

# ОТНОШЕНИЕ ДИАМЕТРА КРОНЫ К ДИАМЕТРУ СТВОЛА: ВСЕОБЩИЕ МОДЕЛИ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ\*

В. А. Усольцев<sup>1,2</sup>, Н. И. Плюха<sup>1</sup>, И. С. Цепордей<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

<sup>2</sup>Ботанический сад Уральского отделения РАН  
620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а

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

<sup>1</sup>nikcskript@mail.ru

<sup>2</sup>ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

*Кроны деревьев подвергались гораздо меньшему количественному изучению, чем их стволы, в первую очередь из-за их более низкой потребительной стоимости. Однако размер кроны, тесно связанный с фотосинтетической способностью дерева, является важным параметром при изучении роста деревьев. В сомкнутых и загущенных древостоях измерение диаметра кроны менее точно и гораздо более трудозатратно по сравнению с другими показателями. Поэтому наличие аллометрических моделей для оценки диаметра крон снижает затраты при получении новых исходных данных. В литературных источниках отношение диаметра кроны к диаметру ствола на высоте груди (относительный диаметр кроны) использовалось для прогнозирования размера площади роста дерева и разработки режимов прореживания, для прогнозирования густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола и для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования. Цель нашего исследования – для основных лесобразующих видов и родов Евразии рассчитать всеобщие аллометрические зависимости относительного диаметра кроны от диаметра ствола дерева. По фактическим данным измерений 5497 модельных деревьев 23 лесобразующих видов и родов (подродов) Евразии впервые составлены всеобщие аллометрические модели связи относительного диаметра кроны с диаметром ствола на высоте груди. Согласно выполненному ранжированию, виды и роды по величине относительного диаметра кроны распределяются в следующей последовательности в порядке убывания: Juglans, Phellodendron, Maackia, Acer, Ulmus, Chosenia, Salix, Quercus, Carpinus, Tilia, Fraxinus, Robinia, Populus, Larix, Fagus, Betula, Haploxydon, Chamaecyparis, Abies, Picea, Alnus, Pinus, Cryptomeria. Модели на уровне родов могут быть применены для тех видов в пределах рода, данные по которым пока отсутствуют.*

**Ключевые слова:** относительный диаметр кроны, аллометрические модели, ранжирование видов и родов.

*Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 36–42*

## THE RATIO OF CROWN DIAMETER TO STEM DIAMETER: GENERIC MODELS OF FOREST-FORMING SPECIES OF EURASIA\*\*

V. A. Usoltsev<sup>1,2</sup>, N. I. Plyukha<sup>1</sup>, I. S. Tsepordey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural State Forest Engineering University,  
37, Sibirskiy Trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

<sup>2</sup>Botanical Garden, Ural Branch of RAS,  
202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

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

<sup>1</sup>nikcskript@mail.ru

<sup>2</sup>ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

*The crowns of trees were subjected to much less quantitative study than their stems, primarily because of their lower use value. However, the size of the crown, closely related to the photosynthetic ability of the tree, is an important parameter in the study of tree growth. In closed and thickened stands, measuring the diameter of the crown is less accurate and much more labor-consuming compared to other indicators. Therefore, the availability of allometric models for estimating the diameter of crowns reduces costs when obtaining new initial data. In literature, the ratio of crown diameter*

\* Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

\*\* The publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state task of the Botanical Garden, Ural Branch of RAS.

to stem diameter at breast height (relative crown diameter) was used to predict the size of the tree growth area and to develop thinning regimes, to predict the stand density at a given average stem diameter and to estimate the stem diameter by crown diameter measured using remote sensing methods. The purpose of our study is to calculate the generic allometric dependences of the relative diameter of the crown on the diameter of the tree stem for the main forest-forming species and genera of Eurasia. According to the actual measurement data of 5,497 model trees of 23 forest-forming species and genera (subgenera) of Eurasia, allometric models of the relationship between the relative diameter of the crown and the stem diameter at breast height were compiled for the first time. According to the ranking performed, species and genera are distributed according to the relative diameter of the crown in the following descending order: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*, *Fagus*, *Betula*, *Haploxydon*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*. Models at the level of genera can be applied to those species for which data are not yet available within the genus.

