

В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, Н.И. Плуха

ВЗАИМОСВЯЗИ ДИАМЕТРОВ СТВОЛА И КРОНЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

Введение. Крона дерева играет важную роль в процессе обмена веществ и энергии в лесном пологе посредством перехвата солнечной энергии и регулирования газового и водного обмена [Лузганов, Солодько, 1968; Молчанов, 2007; Lowman, 2012; Lei et al., 2018]. В прикладном аспекте крона дерева является источником биологически активных веществ, лекарственного сырья и некоторых пищевых продуктов, выполняет пылеулавливающую и шумопоглощающую роль, оптимизирует микроклимат в пологе [Грищенко и др., 1985].

Количество света, поступающего к дереву, тесно связано с распределением листвы, хвои и ветвей в кроне. Крона дерева отражает видоспецифичную структуру ветвления (сформировавшуюся в ходе филогенеза), а также является многоцелевым экологическим индикатором, отражающим условия произрастания и конкуренцию за ресурсы (сформировавшиеся в ходе онтогенеза) [Panagiotidis et al., 2017; Freudenberg et al., 2022; Guo et al., 2023; Štals et al., 2023]. Диаметр кроны (ДК), как одна из характеристик, определяющих распределение листвы, хвои и ветвей в пространстве полога, имеет важное значение для понимания архитектуры деревьев и динамики лесных экосистем [Umeki, Kikuzawa, 2000; Fischer, 2019]. ДК служит важной переменной при моделировании фитомассы деревьев [Hoffmann, Usoltsev, 2002; Gülci, 2021] и объема ствола [Gonzalez-Benecke, 2014], при выводе уравнений сбega [Kalliovirta, Tokola et al., 2005; Lacerda et al., 2022], моделировании прироста площади сечений стволов [Monserud, Sterba, 1996]. Кроме того, ДК связан с энергией роста деревьев [Zarnoch, 2004], влияет на их конкурентные отношения [Krajicek et al., 1961] и интенсивность отпада деревьев [Monserud, Sterba, 1996].

На процесс формирования кроны большое влияние оказывает густота древостоя, определяющая интенсивность конкурентных отношений между деревьями [Wang et al., 2017]. Модели ДК могут быть построены по данным свободно растущих деревьев и деревьев, растущих в условиях сомкнутого насаждения [Nemery et al., 2005]. Первые предполагают максимальное ис-

пользование биологического потенциала, а вторые учитывают конкуренцию за свет и иные ресурсы. Однако те и другие модели, рассчитанные на примере пихты китайской (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook), показали недостаточную точность прогнозирования [Fu et al., 2013]. На примере эвкалипта (*Eucalyptus obliqua* L'Hér.) в Австралии было показано, что для свободно растущих деревьев ДК линейно связан с диаметром ствола, но в условиях сомкнутого насаждения важной дополнительной переменной является высота деревьев [Curtin, 1964]. Анализ возрастной динамики ДК в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) минимальной и максимальной густоты показал, что в приспевающем возрасте ДК в первом варианте может иметь 7-кратное превышение по отношению к второму [Алексеев, 1975]. Тем не менее, при моделировании ДК густота древостоя бывает незначимой вследствие ее корреляции с диаметром ствола, к тому же в базах данных ее значения часто отсутствуют [Усольцев, 2016].

Сегодня имеется множество моделей ДК в связи с диаметром ствола, в основном, построенных на аллометрии (степенной функции) [Lockhart et al., 2005; Бабенко и др., 2008; Russell et al., 2011; Sharma et al., 2017; Westfall et al., 2020; Wang et al., 2022; Sun et al., 2022]. Одно из первых исследований связи ДК и диаметра ствола у бука европейского (*Fagus sylvatica* L.) показало наличие линейного характера связи при коэффициенте детерминации, равном 0,92 [Duchaufour, 1903]. В ходе дальнейших исследований для многих видов в различных природных зонах было установлено, что часто соотношение двух переменных было не линейным, а сигмоидным. Положительные смещения от линейной зависимости наблюдались у деревьев с минимальным диаметром ствола по причине замера его на высоте груди, а не у основания ствола, а отрицательные смещения – у крупных деревьев вследствие достижения ими перестойного возраста. Однако в диапазоне диаметров ствола от 20 до 50 см соотношение названных переменных было линейным [Dawkins, 1963]. Было показано [Shi et al., 2017], что соотношение диаметров ствола и кроны лучше аппроксимируется не линейной или аллометрической функцией, а параболой второго порядка, которая не проходит через начало координат. Это обуславливает существенные плюсовые и минусовые смещения при малых значениях переменных [Aldred, Alemdag, 1988].

Традиционные ручные методы измерения ДК требуют значительного времени и усилий. С развитием лазерных технологий появились более совершенные методы измерения ДК, позволяющие сканировать морфологию деревьев в пределах лесного выдела [Slavík et al., 2020], а спутниковые системы зондирования позволяют идентифицировать кроны деревьев с по-

мощью специальных алгоритмов [Wagner et al., 2018; Deluzet, 2022]. Эти технологии требуют высокого уровня знаний и дорогостоящей программной и аппаратной поддержки для обеспечения точных непрерывных измерений, однако они дают возможность измерения размеров кроны у большого количества деревьев в режиме реального времени. Таким образом, распространенным и экономически эффективным вариантом является разработка моделей ДК, включающих размеры дерева в качестве легко измеряемых независимых переменных [Uzoh et al., 2008; Sönmez, 2009; Усольцев, 2016; Sharma et al., 2017; Mensah et al., 2018; Liu et al., 2023].

С другой стороны, получили распространение аллометрические модели зависимости фитомассы от диаметра ствола для разных древесных видов [Усольцев, 1971; Luo et al., 2020]. Однако при бортовой лазерной таксации деревьев, даже посредством дронов, оснащенных современным оборудованием, точная оценка диаметра ствола невозможна [Rudge et al., 2021]. Поэтому стали совмещать названные традиционные аллометрические модели с вспомогательными моделями, предназначенными для применения на основе лазерного зондирования [Kalliovirta, Tokola, 2005]. Названные вспомогательные модели оценивают диаметр ствола на высоте груди или по диаметру кроны [Ayhan, 1974; Lockhart et al., 2005; Sönmez, 2009; Hernández-Cole, 2021], или по высоте дерева и диаметру кроны [Bonnor, 1968; Dalponte, Coomes, 2016; Jucker et al., 2017; Богданов и др., 2019]. Путем совмещения вспомогательных и традиционных аллометрических моделей оценивается фитомасса деревьев, и суммированием полученных расчетом данных в пределах пробных площадей даются оценки пулов углерода [Dalponte, Coomes, 2016; Jucker et al., 2017].

