

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 630*52

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ *Picea* L. и *Abies* Mill. НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ АДДИТИВНЫМ И ТРАДИЦИОННЫМ МЕТОДАМИ

В. А. Усольцев^{1,2}, К. В. Колчин², И. С. Цепордей¹, В. П. Часовских²

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, kirill_-92@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru, u2007u@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.08.2018 г.

Биомасса лесов является ключевой экосистемной составляющей и важнейшим компонентом глобального углеродного цикла. Разработка регрессионных моделей биомассы ведется сегодня, во-первых, в ограниченных экорегионах и, во-вторых, без согласования по фракционному составу. Согласованные по фракциям биомассы модели называются аддитивными. Среди них выделяются две группы: одна ориентирована на расчет уравнений отдельно для каждой фракции с последующей их модификацией по специальным алгоритмам таким образом, что суммарный результат исходных уравнений равняется результату обобщенного уравнения. Вторая процедура согласования уравнений имеет прямо противоположный алгоритм, согласно которому рассчитывается обобщенное уравнение, которое по специальной схеме расчленяется на исходные, и их суммарный итог равен итоговому значению обобщенного уравнения. Сформированная авторами база данных о биомассе 1035 деревьев елей и пихт в их евразийских ареалах использована в качестве основы для выявления различий равновеликих деревьев двух древесных родов по структуре биомассы в пределах их ареалов при обеспечении принципа согласованности по второму из названных вариантов. Гармонизированная модель, позволяющая сравнивать структуру биомассы деревьев двух родов на континентальном уровне, предложена впервые. Установлено, что пихта при равных с елью высоте и диаметре ствола превышает ель по общей, над- и подземной биомассе деревьев соответственно на 13, 11 и 20 %. Но по соотношению над- и подземной биомассы в общей и по соотношению массы кроны и ствола в надземной биомассе различий между елями и пихтами не наблюдается, тогда как по соотношению масс хвои и ветвей в массе кроны и по соотношению древесины и коры различия существуют. Разработанная модель аддитивной структуры биомассы деревьев елей и пихт дает возможность определять согласованную по фракционному составу биомассу соответствующих древостоев на основе данных наземной таксации.

Ключевые слова: ель и пихта в ареале, гармонизированная по биомассе модель, регрессионные уравнения, согласованность фракционного состава, трансевразийская закономерность.

DOI: 10.15372/SJFS20180611

ВВЕДЕНИЕ

Биомасса лесов – ключевая экосистемная составляющая и важный компонент глобального углеродного цикла. Разработка регрессионных моделей биомассы ведется сегодня на уровне как древостоев, так и модельных деревьев, но, во-первых, в пределах ограниченного экоре-

гиона и, во-вторых, без согласования по фракционному составу. Согласованные по фракциям биомассы модели, как внутренне непротиворечивые, получили название аддитивных (Kozak, 1970). Среди них выделяются две группы: одна ориентирована на расчет уравнений отдельно для каждой фракции с последующей их модификацией по специальным алгоритмам таким

образом, что суммарный результат исходных уравнений равняется результату обобщенного уравнения (Kozak, 1970; Parresol, 2001). Исследователи стремились обеспечить максимальную корректность алгоритма, при этом его сложность последовательно возрастала и потребовался инструментальный современный программного обеспечения: SAS/ETS 9.3 (2018); The R Project for Statistical Computing (2018). Объединяет все варианты подобных алгоритмов разной сложности то, что реализованы они по принципу «от частного (от «фракционных» уравнений) – к общему».

Вторая процедура согласования уравнений имеет прямо противоположный алгоритм, согласно которому рассчитывается обобщенное уравнение, которое по специальной схеме расчленяется на исходные, и их суммарный итог равен итоговому значению обобщенного уравнения. Этот метод является альтернативой упомянутому и известен как трехшаговый метод пропорционального взвешивания по принципу «от общего – к частному» (Dong et al., 2015). При этом общая биомасса дерева делится на над- и подземную части в соответствии с их долями в общей, представленными соответствующими «фракционными» зависимостями (шаг 1), затем полученная надземная биомасса разделяется аналогичным образом на ствол в коре и крону дерева (шаг 2), крона расчленяется на хвою и ветви (шаг 3а), а ствол – на древесину и кору (шаг 3б). Российские ученые этой проблеме до последнего времени не уделяли внимания, хотя в зарубежной литературе она обсуждается с 1970-х гг.