**Keywords:** relative crown diameter, allometric models, ranking of species and genera.

## ВВЕДЕНИЕ

Кроны деревьев подвергались гораздо меньшему количественному изучению, чем их стволы, в первую очередь из-за их более низкой потребительной стоимости. Однако размер кроны, тесно связанный с фотосинтетической способностью дерева, является важным параметром при изучении роста деревьев. Наличие взаимосвязи между размером кроны и диаметром ствола хорошо известно [15; 23; 26; 31; 35]. Изменчивость диаметра кроны в значительной степени является результатом изменчивости густоты деревьев и часто используется для оценки энергии роста, конкурентной способности деревьев [10; 34]. Оценка диаметра кроны является важным компонентом при моделировании роста и связывания ими атмосферного углерода [29; 30], при оценке степени затенения деревьев [21], пылеудерживающей способности и риска ветровала [20], при оценке площади листовой поверхности [5], при моделировании динамики сомкнутости полога [16] и заполнения просветов в пологе [8]. Размер кроны дерева является ключевой переменной, поскольку он коррелирует с пространством, занимаемым деревом, а также с его физиологическими функциями [22].

В сомкнутых и загущенных древостоях, особенно в смешанных, измерение диаметра кроны менее точно и гораздо более трудозатратно по сравнению с другими показателями [12]. Поэтому наличие аллометрических моделей для оценки диаметра крон снижает затраты при получении новых исходных данных [7; 15]. Кроме того, наличие подобных аллометрических уравнений позволяет лесным менеджерам управлять структурой и составом насаждений для достижения желаемых экономических, социальных и экологических выгод [18; 28].

В литературе получило распространение применение относительного диаметра кроны  $D_{cr}/D$  (или отношения диаметра кроны к диаметру ствола на высоте груди) в различных приложениях [26]. Этот показатель был предложен в XIX веке в качестве «индекса пространства роста» (*Wachstums Raum Index*) [25] при целевом выращивании крупномерных буковых древостоев. Позднее соотношение  $D_{cr}/D$  использовалось для оценки толерантности вида к изменению густоты древостоя [9], прогнозирования размера площади роста дерева и разработки режимов прореживания [19], прогнозирования густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола [14], расчета максимально возможных значений площади сечений стволов [6], прогнозирования предпочитаемых расстояний между

деревьями [27], оценки устойчивости дерева к ветровым нагрузкам и снеголому [24], а также для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования [11; 35].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель нашего исследования – для основных лесобразующих видов и родов Евразии рассчитать всеобщие аллометрические зависимости относительного диаметра кроны от диаметра ствола дерева и выполнить их ранжирование при данном диаметре ствола.

Для реализации поставленной цели исследования использована авторская база данных для лесов Евразии [1], из которой взяты данные 5497 модельных деревьев. Исходные данные обмеров модельных деревьев представлены на уровне видов на региональном уровне (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don., *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Scvorts., *Maackia amurensis* Rupr. и др.) и на уровне родов (подродов) как совокупностей викарирующих видов – на трансконтинентальном уровне. 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. Представленность родов (подродов) различными видами в наших исходных данных была показана ранее [2].

Результаты статистической обработки общего массива исходных данных приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
Результаты статистической обработки исходных данных

| 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                     | 5497     | 5497         |

*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. Аллометрические модели фитомассы деревьев локального уров-

ня обычно относятся к тому или иному виду того или иного региона, и такие модели исчисляются уже тысячами [17]. Всеобщие аллометрические модели могут быть представлены на уровне родов [3] или на уровне, обезличенном по видовому составу. Последние обычно имеют теоретическое обоснование [32]. Их базовый принцип: в основе кажущейся сложности растительных сообществ лежат простые правила [33].