В связи с двумя основными направлениями применения взаимосвязей диаметров ствола и кроны, в настоящем исследовании поставлена цель разработки для лесообразующих видов Евразии двух типов всеобщих аллометрических моделей:

- зависимости диаметра кроны от диаметра ствола;
- зависимости диаметра ствола от диаметра кроны.

Объекты и методы исследования. Для осуществления поставленной цели исследования из сформированной базы данных в количестве 15800 определений [Усольцев, 2023] отобраны 5570 модельных деревьев 23 видов и родов (подродов), в том числе 3100 для семи хвойных и 2470 для шестнадцати лиственных видов и родов. Результаты статистической обработки общего массива исходных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты статистической обработки исходных данных**Results of statistical processing of initial data**

Статистики анализируемых показателей	D , см	D_{cr} , м
Среднее значение	14,1	2,81
Минимальное значение	0,20	0,07
Максимальное значение	72,9	15,50
Стандартное отклонение	9,67	1,76
Коэффициент изменчивости, %	68,6	62,7
Число наблюдений	5570	5570

Примечание: D и D_{cr} – соответственно диаметр ствола на высоте груди, см, и диаметр кроны, м.

При оценке и моделировании продуктивности лесных сообществ традиционно сосуществуют две концепции: локальности и всеобщности. Широкий спектр лесорастительных условий на территории России обуславливает необходимость составления локальных таблиц (нормативов) хода роста древостоев [Фалалеев, Поляков, 1975; Парамонов и др., 2021]. Но в силу изменчивости условий произрастания в пространстве и времени [Сеннов, 1983], обеспечить всё их многообразие локальными моделями и нормативами практически невозможно. Поэтому для практического применения в практике лесоустройства предложены всеобщие (унифицированные) таблицы хода роста [Загреев, 1974].

Количество аллометрических моделей фитомассы для отдельных видов исчисляется уже тысячами [Jenkins et al., 2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Hosoda, Iehara, 2010; Luo et al., 2020; Парамонов и др., 2022]. В то же время получили распространение аналогичные модели, обезличенные по видовому и родовому составу [Jucker et al. 2017, 2022]. Последние развиваются в рамках концепции «больших данных». Это так называемые обобщающие (generic) модели как общевидовые, так и общеродовые. Часть их имеет теоретическое обоснование: традиционные аллометрические модели [Gould, 1966], модели теории фракталов [West et al., 1999], модели теории метаболического масштабирования [West et al., 1997], модели теории адаптивного распределения масс [Poorter et al., 2015]. Базовым для теоретических аллометрических моделей является принцип: в основе кажущейся сложности растительных объектов лежат простые правила

[Whitfield, 2001]. В целом, авторы едины в мнении, что обобщенные модели дают лучшие оценки для общей надземной фитомассы, чем оценки надземной фитомассы, полученные суммированием оценок для листвы, ветвей и стволов [Усольцев, 2016]. Другая разновидность всеобщих аллометрических моделей предлагается на основе мета-анализа опубликованных моделей. При отсутствии исходных данных метамоделирование предоставляет региональную информацию, извлекаемую из опубликованных моделей путем генерирования и обобщения псевдоданных [Усольцев и др., 2023а]. Таким образом, в зависимости от назначения тех или иных моделей, при их построении могут быть использованы концепции как локальности, так и всеобщности.

Наше исследование построено на концепции всеобщности, а именно на моделировании взаимосвязи диаметров ствола и кроны на уровне родов и подродов как совокупностей викарирующих видов, произрастающих на территории Евразии. Виды в пределах рода представлены исходными данными крайне неравномерно: например, обильно обеспечен такой двухвойный вид, как сосна обыкновенная, но практически отсутствуют данные по сосне черной (*P. nigra subsp. Pallasiana* (Lamb.) Holmboe). Также широко представлена исходными данными липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), но недостаточны данные по липе амурской (*T. amurensis* Rupr.) и т. д. Полностью отсутствуют данные о кедре европейском (*Pinus cembra* L.), тополе белом (*Populus alba* L.), липе сибирской (*T. sibirica* Bayer) и многих других видах. Построение моделей на уровне не только видов, но также родов и подродов, позволяет применить их в локальных условиях и заполнить имеющиеся «белые пятна» по отдельным видам. Видовой состав родов и подродов показан в нашей предыдущей публикации [Усольцев и др., 2023в].

В нашем исследовании, по аналогии с предыдущими исследователями (Gering, May, 1995), приняты два варианта структуры аллометрической модели:

$$\ln D_{cr} = a_0 + a_1(\ln D); \quad (1)$$

$$\ln D = a_0 + a_1(\ln D_{cr}). \quad (2)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты расчета моделей (1) и (2) представлены в табл. 2. Все регрессионные коэффициенты моделей, представленных в табл. 2, статистически значимы на уровне $p < 0,001$, что обеспечивает воспроизводимость полученных результатов [Guttinger, 2020]. Свободный член моделей скорректирован на логарифмическое преобразование [Baskerville, 1972].

Таблица 2

Результаты расчета моделей (1) и (2)

Results of calculating models (1) and (2)

№ п/п	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		SE	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (2)		SE	adjR ²	n
		a ₀	a ₁			a ₀	a ₁			
1	Подрод <i>Pinus</i> L. (двухвойные сосны)									
	lnD _{cr}	-0,6107	0,5785	0,34	lnD	1,7096	1,0717	0,46	0,620	2088
2	Род <i>Picea</i> Dietr. (ели)									
	lnD _{cr}	-0,1413	0,4444	0,25	lnD	0,9966	1,6232	0,48	0,721	632
3	Род <i>Abies</i> Mill. (пихты)									
	lnD _{cr}	-0,5956	0,6148	0,35	lnD	2,3332	0,6274	0,36	0,379	90
4	Подрод <i>Haploxyton</i> (Кохне) (пятивойные сосны)									
	lnD _{cr}	-0,4751	0,6114	0,25	lnD	1,1682	1,2650	0,36	0,771	92
5	Род <i>Larix</i> Mill. (лиственницы)									
	lnD _{cr}	-0,4767	0,6235	0,29	lnD	1,2553	1,2692	0,42	0,790	140
6	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don. (криптомерия японская)									
	lnD _{cr}	-0,7227	0,5899	0,13	lnD	1,6334	1,2921	0,19	0,753	30
7	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endl. (кипарисовик)									
	lnD _{cr}	-0,7559	0,7246	0,17	lnD	1,3504	1,1135	0,22	0,799	28
8	Род <i>Betula</i> L. (березы)									
	lnD _{cr}	-0,8492	0,7610	0,39	lnD	1,7196	0,8438	0,42	0,642	734
9	Род <i>Populus</i> L. (осины и тополя)									
	lnD _{cr}	-0,4865	0,6385	0,24	lnD	1,1984	1,2429	0,34	0,793	280
10	Род <i>Alnus</i> Gaertn. (ольхи)									
	lnD _{cr}	-0,8426	0,6744	0,37	lnD	2,0522	0,7625	0,40	0,513	405
11	Род <i>Tilia</i> L. (липы)									
	lnD _{cr}	-1,3845	0,9275	0,46	lnD	2,3699	0,5026	0,34	0,462	130
12	Род <i>Quercus</i> L. (дубы)									
	lnD _{cr}	0,2137	0,4485	0,46	lnD	1,8149	0,7499	0,60	0,335	390

