

ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ АДДИТИВНЫЕ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН В ЕСТЕСТВЕННЫХ ДРЕВОСТОЯХ И КУЛЬТУРАХ

В. А. УСОЛЬЦЕВ, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
В. П. ЧАСОВСКИХ, доктор технических наук, профессор,
М. В. АЗАРЕНОК, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
Е. В. КОХ, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
Уральский государственный лесотехнический университет
(620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37)

Ключевые слова: *подрод Pinus L., естественные древостои и культуры, аллометрические модели, аддитивность уравнений, биосферная роль лесов, фитомасса деревьев, трансконтинентальные модели фитомассы деревьев.*

Впервые в русскоязычной литературе на уникальной по объему базе фактических данных о фитомассе двухвойных сосен (подрод *Pinus L.*) в количестве 2080 модельных деревьев, взятых в пределах их ареала на территории Евразии, решена проблема гармонизации моделей фитомассы деревьев путем соблюдения принципа аддитивности, предполагающего, что суммарная фитомасса фракций (ствол, ветви, хвоя, корни), полученная по «фракционным» уравнениям, должна быть равна значению фитомассы, полученному по общему уравнению. Разработана система аддитивных соотношений фракционного состава фитомассы, представляющая собой трансконтинентальную трехшаговую модель пропорционального взвешивания, на основе которой составлена соответствующая таблица фитомассы деревьев двухвойных сосен как для естественных древостоев, так и для культур, по двум входам – диаметру ствола и высоте дерева. Предложенная модель и соответствующая таблица для оценки подеревной фитомассы дает возможность определения в первом приближении фитомассы сосняков естественного и искусственного происхождения (т/га) по данным измерительной таксации на территории Евразии. Поскольку подобные всеобщие модели и таблицы могут иметь смещения в локальных условиях их применения, на следующем этапе исследований предстоит разработать более детальные, региональные модели и таблицы фитомассы путем разбиения предложенных здесь всеобщих моделей на региональные с помощью фиктивных переменных.

TRANSCONTINENTAL ADDITIVE ALLOMETRIC MODELS AND WEIGHT TABLES FOR ESTIMATING BIOMASS OF TWO-NEEDED PINE TREES IN NATURAL FORESTS AND PLANTATIONS

V. A. USOLTSEV, doctor of agricultural sciences, professor,
V. P. CHASOVSKIKH, doctor of technical sciences, professor,
M. V. AZARENOK, candidate of agricultural sciences, associate professor,
E. V. KOKH, candidate of agricultural sciences, associate professor,
Ural State Forest Engineering University
(37 Sibirskiy tract Str., 620100, Ekaterinburg)

Keywords: *subgenus Pinus L., natural forests, plantations, biosphere role of forests, biomass of trees, allometric models, equations additivity, transcontinental table of tree biomass.*

For the first time in Russian literature the problem of harmonizing allometric models of pine tree biomass components (stem, branches, foliage, roots) by means of ensuring the principle of their additivity has been solved. It is implying that the sum of biomass values obtained by component equations should be equal to the value of total biomass received with the general equation. For this purpose the unique tree biomass database in a number of 2080 two-needed pine trees (subgenus *Pinus L.*) of natural and artificial origins growing on the territory of Eurasia is compiled. Additive systems of biomass component relations, as two transcontinental three-step models of proportional weighting are designed. On their basis the corresponding taxation tables of the biomass component composition involving two inputs - the stem diameter at breast height and the tree height – are suggested for natural pine forests and plantations separately. The proposed models and corresponding tables for estimating tree biomass make their possible to calculate two-needed pine biomass per ha (t/ha) on Eurasian forests as the first approximation when using measuring taxation. Because such transcontinental models and tables may have biases in local conditions for their application, in the next stage of this research more detailed, regional tree biomass models and tables through disaggregating proposed here common models for regional ones using dummy variables will be developed.

Положительная рецензия представлена С. В. Залесовым, заслуженным лесоводом России, доктором сельскохозяйственных наук, профессором, проректором по научной работе Уральского государственного лесотехнического университета.