В нашем исследовании принята следующая структура всеобщей аллометрической модели на уровне как видов, так и родов (подродов) [13]:

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

где  $D_{cr}/D$  – относительный диаметр кроны, приведенный к одной размерности с целью обеспечения сопоставимости с ранее опубликованными результатами исследований относительного диаметра кроны [14]. В данном случае в соотношении  $D_{cr}/D$  оба диаметра выражены в см.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета модели (1) сведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, для некоторых родов (*Abies*, *Betula*, *Tilia*) коэффициент детерминации находится на относительно низком уровне (0,20–0,22), что обусловлено влиянием неучтенных факторов, таких, как густота или добротность местопроизрастания. Тем не менее, все модели статистически значимы на уровне  $p < 0,001$ , за исключением модели для кленов, значимой на уровне  $p < 0,01$  (табл. 2). Необходимо отметить, что, имея в виду обычно менее значимые величины коэффициента детерминации при мо-

делировании относительных характеристик (индексов) кроны и ствола, некоторые исследователи коэффициент детерминации не показывают и ограничиваются расчетом стандартной ошибки,  $t$ -критерия регрессионного коэффициента и показателя уровня значимости  $p$  [13].

Ранжирование видов и родов по величине относительного диаметра кроны выполнено при среднем диаметре ствола 14,1 см (табл. 1). Согласно установленному ранжированию (рисунок), древесные виды и роды распределились в порядке уменьшения относительного диаметра кроны в последовательности: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*, *Fagus*, *Betula*, *Haploxyton*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*.

Выполненное ранжирование 11 европейских видов [14] показало, что при диаметре ствола 14 см относительный диаметр кроны варьирует в диапазоне от 40 у *Juglans regia* до 22 у *Betula* spp. Если не принимать во внимание 7 видов из правой части нашего распределения (*Haploxyton*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*), которые отсутствовали в анализе европейских видов [14], то наш ряд также начинается видом *Juglans* и заканчивается родом *Betula* при значениях относительного диаметра кроны соответственно 52 и 22. В целом, европейские виды распределились в порядке уменьшения относительного диаметра кроны в последовательности [14]: *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Prunus avium*, *Quercus robur*, *Fraxinus excelsior*, *Sorbus aucuparia*, *Populus* spp., *Tilia cordata*, *Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Betula* spp.

Таблица 2  
Результаты расчета модели (1)

| №  | Зависимая переменная                                                       | Регрессионные коэффициенты модели (1) |                       | <i>t</i> -критерий для <i>a</i> <sub>1</sub> | <i>SE</i> | <i>adjR</i> <sup>2</sup> | <i>n</i> |
|----|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|-----------|--------------------------|----------|
|    |                                                                            | <i>a</i> <sub>0</sub>                 | <i>a</i> <sub>1</sub> |                                              |           |                          |          |
| 1  | Подрод <i>Pinus</i> L. (двухвойные сосны)                                  |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,0052                                | −0,4260               | 43,3                                         | 0,34      | 0,472                    | 2093     |
| 2  | Род <i>Picea</i> Dietr. (ели)                                              |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,4408                                | −0,5472               | 48,7                                         | 0,25      | 0,792                    | 626      |
| 3  | Род <i>Abies</i> Mill. (пихты)                                             |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,1349                                | −0,4236               | 4,8                                          | 0,39      | 0,195                    | 93       |
| 4  | Подрод <i>Haploxyton</i> (Koehne) (пятихвойные сосны)                      |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,1121                                | −0,3807               | 11,4                                         | 0,24      | 0,590                    | 90       |
| 5  | Род <i>Larix</i> Mill. (лиственницы)                                       |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,2306                                | −0,4146               | 17,5                                         | 0,25      | 0,702                    | 131      |
| 6  | <i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don. (криптомерия японская) |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 3,8826                                | −0,4101               | 6,5                                          | 0,13      | 0,593                    | 29       |
| 7  | <i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endl. (кипарисовик)           |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 3,9310                                | −0,3181               | 5,0                                          | 0,16      | 0,487                    | 26       |
| 8  | Род <i>Betula</i> L. (березы)                                              |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 3,7988                                | −0,2575               | 13,8                                         | 0,33      | 0,212                    | 707      |
| 9  | Род <i>Populus</i> L. (осины и тополя)                                     |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,0337                                | −0,3337               | 18,3                                         | 0,24      | 0,539                    | 286      |
| 10 | Род <i>Alnus</i> Gaertn. (ольхи)                                           |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,0580                                | −0,4201               | 13,8                                         | 0,33      | 0,323                    | 399      |
| 11 | Род <i>Tilia</i> L. (липы)                                                 |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,6630                                | −0,5245               | 5,7                                          | 0,36      | 0,223                    | 112      |
| 12 | Род <i>Quercus</i> L. (дубы)                                               |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,8127                                | −0,5464               | 17,2                                         | 0,46      | 0,430                    | 390      |
| 13 | Род <i>Fagus</i> L. (буки)                                                 |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                    | 4,1402                                | −0,3855               | 13,2                                         | 0,27      | 0,448                    | 215      |