Окончание табл. 2

№ п/п	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		SE	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (2)		SE	$adjR^2$	n
		a_0	a_1			a_0	a_1			
13	Род <i>Fagus</i> L. (буки)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5424	0,6441	0,30	$\ln D$	1,4556	1,0310	0,38	0,663	223
14	Род <i>Fraxinus</i> L. (ясени)									
	$\ln D_{cr}$	-0,3433	0,6121	0,32	$\ln D$	1,4059	1,1057	0,43	0,673	78
15	Род <i>Carpinus</i> L. (грабы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1854	0,5711	0,37	$\ln D$	1,5143	0,8919	0,46	0,504	100
16	Род <i>Salix</i> L. (ивы)									
	$\ln D_{cr}$	-0,5022	0,7461	0,08	$\ln D$	0,7066	1,3175	0,11	0,981	10
17	<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Scvorts. (чозения)									
	$\ln D_{cr}$	0,1938	0,5047	0,42	$\ln D$	0,6787	1,3423	0,68	0,656	17
18	Род <i>Acer</i> L. (клены)									
	$\ln D_{cr}$	0,1138	0,6292	0,22	$\ln D$	0,9693	1,0153	0,28	0,611	15
19	<i>Robinia pseudoacacia</i> L. (робиния ложноакациевая, или акация белая)									
	$\ln D_{cr}$	-0,1119	0,4904	0,37	$\ln D$	1,8437	0,8583	0,50	0,411	60
20	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)									
	$\ln D_{cr}$	0,9381	0,3758	0,12	$\ln D$	-1,5331	2,1911	0,28	0,788	7
21	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. (маакия амурская)									
	$\ln D_{cr}$	0,6510	0,4272	0,10	$\ln D$	-1,0384	2,0807	0,21	0,867	7
22	<i>Ulmus japonica</i> (Rehd.) Sarg. (вяз японский)									
	$\ln D_{cr}$	0,8460	0,3359	0,17	$\ln D$	0,1736	1,5394	0,36	0,420	7
23	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. (орех маньчжурский)									
	$\ln D_{cr}$	1,3456	0,2417	0,10	$\ln D$	-2,6959	2,7941	0,34	0,610	7

Примечание: $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка моделей (1) и (2); n – количество наблюдений.

В табл. 2 коэффициент детерминации идентичен для обеих моделей. Как следует из табл. 2, для некоторых родов коэффициент детерминации находится на уровне 0,34–0,38, что обусловлено влиянием неучтенных факторов, таких как густота или добротность местопроизрастания. Тем не менее, как уже отмечалось, все модели статистически значимы. Невысокие

значения коэффициента детерминации в подобных взаимосвязях в литературе нередки. Например, на высотном градиенте Южного Урала в диапазоне высот от 1210 до 1360 м над ур. м. связь диаметров кроны и ствола характеризуется коэффициентом детерминации 0,27 [Нагимов и др., 2007].

Модели (1) и (2) имеют применение, основанное на рекурсивном принципе [Четыркин, 1977]. В первом случае мы имеем построенные ранее модели зависимости фитомассы деревьев (P_i) от ДК по данным непосредственного измерения последнего, например, с помощью дрона [Усольцев и др., 2023; 2023б]. В подобном случае модели (1) совмещаются с моделями фитомассы как связанные (рекурсивные) зависимости:

$$D_{cr} = f(D) \rightarrow P_i = f(D_{cr}). \quad (3)$$

Во втором случае имеем построенные ранее модели зависимости фитомассы деревьев от диаметра ствола по фактическим данным непосредственного измерения последнего на традиционных пробных площадях [Усольцев и др., 2022]. Совмещение моделей осуществляется аналогичным образом:

$$D = f(D_{cr}) \rightarrow P_i = f(D). \quad (4)$$

Далее выполнено ранжирование каждого из моделируемых показателей при фиксированных значениях другого (рис. 1 и 2).

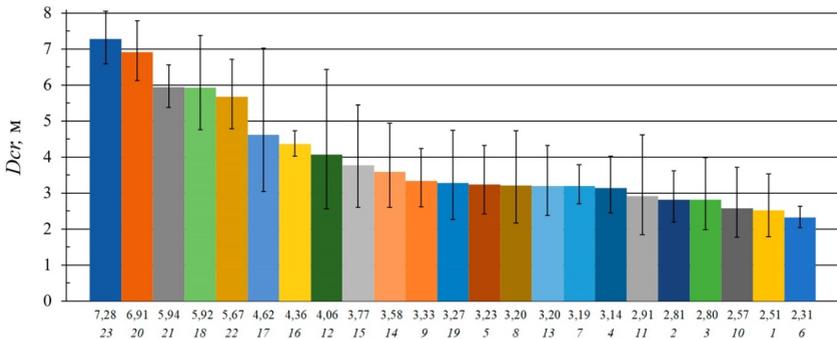


Рис. 1. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра кроны при среднем значении диаметра ствола на высоте груди, равном 14,1 см (табл. 1). Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра кроны для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

Fig. 1. Diagram of the distribution of 23 species, genera and subgenera of Eurasia by crown diameter with an average stem diameter at breast height equal to 14,1 cm (Table 1). Figures on the abscissa axis: in the upper row are the crown diameter values for each of the 23 species, genera and subgenera, m; in the bottom row is the ordinal number of the species, genus or subgenus shown in Table 2

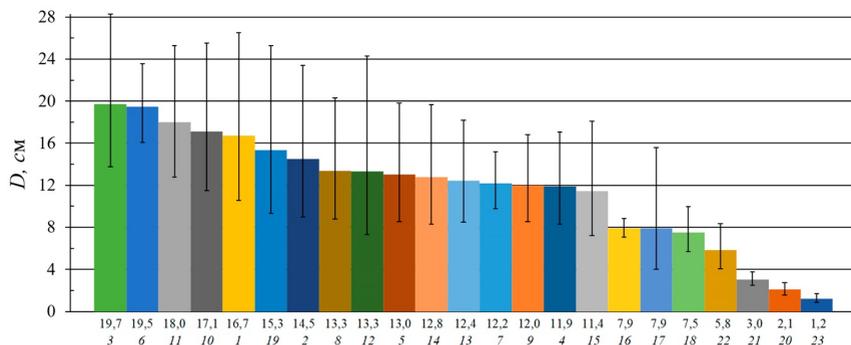


Рис. 2. Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине диаметра ствола на высоте груди при среднем значении диаметра кроны, равном 2,81 м (табл. 1). Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения диаметра ствола для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковый номер вида, рода или подрода, показанный в табл. 2