В условиях все возрастающей биосферной роли лесов снятие неопределенностей, связанных с оценкой биопродукции и биоразнообразия лесного покрова, имеет непреходящее значение. Одна из таких неопределенностей связана с проблемой гармонизации аллометрических моделей фитомассы деревьев. Названная гармонизация, как было изложено ранее [1], предполагает соблюдение принципа аддитивности, согласно которому суммарная фитомасса фракций (ствол, ветви, хвоя, корни), полученная по «фракционным» уравнениям, должна равняться значению фитомассы, полученному по общему уравнению. Впервые в РФ на примере ели (род *Picea* sp.) эта проблема была решена в нашей предыдущей публикации [2].

Цель и методика исследований. Целью настоящего исследования является, во-первых, разработка трансконтинентальной таблицы фитомассы деревьев двухвойных сосен (подрод *Pinus* L.), аддитивной по фракционному составу, составленной на основе соответствующей системы аддитивных уравнений по методике, изложенной ранее [2, 3], и, во-вторых, сравнение полученных аддитивных моделей с традиционными (независимыми) по критериям их адекватности. Расчет сравниваемых аллометрических моделей фитомассы выполнен методом наименьших квадратов с линеаризацией зависимостей путем логарифмирования и с введением поправки на логарифмирование по Г. Л. Баскервиллю [4].

Это первая в России попытка разработки аддитивной системы аллометрических уравнений и со-

ответствующих таксационных таблиц для оценки фитомассы деревьев двухвойных сосен на основе сформированной авторами уникальной по объему евразийской базы данных для подрода *Pinus* L. в количестве 2 080 модельных деревьев, в том числе 1 520 и 560 соответственно для естественных древостоев и культур [5]. Подрод *Pinus* L. представлен главным образом сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (86 % общего количества данных) и в меньшем количестве видами *P. tabulaeformis* Carr., *P. massoniana* Lamb., *P. taiwanensis* Hayata, *P. yunnanensis* Franchet, *P. densiflora* S. et Z., *P. nigra* Arn., *P. pinaster* Aiton. Совместный анализ разных видов вызван невозможностью произрастания одного и того же древесного вида на всей территории Евразии, в результате чего их ареалы в пределах рода приурочены к определенным экорегионам (например, *P. nigra* на Балканах и *P. densiflora* в Японии). Это замещающие, или викарирующие виды, которые возникли в случаях геологически давнего разобщения когда-то сплошного ареала [6] или вследствие климатически обусловленного морфогенеза [7]. Распределение пробных площадей, на которых получены эти данные на территории Евразии, было показано ранее [8].

Результаты исследования. На первом этапе исследования рассчитаны независимые (традиционные) аллометрические уравнения в следующем порядке (см. рис. 1 в работе [2]): вначале – для общей фитомассы, затем – для надземной (промежуточная фракция 1-го порядка) и корней (для шага 1), далее – для промежуточных фракций 2-го порядка: кроны и

Таблица 1
Характеристика независимых «фракционных» аллометрических уравнений (2)
Table 1
Characteristics of independent allometric component biomass models (2)

Фракция фитомассы* <i>Biomass fraction*</i>	Регрессионные коэффициенты модели <i>Regression coefficients of the model</i>				
P_t	0,1327	$D^{1,2707}$	$H^{0,3740}$	$D^{0,2638} (\ln H)$	$e^{-0,0188 \cdot X}$
Шаг 1 <i>Step 1</i>					
P	0,1220	$D^{1,7070}$	$H^{0,1664}$	$D^{0,1524} (\ln H)$	$e^{0,0480 \cdot X}$
P_r	0,0119	$D^{0,9448}$	$H^{1,0387}$	$D^{0,2412} (\ln H)$	$e^{-0,0812 \cdot X}$
Шаг 2 <i>Step 2</i>					
P_c	0,1506	$D^{2,6427}$	$H^{-1,7267}$	$D^{0,2090} (\ln H)$	$e^{0,2139 \cdot X}$
P_s	0,0610	$D^{1,3875}$	$H^{0,6715}$	$D^{0,1559} (\ln H)$	$e^{-0,0062 \cdot X}$
Шаг 3а <i>Step 3a</i>					
P_f	0,0710	$D^{2,6266}$	$H^{-1,5295}$	$D^{0,1046} (\ln H)$	$e^{0,3732 \cdot X}$
P_b	0,0506	$D^{2,7121}$	$H^{-1,5836}$	$D^{0,2184} (\ln H)$	$e^{0,1091 \cdot X}$
Шаг 3б <i>Step 3b</i>					
P_w	0,0378	$D^{1,5959}$	$H^{0,7033}$	$D^{0,1242} (\ln H)$	$e^{-0,0609 \cdot X}$
P_{bk}	0,0285	$D^{1,4920}$	$H^{0,1380}$	$D^{0,0775} (\ln H)$	$e^{0,0683 \cdot X}$