В данной статье предпринята попытка устранения неопределенности, связанной с внутренней противоречивостью частного и общего аллометрических уравнений биомассы, на примере сравнительного анализа ее структуры для двух древесных родов – елей и пихт в их евразийских ареалах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная основа исследования представлена базой данных (более 7 тыс. определений) о биомассе древесных и кустарниковых видов Евразии (Usoltsev, 2016), из которой взяты 1035 определений биомассы модельных деревьев – 926 елей и 109 пихт. Представлены две совокупности деревьев родов *Picea* L. и *Abies* Mill. (в каждой по 6 видов).

В качестве методического подхода выбран принцип дисагрегирования, реализованный по трехшаговой схеме пропорционального взвешивания,

поскольку он позволяет пошагово (последовательно) расчленить оценки общей биомассы на промежуточные фракции в соответствии с их долями в общей биомассе, а полученные оценки – на исходные фракции в соответствии с их долями в промежуточных фракциях, обеспечивает совместимость значений всех фракций, не требует единого для всех фракций массива исходных данных и позволяет использовать общедоступные пакеты программ Statgraphics и Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен последовательный расчет уравнений согласно упомянутому пошаговому принципу пропорционального взвешивания. Вначале рассчитывали общее уравнение для всей биомассы, затем – для над- и подземной, далее – для ствола в коре и кроны, и завершалась процедура расчетом уравнений для исходных фракций, т. е. ветвей и хвои (шаг 3а), а также древесины и коры ствола (шаг 3б). Структура уравнений принятой модели имеет общий вид

$$\ln p_i = a_i + b_i (\ln d) + c_i (\ln h) + d_i (\ln d)(\ln h) + e_i Y,$$

где p_i – биомасса i -й фракции, кг (далее – биомасса); i – индекс фракций биомассы: всего древостоя (t), надземной древостоя (a), корней древостоя (r), кроны (c), ствола в коре (s), хвои (f), ветвей (b), древесины ствола (w) и коры ствола (bk); d – таксационный диаметр ствола на высоте 1.3 м от его основания, см; h – высота ствола, м; a_i, b_i, c_i, d_i, e_i – параметры исходных уравнений модели для i -й фракции биомассы; Y – фиктивная переменная, кодирующая принадлежность значений биомассы к елям ($X = 1$) и пихтам ($X = 0$). Характеристика рассчитанных уравнений после потенцирования приведена в табл. 1.

Высокие значения коэффициентов детерминации (R^2) позволяют судить о воспроизводимости полученных закономерностей.

Исходные уравнения модели, числовые параметры которой показаны в табл. 1, путем процедуры пропорционального взвешивания (Dong et al., 2015) приведены к виду искомой модели (табл. 2).

Пределы применимости полученной модели, представленной в табл. 2, определяются диапазонами варьирования фактических значений высоты и диаметра деревьев в базе данных. Путем табулирования модели по значениям высоты и диаметра стволов составлены таблицы биомассы деревьев, которые из-за большого объема в данном сообщении не приводятся.