Fig. 2. Diagram of the distribution of 23 species, genera and subgenera of Eurasia by stem diameter at breast height with an average crown diameter of 2,81 m (Table 1). Figures on the abscissa axis: in the upper row are the stem diameter values for each of the 23 species, genera and subgenera, m; in the bottom row is the ordinal number of the species, genus or subgenus shown in Table 2

Очевидно, что ранжирования видов, родов и подродов Евразии по двум моделируемым показателям не совпадают. Более того, по некоторым видам они прямо противоположны. Например, орех маньчжурский и бархат амурский по диаметру кроны имеют высшие ранги, а по диаметру ствола – низшие (рис. 1 и 2).

Используя технику рангового корреляционного анализа [Митропольский, 1971], выясняем степень коррелированности ранговых распределений видов, родов и подродов по двум моделируемым показателям. Оказалось, что зависимость числовых значений рангов родов по диаметру ствола от числовых значений рангов по диаметру кроны имеет обратно пропорциональный характер и выражается линейным уравнением

$$(\text{Ранг по } D) = 19,48 - 0,6235(\text{ранг по } D_{кр}); \text{adj}R^2 = 0,360; \text{SE} = 5,4. \quad (5)$$

В то же время, зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны имеет прямо пропорциональный характер (табл. 2). Значимость коэффициента регрессии по Стьюденту в уравнении (5) составила 3,7, что превышает стандартный уровень вероятности $P_{0,999}$, равный 3,3.

Прямо противоположный характер связи рангов двух диаметров, с одной стороны, и фактических значений двух диаметров, с другой стороны, на фоне фактических данных показан на рис. 3.

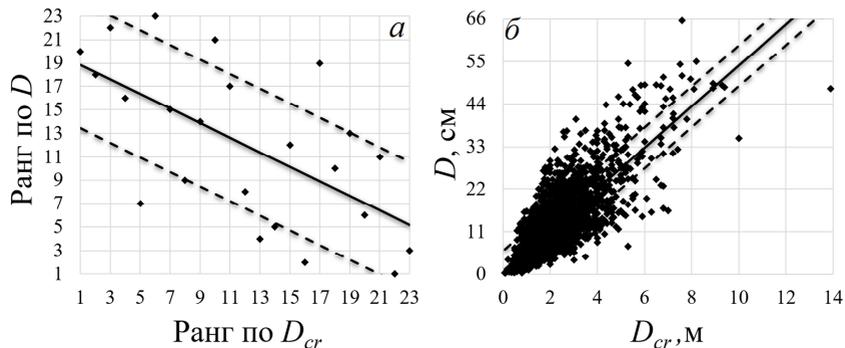


Рис. 3. Зависимость ранга рода по диаметру ствола от ранга по диаметру кроны согласно уравнению (5) (а) и зависимость фактических значений диаметра ствола от диаметра кроны по уравнению (2) для сосен, показанному в табл. 2 (б).

Пунктирными линиями показано среднеквадратическое отклонение

Fig. 3. The dependence of the rank of the genus in stem diameter upon the rank in crown diameter according to equation (5) (a) and the dependence of the actual values of stem diameter upon crown diameter according to equation (2) for pines shown in Table 2 (b). The dotted lines show the standard deviation

Выводы. Таким образом, по фактическим данным 3100 модельных деревьев для семи хвойных и 2470 деревьев для шестнадцати лиственных видов и родов (подродов) разработаны 23 аллометрические модели зависимости диаметра кроны от диаметра ствола и зависимости диаметра ствола от диаметра кроны, характеризуемые коэффициентами детерминации в диапазоне от 0,34 (для дубов) до 0,98 (для ив). Все модели значимы на уровне t_{001} и выше. Они предназначены для совмещения с существующими моделями связи фитомассы деревьев с ДК или с диаметром ствола по рекурсивному принципу.

Выполнено ранжирование всех родов как по диаметру кроны, так и по диаметру ствола с последующим ранговым регрессионным анализом, включающим взаимозависимость двух ранговых распределений 23 родов. Установлена отрицательная связь ранговых распределений родов по диаметру кроны и по диаметру ствола, в то время как зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны в возрастном ряду имеет

прямо пропорциональный характер. Таким образом, взаимосвязь диаметра кроны с диаметром ствола может быть как отрицательной, так и положительной, в зависимости от того или иного приложения или контекста.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алексеев В.А.* Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 227 с.
- Бабенко Т.С., Нагимов З.Я., Моисеев П.А.* Закономерности роста деревьев и древостоев ели сибирской в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель). Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. 125 с.
- Богданов А.П., Алешко Р.А., Ильинцев А.С.* Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 4. С. 1–10.
- Гриценко А.В., Кучерявый В.А., Томчук Р.И., Задорожный В.В.* Крона дерева: промышленное и рекреационное использование. Львов: Вища школа, 1985. 168 с.
- Загреев В.В.* Всеобщие таблицы хода роста нормальных сосновых древостоев // Современное лесоустройство и таксация леса: сб. науч. трудов. М.: ВНИИЛМ, 1974. Вып. 4. С. 61–107.
- Лузанов А.Г., Солодьяко А.С.* Форма кроны и рассеянный свет // ИВУЗ. Лесной журнал. 1968. № 6. С. 29–33.
- Митропольский А.К.* Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
- Молчанов А.Г.* Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.
- Нагимов З.Я., Бабенко Т.С., Шевченко И.Г., Рахманов И.В., Моисеев П.А.* Особенности роста и формирования фитомассы древостоев ели в высокогорьях Южного Урала (на примере г. Малый Ирмель) // Хвойные бореальной зоны, 2007. Т. XXIV. № 4–5. С. 427–430.
- Парамонов А.А., Третьяков С.В., Контев С.В.* Таблицы хода роста нормальных ивовых древостоев таежной зоны северо-востока европейской части России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2021. № 2. С. 17–27.
- Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Контев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С.* Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 4. С. 10–19. DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002.
- Сеннов С.Н.* О методике моделирования производительности // Моделирование и контроль производительности древостоев. Каунас: ЛитСХА, 1983. С. 44–46.

Усольцев В.А. Взаимосвязь некоторых таксационных элементов кроны и ствола у березы пушистой в Северном Казахстане // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1971. № 2. С. 80–84.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 336 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е доп. изд-е. Екатеринбург: Боганический сад УрО РАН, Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Контев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. 2023а. Т. 15(1). С. 7–20. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789.

Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В.П. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные boreальной зоны. 2023б. Т. 41(4). С. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.

Усольцев В.А., Цепордей И.С. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование // Хвойные boreальной зоны. 2023в. Т. 41. № 6. С. 504–514.

Фалалеев Э.Н., Поляков В.С. Ход роста модальных древостоев пихты Ангарского района // Ход роста основных лесообразующих пород Сибири. Красноярск: СибТИ, 1975. С. 125.

Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.

Aldred A.H., Alemdag I.S. Guidelines for forest biomass inventory. Information Report PI-X-77. Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forestry Service, 1988. 133 p.

Ayhan H.O. Crown diameter: dbh relations in Scots pine // Arbor. 1974. Vol. 5. P. 15–25.

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2(1). P. 49–53.

Bonnor G.M. Stem diameter estimates from crown width and tree height // Commonwealth Forestry Review. 1968. Vol. 47. P. 8–13.

Curtin R.A. Stand density and the relationship of crown width to diameter and height in *Eucalyptus obliqua* // Australian Forestry. 1964. Vol. 28(2). P. 91–105.

Dalponte M., Coomes D.A. Tree-centric mapping of forest carbon density from air-borne laser scanning and hyperspectral data // Methods in Ecology and Evolution. 2016. Vol. 7 (10). P. 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575.

Dawkins H.C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees // *Commonwealth Forestry Review*. 1963. Vol. 42. P. 318–333.

Deluzet M., Erudel T., Briottet X., Sheeren D., Fabre S. Individual tree crown delineation method based on multi-criteria graph using geometric and spectral information: Application to several temperate forest sites // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Article 1083. DOI: 10.3390/rs14051083.

Duchaufour A. L'aménagement de la Forêt de Compiègne // *Revue Eaux et Forêt*. 1903. Vol. 42. P. 65–78.

Fischer F.J., Maréchaux I., Chave J. Improving plant allometry by fusing forest models and remote sensing // *New Phytologist*. 2019. Vol. 223. P. 1159–1165. DOI: 10.1111/nph.15810.

Freudenberg M., Magdon P., Nölke N. Individual tree crown delineation in high-resolution remote sensing images based on U-Net // *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34. P. 22197–22207. DOI: 10.1007/s00521-022-07640-4.

Fu L., Sun H., Sharma R.P., Lei Y., Zhang H., Tang S. Nonlinear mixed-effects crown width models for individual trees of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in south-central China // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 302. P. 210–220. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.036/.

Gering L.R., May D.M. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee // *Southern Journal of Applied Forestry*. 1995. Vol. 19. P. 177–181.

Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A. Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25. P. 43–52. DOI: 10.1007/s11676-014-0427-4.

Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny // *Biological Reviews*. 1966. Vol. 41. P. 587–640.

Gülci S., Akay A.E., Gülci N., Tas I. An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation // *Ecological Informatics*. 2021. Vol. 63(4). Article 101303. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101303.

Guo Q., Su Y., Hu T. Applications of LiDAR in biodiversity conservation, ecohydrology, and ecological process modeling of forest ecosystems // *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology* / Guo Q., Su Y., Hu T. (eds.). Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2023. P. 407–442. DOI: 10.1016/B978-0-12-823894-3.00013-X.

Guttinger S. The limits of replicability // *European Journal for Philosophy of Science*. 2020. Vol. 10. P. 1–17. DOI: 10.1007/s13194-019-0269-1.

Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees // *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 215. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.016.

Hernández-Cole J., Ortiz-Malavassi E., Moya R., Murillo O. Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *Tectona*

grandis in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica // Drones. 2021. Vol. 5(2). Article 47. DOI: 10.3390/drones5020047.

Hoffmann C.W., Usoltsev V.A. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 158. P. 59–69. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00669-1.

Hosoda K, Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // Journal of Forestry Research. 2010. Vol. 15(5). P. 299–306. DOI: 10.1007/s10310-010-0192-y.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species. USDA Forest Service Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319. 2004. URL: <http://www.fs.fed.us/ne>.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programs // Global Change Biology. 2017. Vol. 23. P. 177–190. DOI: 10.1111/gcb.13388.

Jucker T., Fischer F. J., Chave J., Coomes D.A., Caspersen J., Ali A. et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. P. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // Silva Fennica. 2005. Vol. 39(2). P. 227–248. DOI: 10.14214/sf.386.

Krajicek J.E., Brinkman K.A., Gingrich S.F. Crown competition – A measure of density // Forest Science. 1961. Vol. 7. P. 35–42.

Lacerda T.H.S., Miranda E.N., Lopes I.L., Fonseca G.R., França L.C., Gomide L.R. Feature selection by genetic algorithm in nonlinear taper model // Canadian Journal of Forest Research. 2022. Vol. 52(5). P. 769–779. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0265.

Lei Y., Fu L., Affleck D.L.R., Nelson A.S., Shen C., Wang M., Zheng J., Ye Q., Yang G. Additivity of nonlinear tree crown width models: Aggregated and disaggregated model structures using nonlinear simultaneous equations // Forest Ecology and Management. 2018. Vol. 427. P. 372–382. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.013.

Liu S., Wang J., Jiang L. Assessment of potential prediction and calibration methods of crown width for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China // Forests. 2023. Vol. 14(10). Article 2022. DOI: 10.3390/f14102022.

Lockhart B.R., Weih R.C., Smith K.M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species // Journal of the Arkansas Academy of Science. 2005. Vol. 59. P. 110–115. URL: <http://scholarworks.uark.edu/jaas/vol59/iss1/16>.

Lowman M.D., Schowalter T.D. Plant science in forest canopies – The first 30 years of advances and challenges (1980–2010) // New Phytologist. 2012. Vol. 194(1). P. 12–27. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04076.x.

Luo Y., Wang X., Ouyang Z., Lu F., Feng L., Tao J. A review of biomass equations for China's tree species // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12(1). P. 21–40. DOI: 10.5194/essd-12-21-2020.

Mensah S., Pienaar O.L., Kunneke A., Du Toit B., Seydack A., Uhl E., Pretzsch H., Seifert T. Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 410. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.030.

Monserud R.A., Sterba H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria // *Forest Ecology and Management*. 1996. Vol. 80(1-3). P. 57–80. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03638-5.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40(4). P. 763–773. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf404763.pdf>.

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 38. P. 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028.

Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // *New Phytologist*. 2015. Vol. 208(3). P. 736–749. DOI: 10.1111/nph.13571.

Rudge M.L.M., Levick S.R., Bartolo R.E., Erskine P.D. Modelling the diameter distribution of savanna trees with drone-based LiDAR // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(7). Article 1266. DOI: 10.3390/rs13071266.