Примечание: * Обозначения фракций: $P_t, P_r, P_c, P_s, P_f, P_b, P_w$ и P_{bk} – соответственно фитомасса дерева: общая, подземная (корней), надземная, кроны (хвои и ветвей), ствола (древесины и коры), хвои, ветвей, древесины ствола и коры ствола, кг.

Note: * $P_t, P_r, P_c, P_s, P_f, P_b, P_w$ and P_{bk} are tree biomass respectively: total, underground (roots), aboveground, crown (needles and branches), stems above bark (wood and bark), needles, branches, stem wood and bark correspondingly, kg.

ствола в коре (для шага 2) и, наконец, — для исходных фракций: хвои и ветвей (для шага 3а) и древесины и коры ствола (для шага 3б) согласно структуре уравнений, обоснование которой было дано ранее [2, 9]

$$\ln P_i = a_i + b_i(\ln D) + c_i(\ln H) + d_i(\ln D)(\ln H) + e_i X, \quad (1)$$

которая после антилогарифмирования приводит к виду

$$P_i = a_i D^{b_i} H^{c_i} D^{d_i(\ln H)} e^{e_i X}, \quad (2)$$

где P_i — фитомасса i -й фракции, кг;

D — диаметр ствола на высоте груди, см;

H — высота дерева, м;

a_i, b_i, c_i, d_i, e_i — регрессионные коэффициенты независимых уравнений (2) для i -й фракции фитомассы;

X — бинарная переменная, равная нулю для естественных древостоев и 1 — для культур. Характеристика полученных уравнений с поправкой на логарифмирование после процедуры антилогарифмирования приведена в табл. 1.

На втором этапе исследований после подстановки регрессионных коэффициентов независимых уравнений из табл. 1 в структуру аддитивной модели, представленную в табл. 2, получили совокупность исходных аддитивных аналитических зависимостей (табл. 3), а после сокращения дробей — окончательную трансконтинентальную аддитивную модель фракционного состава фитомассы деревьев естественных древостоев и культур, рассчитанную по трехшаговой схеме пропорционального взвешивания (табл. 4). Модель действительна в диапазоне фактических данных D от 0,5–0,6 до 49,0 см и H от 1,3–1,4 до 30,0 м.

Таким образом, получена аддитивная модель фракционного состава фитомассы деревьев естественных сосняков и культур, в которой устранена внутренняя противоречивость «фракционных» и общего уравнения. Поскольку обеспечение аддитив-

Таблица 2
Структура трехшаговой аддитивной модели, реализуемой по принципу пропорционального взвешивания

Table 2

The structure of three-step additive model designed according to scheme of proportional weighting