Окончание таблицы 2

| №  | Зависимая переменная                                                      | Регрессионные коэффициенты модели (1) |                       | <i>t</i> -критерий для <i>a</i> <sub>1</sub> | <i>SE</i> | <i>adjR</i> <sup>2</sup> | <i>n</i> |
|----|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|-----------|--------------------------|----------|
|    |                                                                           | <i>a</i> <sub>0</sub>                 | <i>a</i> <sub>1</sub> |                                              |           |                          |          |
| 14 | Род <i>Fraxinus</i> L. (ясени)                                            |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,3577                                | −0,4249               | 9,0                                          | 0,30      | 0,519                    | 76       |
| 15 | Род <i>Carpinus</i> L. (грабы)                                            |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,7182                                | −0,5379               | 10,2                                         | 0,30      | 0,527                    | 93       |
| 16 | Род <i>Salix</i> L. (ивы)                                                 |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,1029                                | −0,2539               | 7,3                                          | 0,08      | 0,854                    | 10       |
| 17 | <i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Scvorts. (чозения)                 |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,7989                                | −0,4952               | 5,5                                          | 0,42      | 0,647                    | 17       |
| 18 | Род <i>Acer</i> L. (клёны)                                                |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,7190                                | −0,3708               | 2,8                                          | 0,22      | 0,333                    | 15       |
| 19 | <i>Robinia pseudoacacia</i> L. (робиния ложноакациевая, или акация белая) |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 4,6103                                | −0,5476               | 7,3                                          | 0,39      | 0,469                    | 61       |
| 20 | <i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)                     |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 5,5433                                | −0,6242               | 8,0                                          | 0,12      | 0,913                    | 7        |
| 21 | <i>Maackia amurensis</i> Rupr. (маакия амурская)                          |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 5,2561                                | −0,5728               | 8,5                                          | 0,10      | 0,922                    | 7        |
| 22 | <i>Ulmus japonica</i> (Rehd.) Sarg. (вяз японский)                        |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 5,4512                                | −0,6641               | 4,6                                          | 0,17      | 0,769                    | 7        |
| 23 | <i>Juglans mandshurica</i> Maxim. (орех маньчжурский)                     |                                       |                       |                                              |           |                          |          |
|    | ln( <i>D</i> <sub>ср</sub> / <i>D</i> )                                   | 5,9507                                | −0,7583               | 10,1                                         | 0,10      | 0,944                    | 7        |

Примечание.  $adjR^2$  – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; *SE* – стандартная ошибка модели (1); *n* – количество наблюдений; *t*-критерий для  $a_1$  – уровень значимости регрессионного коэффициента модели (1) по Стьюденту. В свободный член введена поправка на логарифмирование [4].