Таблица 1. Результаты расчета исходных уравнений модели

Фракция биомассы	Числовые параметры уравнений					R ²
p_t	0.8724	$d^{1.2217}$	$h^{-0.3875}$	$d^{0.3330(\ln h)}$	$e^{-0.1191 \cdot Y}$	0.986
<i>Шаг 1</i>						
p_r	0.2156	$d^{1.4921}$	$h^{-1.0455}$	$d^{0.4172(\ln h)}$	$e^{-0.0973 \cdot Y}$	0.965
p_a	0.7003	$d^{1.0429}$	$h^{-0.3931}$	$d^{0.3632(\ln h)}$	$e^{-0.0201 \cdot Y}$	0.983
<i>Шаг 2</i>						
p_c	0.6843	$d^{1.6919}$	$h^{-1.3780}$	$d^{0.3044(\ln h)}$	$e^{-0.0270 \cdot Y}$	0.924
p_s	0.1963	$d^{0.7475}$	$h^{0.3887}$	$d^{0.3414(\ln h)}$	$e^{-0.0601 \cdot Y}$	0.990
<i>Шаг 3а</i>						
p_f	0.3725	$d^{1.6069}$	$h^{-1.4773}$	$d^{0.3333(\ln h)}$	$e^{0.0895 \cdot Y}$	0.908
p_b	0.3600	$d^{1.7566}$	$h^{-1.4891}$	$d^{0.3301(\ln h)}$	$e^{-0.1376 \cdot Y}$	0.884
<i>Шаг 3б</i>						
p_w	0.1646	$d^{0.8502}$	$h^{0.1940}$	$d^{0.3692(\ln h)}$	$e^{-0.00537 \cdot Y}$	0.988
p_{bk}	0.0629	$d^{0.8077}$	$h^{0.0245}$	$d^{0.3278(\ln h)}$	$e^{-0.3784 \cdot Y}$	0.977

Таблица 2. Искомая аддитивная модель биомассы елей и пихт, реализованная по принципу согласования фракционного состава

$$p_t = 0.8724 D^{1.2217} H^{-0.3875} D^{0.3330(\ln H)} e^{-0.1191 \cdot X}; R^2 = 0.986$$

Шаг 1	$p_r = \frac{1}{1 + 3.2477 d^{-0.3979} h^{0.6523} d^{-0.0540(\ln h)} e^{0.0772 Y}} \times p_t$ $p_a = \frac{1}{1 + 0.3079 d^{0.3979} h^{-0.6523} d^{0.0540(\ln h)} e^{-0.0772 Y}} \times p_t$
Шаг 2	$p_c = \frac{1}{1 + 0.2869 d^{-0.9444} h^{1.7667} d^{0.0370(\ln h)} e^{-0.0332 Y}} \times p_a$ $p_s = \frac{1}{1 + 3.4860 d^{0.9444} h^{-1.7667} d^{-0.0370(\ln h)} e^{0.0332 Y}} \times p_a$
Шаг 3а	$p_f = \frac{1}{1 + 0.9664 d^{0.1497} h^{-0.0118} d^{-0.0032(\ln h)} e^{-0.2271 Y}} \times p_c$ $p_b = \frac{1}{1 + 1.0347 d^{-0.1497} h^{0.0118} d^{0.0032(\ln h)} e^{0.2271 Y}} \times p_c$
Шаг 3б	$p_w = \frac{1}{1 + 0.3821 d^{-0.0425} h^{-0.1695} d^{-0.0414(\ln h)} e^{-0.3838 Y}} \times p_s$ $p_{bk} = \frac{1}{1 + 2.6168 d^{0.0425} h^{0.1695} d^{0.0414(\ln h)} e^{0.3838 Y}} \times p_s$