Шаг 1 Step 1	$P_a = \frac{1}{1 + \frac{a_r D^{b_r} H^{c_r} D^{d_r(\ln H)} e^{e_r X}}{a_a D^{b_a} H^{c_a} D^{d_a(\ln H)} e^{e_a X}}} \times P_t$
	$P_r = \frac{1}{1 + \frac{a_a D^{b_a} H^{c_a} D^{d_a(\ln H)} e^{e_a X}}{a_r D^{b_r} H^{c_r} D^{d_r(\ln H)} e^{e_r X}}} \times P_t$
Шаг 2 Step 2	$P_c = \frac{1}{1 + \frac{a_s D^{b_s} H^{c_s} D^{d_s(\ln H)} e^{e_s X}}{a_c D^{b_c} H^{c_c} D^{d_c(\ln H)} e^{e_c X}}} \times P_a$
	$P_s = \frac{1}{1 + \frac{a_c D^{b_c} H^{c_c} D^{d_c(\ln H)} e^{e_c X}}{a_s D^{b_s} H^{c_s} D^{d_s(\ln H)} e^{e_s X}}} \times P_a$
Шаг 3а Step 3а	$P_f = \frac{1}{1 + \frac{a_b D^{b_b} H^{c_b} D^{d_b(\ln H)} e^{e_b X}}{a_f D^{b_f} H^{c_f} D^{d_f(\ln H)} e^{e_f X}}} \times P_c$
	$P_b = \frac{1}{1 + \frac{a_f D^{b_f} H^{c_f} D^{d_f(\ln H)} e^{e_f X}}{a_b D^{b_b} H^{c_b} D^{d_b(\ln H)} e^{e_b X}}} \times P_c$
Шаг 3б Step 3б	$P_w = \frac{1}{1 + \frac{a_{bk} D^{b_{bk}} H^{c_{bk}} D^{d_{bk}(\ln H)} e^{e_{bk} X}}{a_w D^{b_w} H^{c_w} D^{d_w(\ln H)} e^{e_w X}}} \times P_s$
	$P_{bk} = \frac{1}{1 + \frac{a_w D^{b_w} H^{c_w} D^{d_w(\ln H)} e^{e_w X}}{a_{bk} D^{b_{bk}} H^{c_{bk}} D^{d_{bk}(\ln H)} e^{e_{bk} X}}} \times P_s$

Таблица 3
Совокупность исходных аддитивных аналитических зависимостей фракций фитомассы от диаметра и высоты дерева, рассчитанных по принципу пропорционального взвешивания

Table 3
The community of the original additive analytical dependencies of biomass components upon stem DBH and height, designed according to scheme of proportional weighting

$P_t = 0,1327 D^{1,2707} H^{0,3740} D^{0,2638} (\ln H) e^{-0,0188 \cdot X}$	
Шаг 1 Step 1	$P_a = \frac{1}{1 + \frac{0,0119 \cdot D^{0,9448} H^{1,0387} D^{0,2412} (\ln H) e^{-0,0812 \cdot X}}{0,1220 \cdot D^{1,7070} H^{1,1664} D^{0,1524} (\ln H) e^{0,0480 \cdot X}}} \times P_t$
	$P_r = \frac{1}{1 + \frac{0,1220 \cdot D^{1,7070} H^{1,1664} D^{0,1524} (\ln H) e^{0,0480 \cdot X}}{0,0119 \cdot D^{0,9448} H^{1,0387} D^{0,2412} (\ln H) e^{-0,0812 \cdot X}}} \times P_t$
Шаг 2 Step 2	$P_c = \frac{1}{1 + \frac{0,0610 \cdot D^{1,3875} H^{0,6715} D^{0,1559} (\ln H) e^{-0,0062 \cdot X}}{0,1506 \cdot D^{2,6427} H^{-1,7267} D^{0,2090} (\ln H) e^{0,2139 \cdot X}}} \times P_a$
	$P_s = \frac{1}{1 + \frac{0,1506 \cdot D^{2,6427} H^{-1,7267} D^{0,2090} (\ln H) e^{0,2139 \cdot X}}{0,0610 \cdot D^{1,3875} H^{0,6715} D^{0,1559} (\ln H) e^{-0,0062 \cdot X}}} \times P_a$
Шаг 3а Step 3а	$P_f = \frac{1}{1 + \frac{0,0506 \cdot D^{2,7121} H^{-1,5836} D^{0,2184} (\ln H) e^{0,1091 \cdot X}}{0,0710 \cdot D^{2,6266} H^{-1,5295} D^{0,1046} (\ln H) e^{0,3732 \cdot X}}} \times P_c$
	$P_b = \frac{1}{1 + \frac{0,0710 \cdot D^{2,6266} H^{-1,5295} D^{0,1046} (\ln H) e^{0,3732 \cdot X}}{0,0506 \cdot D^{2,7121} H^{-1,5836} D^{0,2184} (\ln H) e^{0,1091 \cdot X}}} \times P_c$
Шаг 3б Step 3б	$P_w = \frac{1}{1 + \frac{0,0285 \cdot D^{1,4920} H^{0,1380} D^{0,0775} (\ln H) e^{0,0683 \cdot X}}{0,0378 \cdot D^{1,5959} H^{0,7033} D^{0,1242} (\ln H) e^{-0,0609 \cdot X}}} \times P_s$
	$P_{bk} = \frac{1}{1 + \frac{0,0378 \cdot D^{1,5959} H^{0,7033} D^{0,1242} (\ln H) e^{-0,0609 \cdot X}}{0,0285 \cdot D^{1,4920} H^{0,1380} D^{0,0775} (\ln H) e^{0,0683 \cdot X}}} \times P_s$