Russell M.B., Weiskittel A.R. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine // *Northern Journal of Applied Forestry*. 2011. Vol. 28(2). P. 84–91. DOI: 10.1093/njaf/28.2.84.

Sharma R.P., Bilek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe // *Trees*. 2017. Vol. 31(6). P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

Shi J., Feng Z., Liu J. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33(11). P. 82–90. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.011.

Slavik M., Kuželka K., Modlinger R., Tomášková I., Surový P. UAV laser scans allow detection of morphological changes in tree canopy // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 3829. DOI: 10.3390/rs12223829.

Sönmez T. Diameter at breast height – crown diameter prediction models for *Picea orientalis* // *African Journal of Agricultural Research*. 2009. Vol. 4(3). P. 215–219. URL: <http://www.academicjournals.org/AJAR>.

Štals T.A., Bardule A., Dumiš K., Makovskis K., Lazdina D. Remote-sensed tree crown diameter as a predictor of stem diameter and above-ground biomass in *Betula pendula* Roth and *Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L. plantations // *Land*. 2023. Vol. 12. Article 2006. DOI: 10.3390/land12112006.

Sun Z., Wang Y., Pan L., Sun Y. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 143. Article 109322. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109322.

Umeki K., Kikuzawa K. Patterns in individual growth, branch population dynamics, and growth and mortality of first-order branches of *Betula platyphylla* in northern Japan // *Annals of Forest Science*. 2000. Vol. 57. P. 587–598. DOI: 10.1051/forest:2000144.

Uzoh F.C.C., Oliver W.W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 256. P. 438–445. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.012.

Wagner F.H., Ferreira M.P., Sanchez A., Hirye M.C.M., Zortea M., Gloor E., Phillips O.L., de Souza Filho C.R., Shimabukuro Y.E., Aragão L.E.O.C. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 145. P. 362–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.013.

Wang C.-S., Zeng J., Hein S., Zhao Z., Guo J.-J., Zeng J. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 32(8). P. 679–687. DOI: 10.1080/02827581.2016.1261936.

Wang J., Jiang L., Yan Y. The impacts of climate, competition, and their interactions on crown width for three major species in Chinese boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2022. Vol. 526(12). Article 120597. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120597.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology // *Science*. 1997. Vol. 276. P. 122–126. DOI: 10.1126/science.276.5309.122.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // *Nature*. 1999. Vol. 400. P. 664–667. DOI: 10.1038/23251.

Westfall J.A., Nowak D.J., Henning J.G., Lister T.W., Edgar C.B., Majewsky M.A., Sonti N.F. Crown width models for woody plant species growing in urban areas of the U.S // *Urban Ecosystems*. 2020. Vol. 23. P. 905–917. DOI: 10.1007/s11252-020-00988-2.

Whitfield J. All creatures great and small // *Nature*. 2001. Vol. 413. P. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

Zarnoch S.J., Bechtold W.A., Stolte K.W. Using crown condition variables as indicators of forest health // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. P. 1057–1070. DOI: 10.1139/x03-277

References

Aldred A.H., Alemdag I.S. Guidelines for forest biomass inventory. Information Report PI-X-77. Petawawa National Forestry Institute; Canadian Forestry Service, 1988. 133 p.

Alekseev V.A. Light regime of the forest. L.; Nauka, 1975. 227 p. (In Russ.)

Ayhan H.O. Crown diameter: dbh relations in Scots pine. *Arbor*, 1974, vol. 5, pp. 15–25.

Babenko T.S., Nagimov Z.Ya., Moiseev P.A. Patterns of growth of trees and stands of Siberian spruce in the highlands of the Southern Urals (on the example of the town of Maly Iremel). Yekaterinburg; Ural State Forestry Engineering University, 2008. 125 p. (In Russ.)

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.

Bogdanov A.P., Aleshko R.A., Ilyintsev A.S. Identification of the relationship of the diameter of tree crowns with various taxation indicators in the North taiga forest area. *Questions of forest Science*, 2019, vol. 2(4), pp. 1–10 (In Russ.)

Bonnor G.M. Stem diameter estimates from crown width and tree height. *Commonwealth Forestry Review*, 1968, vol. 47, pp. 8–13.

Chetyrkin E.M. Statisticheskie metody prognozirovaniya (Statistical forecasting methods), M.; Statistika, 1977. 200 p. (In Russ.)

Curtin R.A. Stand density and the relationship of crown width to diameter and height in *Eucalyptus obliqua*. *Australian Forestry*, 1964, vol. 28(2), pp. 91–105.

Dalponte M., Coomes D.A. Tree-centric mapping of forest carbon density from air-borne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, vol. 7(10), pp. 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575.

Dawkins H.C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. *Commonwealth Forestry Review*, 1963, vol. 42, pp. 318–333.

Deluzet M., Erudel T., Briottet X., Sheeren D., Fabre S. Individual tree crown delineation method based on multi-criteria graph using geometric and spectral information: Application to several temperate forest sites. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, article 1083. DOI: 10.3390/rs14051083.

Duchaufour A. L'aménagement de la Forêt de Compiègne. *Revue Eaux et Forêt*, 1903, vol. 42, pp. 65–78.

Falaleev E.N., Polyakov V.S. The course of growth of modal fir stands of the Angarsk district. In: *The course of growth of the main forest-forming species of Siberia*. Krasnoyarsk: SibTI, 1975, p. 125. (In Russ.)

Fischer F.J., Maréchaux I., Chave J. Improving plant allometry by fusing forest models and remote sensing. *New Phytologist*, 2019, vol. 223, pp. 1159–1165. DOI: 10.1111/nph.15810.

Freudenberg M., Magdon P., Nölke N. Individual tree crown delineation in high-resolution remote sensing images based on U-Net. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 34, pp. 22197–22207. DOI: 10.1007/s00521-022-07640-4.

Fu L., Sun H., Sharma R.P., Lei Y., Zhang H., Tang S. Nonlinear mixed-effects crown width models for individual trees of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in south-central China. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 302, pp. 210–220. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.036/.

Gering L.R., May D.M. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee. *Southern Journal of Applied Forestry*, 1995, vol. 19, pp. 177–181.

Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A. Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, pp. 43–52. DOI: 10.1007/s11676-014-0427-4.

Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 1966, vol. 41, pp. 587–640.

Grishchenko A.V., Kucheryavy V.A., Tomchuk R.I., Zadorozhny V.V. Tree crown: industrial and recreational use. Lviv; Vishcha shkola, 1985. 168 p. (In Russ.)

Gülci S., Akay A.E., Gülci N., Tas I. An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation. *Ecological Informatics*, 2021, vol. 63(4), article 101303. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101303.