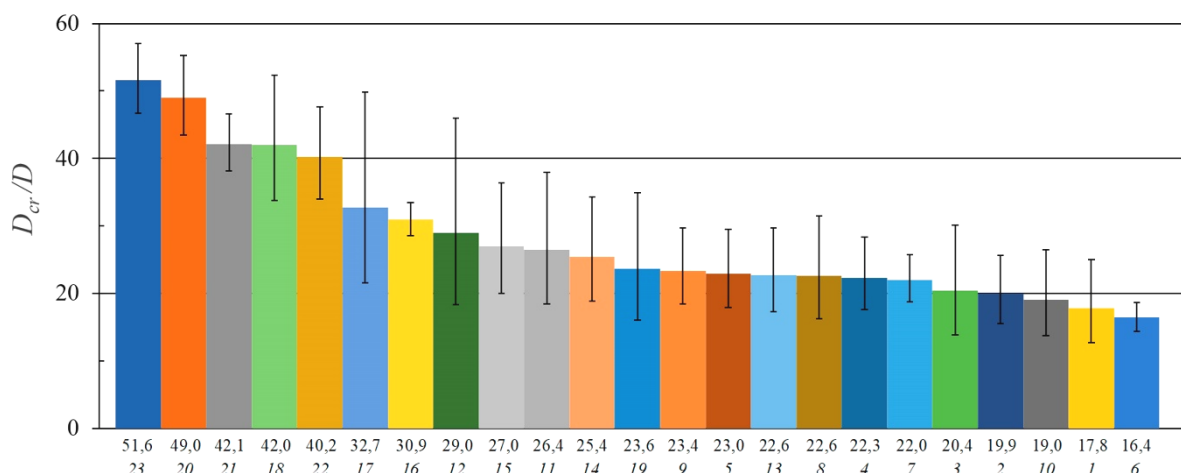


Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине относительного диаметра кроны при среднем значении диаметра ствола на высоте груди, равном 14,1 см (табл. 1).

Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения относительного диаметра кроны для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковые номера вида, рода или подрода, показанные в табл. 2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по фактическим данным измерений 5497 модельных деревьев 23 лесообразующих видов и родов (подродов) Евразии впервые составлены всеобщие аллометрические модели связи относительного диаметра кроны с диаметром ствола на высоте груди. Согласно выполненному ранжированию, виды и роды по величине относительного диаметра кроны распределяются в следующей последовательности в порядке убывания: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*,

*Fagus*, *Betula*, *Haploxylon*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*.