ности уравнений фитомассы не обязательно означает повышение точности их оценок [10, 11], необходимо далее выяснить, обладает ли полученная аддитивная модель достаточными показателями адекватности и как они соотносятся с показателями адекватности независимых уравнений?

С этой целью по исходным (не логарифмированным) данным фитомассы рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 и среднеквадратические ошибки $RMSE$ как независимых, так и аддитивных уравнений, по формулам

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - p}} \quad (3)$$

где Y_i - фактическое значение;
 $\hat{Y}_i$ - расчетное значение по модели;
 $\bar{Y}$ - среднее фактическое значение фитомассы всех (N) деревьев;

$p = 5$ - число переменных;

N - общее число деревьев, включенных в расчет R^2 и $RMSE$.

Для корректного сопоставления адекватности независимых и аддитивных уравнений исходные данные для их расчета должны быть приведены в сопоставимое состояние, т.е. независимые уравнения для всех фракций фитомассы должны быть рассчитаны по тем же данным, что и аддитивные уравнения для общей фитомассы. Характеристика таких «приведенных» уравнений дана в табл. 5.

Таблица 4
Трехшаговая аддитивная модель фракционного состава фитомассы деревьев естественных сосняков и культур, реализованная по принципу пропорционального взвешивания

Table 4
Final transcontinental three-step additive model of tree biomass component composition in natural stands and plantations designed according to scheme of proportional weighting

	$P_t = 0,1327 D^{1,2707} H^{0,3740} D^{0,2638 (\ln H)} e^{-0,0188 \cdot X}$
Шаг 1 Step 1	$P_a = \frac{1}{1 + 0,0975 D^{-0,7622} H^{-0,1277} D^{0,0888 (\ln H)} e^{-0,1292 \cdot X}} \times P_t$ $P_r = \frac{1}{1 + 10,2521 D^{0,7622} H^{0,1277} D^{-0,0888 (\ln H)} e^{0,1292 \cdot X}} \times P_t$
Шаг 2 Step 2	$P_c = \frac{1}{1 + 0,4050 D^{-1,2552} H^{2,3982} D^{-0,0531 (\ln H)} e^{-0,2201 \cdot X}} \times P_a$ $P_s = \frac{1}{1 + 2,4689 D^{1,2552} H^{-2,3982} D^{0,0531 (\ln H)} e^{0,2201 \cdot X}} \times P_a$
Шаг 3а Step 3а	$P_f = \frac{1}{1 + 0,7127 D^{0,0855} H^{-0,0541} D^{0,1138 (\ln H)} e^{-0,2641 \cdot X}} \times P_c$ $P_b = \frac{1}{1 + 1,4032 D^{-0,0855} H^{0,0541} D^{-0,1138 (\ln H)} e^{0,2641 \cdot X}} \times P_c$
Шаг 3б Step 3б	$P_w = \frac{1}{1 + 0,7540 D^{-0,1039} H^{-0,5653} D^{-0,0467 (\ln H)} e^{0,1292 \cdot X}} \times P_s$ $P_{bk} = \frac{1}{1 + 1,3263 D^{0,1039} H^{0,5653} D^{0,0467 (\ln H)} e^{-0,1292 \cdot X}} \times P_s$

Таблица 5
Характеристика «приведенных» независимых аллометрических уравнений (2)

Table 5
The characteristic of "reduced" independent allometric equations (2)