Guo Q., Su Y., Hu T. Applications of LiDAR in biodiversity conservation, ecohydrology, and ecological process modeling of forest ecosystems. In: *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology* / Guo Q., Su Y., Hu T. (eds.). Academic Press; Cambridge, MA, USA, 2023, pp. 407–442. DOI: 10.1016/B978-0-12-823894-3.00013-X.

Guttinger S. The limits of replicability. *European Journal for Philosophy of Science*, 2020, vol. 10, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s13194-019-0269-1.

Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 215, pp. 285–294. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.016.

Hernández-Cole J., Ortiz-Malavassi E., Moya R., Murillo O. Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *Tectona grandis* in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica. *Drones*, 2021, vol. 5(2), article 47. DOI: 10.3390/drones5020047.

Hoffmann C.W., Usoltsev V.A. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 158, pp. 59–69. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00669-1.

Hosoda K, Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. *Journal of Forestry Research*, 2010, vol. 15(5), pp. 299–306. DOI: 10.1007/s10310-010-0192-y.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species. USDA Forest Service Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319; 2004. 47 p. URL: <http://www.fs.fed.us/ne>.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programs. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, pp. 177–190. DOI: 10.1111/gcb.13388.

Jucker T., Fischer F. J., Chave J., Coomes D.A., Caspersen J., Ali A. et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database. *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, pp. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302.

Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39(2), pp. 227–248. DOI: 10.14214/sf.386.

Krajicek J.E., Brinkman K.A., Gingrich S.F. Crown competition – A measure of density. *Forest Science*, 1961, vol. 7, pp. 35–42.

Lacerda T.H.S., Miranda E.N., Lopes I.L., Fonseca G.R., França L.C., Gomide L.R. Feature selection by genetic algorithm in nonlinear taper model. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 52(5), pp. 769–779. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0265.

Lei Y., Fu L., Affleck D.L.R., Nelson A.S., Shen C., Wang M., Zheng J., Ye Q., Yang G. Additivity of nonlinear tree crown width models: Aggregated and disaggregated model structures using nonlinear simultaneous equations. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 427, pp. 372–382. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.013.

Liu S., Wang J., Jiang L. Assessment of potential prediction and calibration methods of crown width for Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in Northeastern China. *Forests*, 2023, vol. 14(10), article 2022. DOI: 10.3390/f14102022.

Lockhart B.R., Weih R.C., Smith K.M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 2005, vol. 59, pp. 110–115. URL: <http://scholarworks.uark.edu/jaas/vol59/iss1/16>.

Lowman M.D., Schowalter T.D. Plant science in forest canopies – The first 30 years of advances and challenges (1980–2010). *New Phytologist*, 2012, vol. 194(1), pp. 12–27. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04076.x.

Luo Y., Wang X., Ouyang Z., Lu F., Feng L., Tao J. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data*, 2020, vol. 12(1), pp. 21–40. DOI: 10.5194/essd-12-21-2020.

Luzganov A.G., Solod'ko A.S. Crown shape and scattered light. *IVUZ. Forestry Journal*, 1968, no. 6, pp. 29–33. (In Russ.)

Mensah S., Pienaar O.L., Kunneke A., Du Toit B., Seydack A., Uhl E., Pretzsch H., Seifert T. Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 410, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.030.

Mitropolsky A.K. Technique of statistical computations. M.: Nauka, 1971. 576 p. (In Russ.)

Molchanov A.G. CO₂ balance in ecosystems of pine forests and oak forests in different forest zones. Tula; Grif and K, 2007. 284 p. (In Russ.)

Monserud R.A., Sterba H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 1996, vol. 80(1-3), pp. 57–80. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03638-5.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40(4), pp. 763-773. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf404763.pdf>.

Nagimov Z.Ya., Babenko T.S., Shevchenko I.G., Rakhmanov I.V., Moiseev P.A. Features of growth and formation of phytomass of spruce stands in the highlands of the Southern Urals (on the example of the town of Maly Iremel). *Conifers of the boreal area*, 2007, vol. XXIV, iss. 4–5, pp. 427–430. (In Russ.)

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, pp. 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028.

Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V. Yield tables of normal willow stands of the taiga zone of the north-east of the European part of Russia. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2021, No. 2, pp. 17–27. (In Russ.)

Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Biomass of willow trees and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region. *Forests of Russia and the economy in them*, 2022, No. 4, pp. 10–19. DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002. (In Russ.)

Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208(3), pp. 736–749. DOI: 10.1111/nph.13571.

Rudge M.L.M., Levick S.R., Bartolo R.E., Erskine P.D. Modelling the diameter distribution of savanna trees with drone-based LiDAR. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(7), article 1266. DOI: 10.3390/rs13071266.

Russell M.B., Weiskittel A.R. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2011, vol. 28(2), pp. 84–91. DOI: 10.1093/njaf/28.2.84.

Senov S.N. On the methodology of yield modeling // Modeling and monitoring the yield of stands. Kaunas: LitSHA, 1983, pp. 44–46. (In Russ.)

Sharma R.P., Bilek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe. *Trees*, 2017, vol. 31(6), pp. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

Shi J., Feng Z., Liu J. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, vol. 33(11), pp. 82–90. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.011.

Slavik M., Kuželka K., Modlinger R., Tomášková I., Surový P. UAV laser scans allow detection of morphological changes in tree canopy. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, article 3829. DOI: 10.3390/rs12223829.

Sönmez T. Diameter at breast height – crown diameter prediction models for *Picea orientalis*. *African Journal of Agricultural Research*, 2009, vol. 4(3), pp. 215–219. URL: <http://www.academicjournals.org/AJAR>.

Štals T.A., Bardule A., Dumiš K., Makovskis K., Lazdina D. Remote-sensed tree crown diameter as a predictor of stem diameter and above-ground biomass in *Betula pendula* Roth and *Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L. plantations. *Land*, 2023, vol. 12, article 2006. DOI: 10.3390/land12112006.

Sun Z., Wang Y., Pan L., Sun Y. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius. *Ecological Indicators*, 2022, vol. 143, article 109322. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109322.

Umeki K., Kikuzawa K. Patterns in individual growth, branch population dynamics, and growth and mortality of first-order branches of *Betula platyphylla* in northern Japan. *Annals of Forest Science*, 2000, vol. 57, pp. 587–598. DOI: 10.1051/forest:2000144.