Предложенные модели могут быть использованы при прогнозировании размера площади роста дерева и разработке режимов прореживания, прогнозировании густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола, при расчете максимально возможных значений площади сечений стволов и для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования. Модели на уровне родов могут быть применены для тех видов в пределах рода, данные по которым пока отсутствуют.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е дополненное издание. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
2. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41(6). С. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.
3. 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 бореальной зоны. 2023. Т. 41(4). С. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.
4. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.
5. Binkley D., Campoe O. C., Gspaltl M. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 288. P. 5–13.
6. Briegleb P. A. An approach to density measurement in Douglas fir // Journal of Forestry. 1952. Vol. 50. P. 529–536.
7. Buchacher R., Ledermann T. Interregional crown width models for individual trees growing in pure and mixed stands in Austria // Forests. 2020. Vol. 11. Article 114. DOI: 10.3390/f11010114.
8. Choi J., Lorimer C. G., Vanderwerker J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 152 (1). P. 235–258.
9. Dawkins H. C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees // Commonwealth Forestry Review. 1963. Vol. 42. P. 318–333.
10. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width model for Prince Rupprecht larch in northern China // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 389. P. 364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034.
11. 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.
12. Gominiski D., Kariryaa A., Brandt M. et al. Benchmarking individual tree mapping with sub-meter imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023 (in press). DOI: 10.48550/arXiv.2311.07981.
13. Hein S., Spiecker H. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) // Agroforestry Systems. 2008. Vol. 73. P. 205–218.
14. 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.
15. Hou R., Chai Z. Predicting crown width using nonlinear mixed-effects models accounting for competition in multi-species secondary forests // Peer Journal. 2022. Vol. 10. Article e13105. <http://doi.org/10.7717/peerj.13105>.
16. Ishii H. T., Tanabe S. I., Hiura T. Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems // Forest Science. 2004. Vol. 50 (3). P. 342–355.
17. Luo Y., Wang X., Ouyang Z. et al. 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.
18. Nowak D. J., Dwyer J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems // Urban and community forestry in the Northeast, 2nd ed. J. E. Kuser (ed.). Springer, 2007. P. 25–46.
19. Philip M. S. Measuring trees and forests, 2nd ed. CAB International: Wallingford, 1994. 310 p.
20. Pretzsch H., Biber P., Uhl E. et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. Vol. 14 (3). P. 466–479. [dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006).
21. Putz F. E., Parker G. G., Archibald R. M. Mechanical abrasion and inter crown spacing // The American Midland Naturalist. 1984. Vol. 112 (1). P. 24–28.
22. Qiu S., Gao P., Pan L. et al. Developing nonlinear additive tree crown width models based on decomposed competition index and tree variables // Journal of Forestry Research. 2023. Vol. 34. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s11676-022-01576-0
23. Raptis D., Kazana V., Kazaklis A. et al. A crown width-diameter model for natural even-aged black pine forest management // Forests. 2018. Vol. 9(10). Article 610. <https://doi.org/10.3390/f9100610>.
24. Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., et al. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – an experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany // Canadian Journal of Forest Research. 2010. Vol. 40(8). P. 1636–1652.
25. Seebach Ch. Der modifizierte Buchen-Hochwald-Betrieb // Kritische Blätter für Forst- und Jagdwissenschaft. 1845. Vol. 21. P. 147–185.
26. Sharma R. P., Bilek L., Vacek Z. et al. Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe // Trees-Structure and Function. 2017. Vol. 31. P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.
27. Thill A. Qualites des grumes de quelques essences feuillues, et de l'épicea commun // Bulletin de la Société royale forestière de Belgique. 1980. Vol. 87. P. 1–7.
28. Troxel B., Piana M., Ashton M. S. et al. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA // Urban Forestry & Urban Greening. 2013. Vol. 12 (2). P. 144–153. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.02.006.
29. Wang B., Bu Y., Tao G. et al. Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in

sustainable forest management // Sustainability. 2020. Vol. 12. Article 7498. DOI: 10.3390/su12187498.

30. Wang H., Wan P., Wang Q. et al. Prevalence of inter-tree competition and its role in shaping the community structure of a natural Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forest // Forests. 2017. Vol. 8. Article 84. DOI: 10.3390/f8030084.

31. Wang J., Jiang L., Xin S. et al. Two new methods applied to crown width additive models: a case study for three tree species in Northeastern China // Annals of Forest Science. 2023. Vol. 80. Article 11. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01165-5>.

32. 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.

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

34. Yang Y., Huang S. Allometric modelling of crown width for white spruce by fixed-and mixed-effects models // Forestry Chronicle. 2017. Vol. 93. P. 138–147. DOI: 10.5558/tfc2017-020.

35. Zasada M., Stereńczak K., Brach M. Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner // Sylwan. 2011. Vol. 155 (11). P. 725–735.

## REFERENCES

1. 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. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.

2. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking // Conifers of the Boreal Area. 2023. Vol. XLI. No. 6. P. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.

3. 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. 2023. Vol. 41(4). P. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.

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

5. Binkley D., Campoe O. C., Gspaltl M. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 288. P. 5–13.

6. Briegleb P. A. An approach to density measurement in Douglas fir // Journal of Forestry. 1952. Vol. 50. P. 529–536.

7. Buchacher R., Ledermann T. Interregional crown width models for individual trees growing in pure and mixed stands in Austria // Forests. 2020. Vol. 11. Article 114. DOI: 10.3390/f11010114.