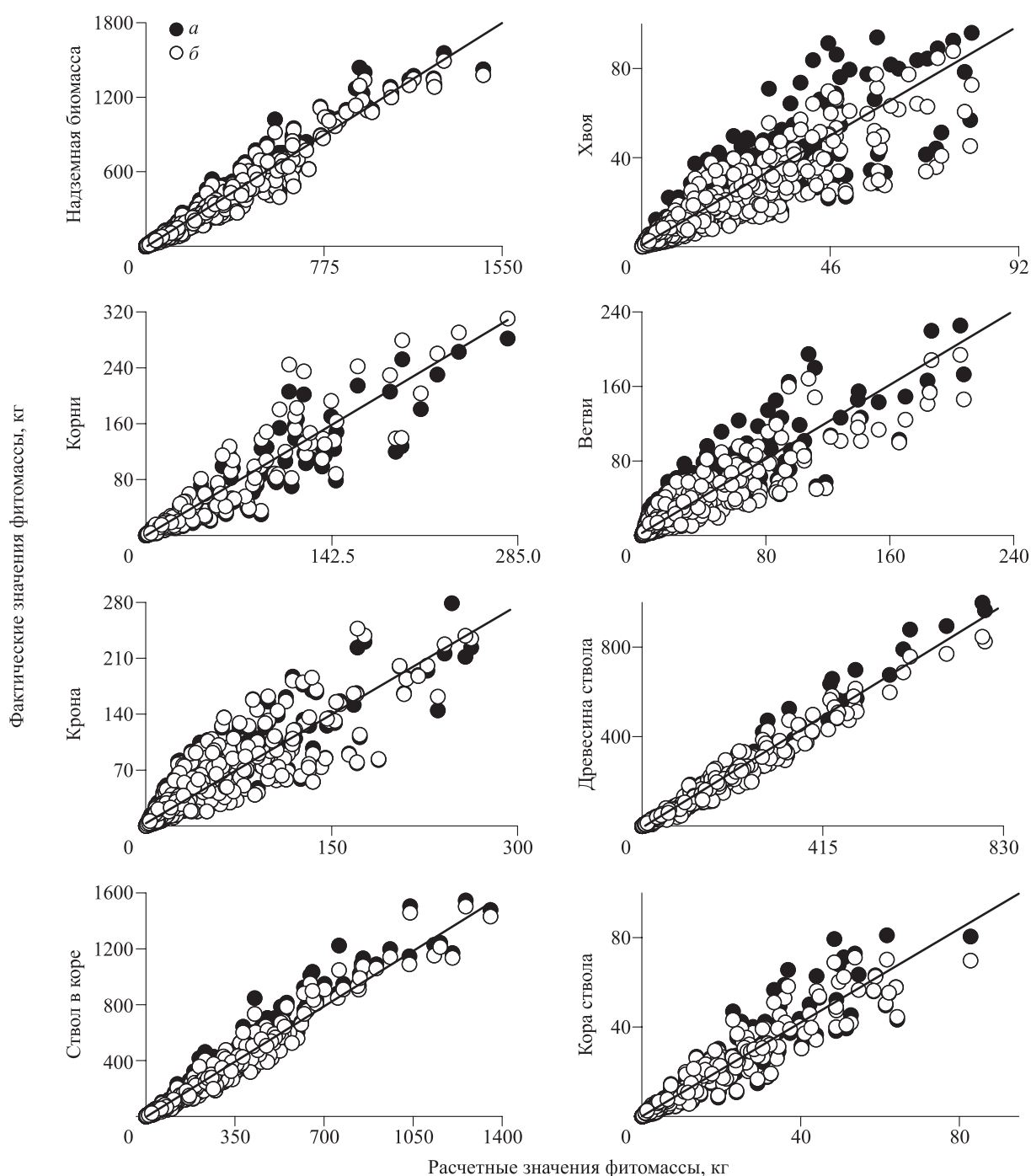
Данные построенных таблиц свидетельствуют о том, что существует положительная связь всех фракций биомассы с диаметром D , а с высотой дерева она установлена только для фракций общей, надземной и биомассы ствола. Биомасса хвои и ветвей при одном и том же диаметре ствола с увеличением высоты дерева снижается, а масса корней остается постоянной.

Выявлено, что в полученной модели кодирование двух древесных родов фиктивной переменной учитывает различие их как по абсолютной величине массы фракций, так и по их соотношениям, т. е. по структуре биомассы. В частности, показатели елей по биомассе общей, надземной и корней ниже соответствующих показателей равновеликих пихт на 13, 11 и 20 % соответственно. Доли корней и надземной биомассы в общей составляют у ели 16 : 84 и у пихты 17 : 83 % (согласно шагу 1 алгоритма); соотношение кроны и ствола в надземной равно 14 : 86 и 14 : 86 % соответственно (согласно шагу 2); соотношение ветвей и хвои в массе кроны – 53 : 47 и 58 : 42 % (согласно шагу 3а) и доли коры и древесины в биомассе ствола – 9 : 91 и 12 : 88 % (согласно шагу 3б).

С целью сопоставления адекватности традиционных (исходных) (см. табл. 1) и вновь полученных гармонизированных уравнений биомассы (см. табл. 2) те и другие протабулировали по эмпирическим значениям высоты и диаметра ствола, а результаты сопоставили с фактическими показателями биомассы в исходной базе данных (Usoltsev, 2016) путем расчета коэффициента R^2 . Оказалось, что различия двух моделей по степени адекватности отсутствуют, что подтверждается наглядно (см. рисунок).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые предпринятая попытка сопоставить структуру биомассы деревьев елей и пихт в пределах их евразийских ареалов на основе внутренне непротиворечивых (аддитивных) регрессионных моделей показала, что пихта при



Фактические значения биомассы, соотнесенные с расчетными, полученными путем табулирования традиционной (а) и аддитивной (б) моделей.