Usoltsev V.A. Interrelation of some taxation elements of the crown and stem of the *Betula pubescens* in Northern Kazakhstan. *Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan*, 1971, No. 2, pp. 80–84. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Phytomass of model trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatically determined geography, taxation standards. Yekaterinburg; Ural State Forest Engineering University, 2016. 336 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The third edition, enlarged. Yekaterinburg; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2023 (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. Allometric models of single-tree biomass for forest-forming species of the Urals. *Forests of Russia and economy in them*, 2022, № 1, pp. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. Comparative meta-analysis of allometric models of biomass of fast-growing hardwoods. *Biosphere*, 2023a, vol. 15(1), pp. 7–20. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Models for estimating biomass of forest-forming species by crown diameter as related to drone involving. *Conifers of the boreal area*, 2023b, vol. 41(4), pp. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking. *Conifers of the boreal area*, 2023c, vol. 41, no. 6. P. 504–514. (In Russ.)

Uzoh F.C.C., Oliver W.W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.09.012.

Wagner F.H., Ferreira M.P., Sanchez A., Hirye M.C.M., Zortea M., Gloor E., Phillips O.L., de Souza Filho C.R., Shimabukuro Y.E., Aragão L.E.O.C. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 145, pp. 362–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.013.

Wang C.-S., Zeng J., Hein S., Zhao Z., Guo J.-J., Zeng J. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32(8), pp. 679–687. DOI: 10.1080/02827581.2016.1261936.

Wang J., Jiang L., Yan Y. The impacts of climate, competition, and their interactions on crown width for three major species in Chinese boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 526(12), article 120597. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120597.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 1997, vol. 276, pp. 122–126. DOI: 10.1126/science.276.5309.122.

West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system. *Nature*, 1999, vol. 400, pp. 664–667. DOI: 10.1038/23251.

Westfall J.A., Nowak D.J., Henning J.G., Lister T.W., Edgar C.B., Majewsky M.A., Sonti N.F. Crown width models for woody plant species growing in urban areas of the U.S. *Urban Ecosystems*, 2020, vol. 23, pp. 905–917. DOI: 10.1007/s11252-020-00988-2.

Whitfield J. All creatures great and small. *Nature*, 2001, vol. 413, pp. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

Zagreev V.V. Generic yield tables of normal pine stands. *Modern forest management and forest taxation* : collection of scientific works. М.: VNIILM, 1974, iss. 4, pp. 61–107. (In Russ.)

Zarnoch S.J., Bechtold W.A., Stolte K.W. Using crown condition variables as indicators of forest health. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, pp. 1057–1070. DOI: 10.1139/x03-277.

Материал поступил в редакцию 22.11.2023

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Плюха Н.И. Взаимосвязи диаметров ствола и кроны лесообразующих видов Евразии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 176–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199

В связи с изменением климата и потенциальной возможностью его стабилизации с помощью управляемых лесов и оценки их углероддепонирующей способности, особую актуальность приобретает возможность оперативной оценки фитомассы и органического углерода лесного покрова. Технологии дистанционного зондирования лесов на основе беспилотных летательных аппаратов позволили получать значения параметров крон деревьев с максимально близкого расстояния, что обеспечивает высокую адекватность моделей для оценки фитомассы деревьев по диаметру кроны. Наряду с ними опубликованы тысячи аллометрических моделей для оценки фитомассы деревьев по диаметру ствола. Для их совмещения необходимо знание взаимосвязей диаметров ствола и кроны. По фактическим данным 3100 модельных деревьев для семи хвойных и 2470 деревьев для шестнадцати лиственных видов и родов (подродов) разработаны 23 аллометрические модели зависимости диаметра кроны от диаметра ствола и зависимости диаметра ствола от диаметра кроны, значимые на уровне t_{001} и выше. Первые предназначены для совмещения с опубликованными моделями фитомассы деревьев в связи с диаметром кроны, а вторые – для совмещения с опубликованными моделями фитомассы в связи с диаметром ствола. Выполнено ранжирование всех родов как по диаметру кроны, так и по диаметру ствола с последующим ранговым регрессионным анализом, включающим взаимозависимость двух ранговых распределений 23 родов. Установлена отрицательная связь ранговых распределений родов по диаметру кроны и по диаметру ствола, в то время как зависимость фактических данных диаметра ствола от диаметра кроны имеет прямо пропорциональный характер. Таким образом,

взаимосвязь диаметра кроны с диаметром ствола может быть как отрицательной, так и положительной, в зависимости от того или иного приложения и контекста.

Ключевые слова: фитомасса деревьев, дистанционное зондирование крон, аллометрические модели, рекурсивный принцип.

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Plyukha N.I. Interrelations of stem and crown diameters of forest-forming species of Eurasia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 176–199 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199

Due to climate change and the potential possibility of its stabilization with the help of managed forests and assessment of their carbon depositing capacity, the possibility of operational assessment of phytomass and organic carbon of forest cover is of particular relevance. Remote sensing of forests based on unmanned aerial vehicles made it possible to obtain the parameters of tree crowns from as close a distance as possible, which ensures high adequacy of models for assessing the phytomass of trees by crown diameter. Along with them, thousands of allometric models have been published to estimate the phytomass of trees by stem diameter. To combine them, it is necessary to know the interrelationships of the stem and crown diameters. When using the empirical data of 3,100 model trees for seven coniferous and 2,470 trees for sixteen deciduous species and genera (subgenera), 23 allometric models of crown diameter versus stem diameter and stem diameter versus crown diameter have been developed, significant at the level of t_{001} and higher. The first ones are designed to be combined with published models of phytomass of trees in connection with the crown diameter, and the second ones are designed to be combined with published models of phytomass in connection with the stem diameter. All genera were ranked both by crown diameter and stem diameter, followed by rank regression analysis, including the interdependence of two rank distributions of 23 genera. A negative relationship has been established between the rank distributions of genera by crown diameter and stem diameter, while the dependence of the empirical data of stem diameter on crown diameter is of positive relationship. Thus, the relationship of the crown diameter with the stem diameter can be either negative or positive, depending on a particular application and context.

Key words: phytomass of trees, remote sensing of crowns, allometric models, recursive principle.

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – заслуженный лесовод России, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства Института леса и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН; научный сотрудник Уральского государственного экономического университета, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3668-6843.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

USOLTSEV Vladimir A. – DSc (Agriculture), professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, scientist of the Ural State Economic University. SPIN-code: 3668-6843.

620100. Sibirskiy Trakt str. 37. Yekaterinburg, Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович – старший научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3853-7684.

620144, ул. 8 Марта, д. 202а. г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

TSEPORDEY Ivan S. – PhD (Agriculture), senior researcher at Botanical Garden of Ural Branch of RAS. SPIN-code: 3853-7684.

620144. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

ПЛЮХА Николай Иванович – аспирант кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного экономического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: nikcskript@mail.ru

PLYUKHA Nikolay I. – PhD student of the Department of Forest Taxation and Forest Management at the Ural State Economic University.

620100. Sibirskiy trakt str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: nikcskript@mail.ru