. DOI: 10.1093/aob/mci028.
42. Niklas K.J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates. *Annals of Botany*, 2006, vol. 97, pp. 155–163. DOI: 10.1093/aob/mcj021.
43. Noguchi K., Dannoura M., Jomura M., Awazuhara-Noguchi M., Matsuura Y. High belowground biomass allocation in an upland black spruce (*Picea mariana*) stand in interior Alaska. *Polar Science*, 2012, vol. 6 (1.l), pp. 133–141. DOI: 10.1016/j.polar.2011.12.002.
44. Reich P.B., Luo Y., Bradford J.B., Poorter H., Perry C.H., Oleksyn J. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2014, vol. 111 (38), pp. 13721–13726. DOI: 10.1073/pnas.1216053111.
45. Robinson D. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, vol. 274, pp. 2753–2759. DOI: 10.1098/rspb.2007.1012.
46. Russell M.B., Domke G.M., Woodall C.W., D'Amato A.W. Comparisons of allometric and climate-derived estimates of tree coarse root carbon stocks in forests of the United States. *Carbon Balance and Management*, 2015, vol. 10, pp. 1–14. DOI: 10.1186/s13021-015-0032-7.

47. Sanford R.L. Jr, Cuevas E. Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: S.S. Mulkey, R.L. Chazdon, A.P. Smith (eds). Tropical forest plant ecophysiology. New York, Chapman and Hall, 1996, pp. 268–300. DOI: 10.1007/978-1-4613-1163-8_10.
48. Tateno R., Hishi T., Takeda H. Above- and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 193, pp. 297–306. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.11.011.
49. Usoltsev V.A., Vanclay J.K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1995, vol. 10, pp. 305–312. DOI: 10.1080/02827589509382897.
50. Usoltsev V.A., Voronov M.P., Chasovskikh V.P. Net primary production of Ural forests: methods and results of automated estimating. *Russian Journal of Ecology*, 2011, vol. 42 (5), pp. 362–370. DOI: 10.1134/S1067413611050122.
51. Waisel Y., Eshel A., Kafkafi U. Plant Roots: The Hidden Half. Third Edition. New York, Marcel Dekker, Inc., 2002, 1120 p. DOI: 10.1201/9780203909423.
52. Yang Y., Luo Y. Isometric biomass partitioning pattern in forest ecosystems: evidence from temporal observations during stand development. *Journal of Ecology*, 2011, vol. 99, pp. 431–437. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2010.01774.x.
53. Zianis D., Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 187, pp. 311–332. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.007.

Статья поступила в редакцию 24.09.2024