равных с елью высоте и диаметре ствола превышает ель по общей, над- и подземной биомассе деревьев на 13, 11 и 20 % соответственно. По соотношению над- и подземной биомассы в общей и по соотношению массы кроны и ствола в наземной биомассе различий между елями и пихтами не выявлено, тогда как по соотношению масс хвои и ветвей в массе кроны и по соотношению древесины и коры различия определены. Разработанная модель аддитивной структуры

биомассы деревьев елей и пихт дает возможность определять согласованную по фракционному составу биомассу соответствующих древостоев на основе наземной таксации.

Авторы выражают признательность канд. физ.-мат. наук, старшему научному сотруднику Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН Г. Б. Кофману за критические замечания и обсуждение в ходе подготовки статьи к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations // For. Sci. 2015. V. 61. Iss. 1. P. 35–45.
- Kozak A. Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis // The For. Chron. 1970. V. 46. N. 5. P. 402–405.
- Parresol B. R. Additivity of nonlinear biomass equations // Can. J. For. Res. 2001. V. 31. N. 5. P. 865–878.
- SAS/ETS 9.3 User's Guide, 2018. <http://support.sas.com/documentation/cdl/en/etsug/63939/HTML/default/viewer.htm#titlepage.htm>
- The R Project for Statistical Computing, 2018. <https://www.r-project.org/>
- Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2016. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>

THE STUDY OF COMPARATIVE STRUCTURE OF *Picea* spp. and *Abies* spp. TREE BIOMASS ON THE TERRITORY OF EURASIA BY ADDITIVE AND CONVENTIONAL METHODS

V. A. Usoltsev^{1,2}, K. V. Kolchin², I. S. Tsepordey¹, V. P. Chasovskikh²

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, kirill_-92@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru, u2007u@yandex.ru

Forest biomass is a key ecosystem trait and an important component of the global carbon cycle. Biomass modelling is performed in terms of forest stands and sample trees. However, all current studies of this subject are carried out, firstly, within limited ecoregions and secondly, without harmonizing in relation to fractional composition of the biomass. Models harmonized in accordance with fraction composition of biomass are widespread and are referred to as additive ones. Among them, two groups of models are distinguished: one is focused on the calculation of equations separately for each fraction, followed by their modification in accord with a special algorithm so that the total result of these equations is equal to the result of the common equation. The second procedure of equation harmonizing applies the opposite algorithm, according to which the common equation is calculated, which is divided into partial ones according to a special scheme, and their total is equal to the final result of the common equation. The database on biomass of 1035 spruce and fir trees growing in their Eurasian habitats developed by the author, is used as a basis for revealing differences between equal-sized trees of two genera in the structure of biomass, while ensuring the principle of consistency in the second of these options. A harmonized model allowing to compare the biomass structure of trees of two genera in terms of a continental approach is proposed for the first time. It has been revealed that total, aboveground and underground biomass of fir trees exceeds that of spruce by 13, 11 and 20 % respectively. However, there are some differences between *Abies* and *Picea* genera in the ratio of aboveground and underground biomass in the total biomass and in the ratio of the crown and stem biomass in the aboveground biomass, while any differences between two genera are not in the ratio of needles and branches in the crown biomass and in the ratio of wood and bark in the total stem biomass. The proposed model of additive biomass structure makes it possible to calculate spruce and fir stand biomass in Eurasian forests when using ground forest survey data.

Keywords: spruce and fir in their natural habitat, the harmonized biomass model, regression equations, consistency of component composition, the trans-Eurasian pattern.

How to cite: Usoltsev V. A., Kolchin K. V., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. The study of comparative structure of *Picea* spp. and *Abies* spp. tree biomass on the territory of Eurasia by additive and conventional methods // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 6: 121–125 (in Russian with English abstract). DOI: 10.15372/SJFS20180611