8. Choi J., Lorimer C. G., Vanderwerker J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 152 (1). P. 235–258.

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

10. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width model for Prince Rupprecht larch in northern China // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 389. P. 364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034.

11. 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.

12. Gominski D., Kariryaa A., Brandt M. et al. Benchmarking individual tree mapping with sub-meter imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023 (in press). DOI: 10.48550/arXiv.2311.07981.

13. Hein S., Spiecker H. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) // Agroforestry Systems. 2008. Vol. 73. P. 205–218.

14. 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.

15. Hou R., Chai Z. Predicting crown width using nonlinear mixed-effects models accounting for competition in multi-species secondary forests // Peer Journal. 2022. Vol. 10. Article e13105. <http://doi.org/10.7717/peerj.13105>.

16. Ishii H. T., Tanabe S. I., Hiura T. Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems // Forest Science. 2004. Vol. 50(3). P. 342–355.

17. Luo Y., Wang X., Ouyang Z. et al. 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.

18. Nowak D. J., Dwyer J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems // Urban and community forestry in the Northeast, 2nd ed. J. E. Kuser (ed.). Springer, 2007. P. 25–46.

19. Philip M. S. Measuring trees and forests, 2nd ed. CAB International: Wallingford, 1994. 310 p.

20. Pretzsch H., Biber P., Uhl E. et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. Vol. 14(3). P. 466–479. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.04.006.

21. Putz F. E., Parker G. G., Archibald R. M. Mechanical abrasion and inter crown spacing // The American Midland Naturalist. 1984. Vol. 112(1). P. 24–28.

22. Qiu S., Gao P., Pan L. et al. Developing nonlinear additive tree crown width models based on decomposed competition index and tree variables // Journal of Forestry Research. 2023. Vol. 34. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s11676-022-01576-0.

23. Raptis D., Kazana V., Kazaklis A. et al. A crown width-diameter model for natural even-aged black pine forest management // Forests. 2018. Vol. 9(10). Article 610. <https://doi.org/10.3390/f9100610>.

24. Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., et al. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – an experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany // *Canadian Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 40(8). P. 1636–1652.

25. Seebach Ch. Der modifizierte Buchen-Hochwald-Betrieb // *Kritische Blätter für Forst- und Jagdwissenschaft*. 1845. Vol. 21. P. 147–185.

26. Sharma R. P., Bilek L., Vacek Z. et al. Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe // *Trees-Structure and Function*. 2017. Vol. 31. P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

27. Thill A. Qualites des grumes de quelques essences feuillues, et de l'epicea commun // *Bulletin de la Société royale forestière de Belgique*. 1980. Vol. 87. P. 1–7.

28. Troxel B., Piana M., Ashton M. S. et al. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2013. Vol. 12(2). P. 144–153. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.02.006.

29. Wang B., Bu Y., Tao G. et al. Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in sustainable forest management // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Article 7498. DOI: 10.3390/su12187498.

30. Wang H., Wan P., Wang Q. et al. Prevalence of inter-tree competition and its role in shaping the

community structure of a natural Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forest // *Forests*. 2017. Vol. 8. Article 84. DOI 10.3390/f8030084.

31. Wang J., Jiang L., Xin S. et al. Two new methods applied to crown width additive models: a case study for three tree species in Northeastern China // *Annals of Forest Science*. 2023. Vol. 80. Article 11. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01165-5>.

32. 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.

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

34. Yang Y., Huang S. Allometric modelling of crown width for white spruce by fixed-and mixed-effects models // *Forestry Chronicle*. 2017. Vol. 93. P. 138–147. DOI: 10.5558/tfc2017-020.

35. Zasada M., Stereńczak K., Brach M. Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner // *Sylwan*. 2011. Vol. 155(11). P. 725–735.

© Усольцев В. А., Плюха Н. И.,  
Цепордей И. С., 2024

---

Поступила в редакцию 05.12.2023  
Принята к печати 22.01.2024