Фракция фитомассы* Biomass fraction*	Регрессионные коэффициенты «приведенной» модели Regression coefficients of the "reduced" model				
P_t	0,1327	$D^{1,2707}$	$H^{0,3740}$	$D^{0,2638 (\ln H)}$	$e^{-0,0188 \cdot X}$
P_r	0,1045	$D^{1,2932}$	$H^{0,3722}$	$D^{0,2608 (\ln H)}$	$e^{0,0579 \cdot X}$
P_a	0,0119	$D^{0,9448}$	$H^{1,0387}$	$D^{0,2412 (\ln H)}$	$e^{-0,0812 \cdot X}$
P_c	0,1244	$D^{2,1783}$	$H^{-1,1978}$	$D^{0,2357 (\ln H)}$	$e^{0,0003 \cdot X}$
P_s	0,0968	$D^{0,6843}$	$H^{0,5040}$	$D^{0,4204 (\ln H)}$	$e^{-0,1257 \cdot X}$
P_f	0,0892	$D^{2,0585}$	$H^{-1,1600}$	$D^{0,1725 (\ln H)}$	$e^{-0,0177 \cdot X}$
P_b	0,1200	$D^{1,6364}$	$H^{1,6107}$	$D^{0,5221 (\ln H)}$	$e^{0,2308 \cdot X}$
P_w	0,0449	$D^{1,3314}$	$H^{0,5919}$	$D^{0,2445 (\ln H)}$	$e^{0,1070 \cdot X}$
P_{bk}	0,0174	$D^{1,5095}$	$H^{0,5551}$	$D^{0,0280 (\ln H)}$	$e^{-0,0340 \cdot X}$

Показатели адекватности R^2 и $RMSE$ полученных как независимых «приведенных» (табл. 5), так и аддитивных уравнений (табл. 4), рассчитаны по тому же количеству наблюдений N , по которому были рассчитаны «фракционные» уравнения (см. табл. 1), пропорциональное взвешивание которых по трехшаговой схеме дало в итоге аддитивные уравнения, по-

казанные в табл. 4. Результаты сопоставления (табл. 6) свидетельствуют о том, что аддитивные уравнения при их внутренней непротиворечивости обладают еще и более высокими показателями адекватности по сравнению с независимыми (не гармонизированными) уравнениями. Исключение составило лишь уравнение для массы корней (см. табл. 6).

Сравнение показателей адекватности независимых и аддитивных уравнений фитомассы деревьев естественных древостоев и культур

Table 6

Comparison of the adequacy indices of the independent and additive equations for tree biomass in natural stands and plantations

Показатели адекватности <i>Adequacy indices</i>	Фракции фитомассы* <i>Biomass components*</i>								
	P_t	P_a	P_r	P_s	P_w	P_{bk}	P_c	P_b	P_f
Независимые уравнения <i>Independent equations</i>									
R^2	0,986	0,745	0,982	0,891	0,821	0,723	0,859	0,654	0,719
RMSE	17,79	77,36	3,23	43,55	50,20	3,60	10,94	13,71	3,29
Аддитивные уравнения <i>Additive equations</i>									
R^2	0,986	0,929	0,977	0,909	0,931	0,873	0,881	0,879	0,785
RMSE	17,79	40,78	3,66	39,86	31,27	2,44	10,06	8,11	2,88

Примечание: * Жирным шрифтом выделены фракции, для которых значения R^2 по аддитивным моделям выше, чем по независимым, а значения RMSE соответственно ниже.

Note: * Bold components, for which R^2 values of the additive models higher than independent ones but RMSE values are respectively below.

Таблица 7

Таблица аддитивного фракционного состава фитомассы деревьев (кг абсолютно сухой массы) для оценки фитомассы естественных древостоев двухвойных сосен, произрастающих на территории Евразии

Table 7

Additive component composition of tree biomass (kg of absolutely dry matter) for the evaluation of natural forest biomass in Eurasia

H, м H, m	Фракции фитомассы <i>Biomass fractions</i>	Диаметр ствола на высоте груди, см <i>Diameter at breast height, cm</i>						
		6	10	14	18	22	26	30
6	Общая фитомасса <i>Total biomass</i>	5,45	13,00	23,03	—	—	—	—
	Корни <i>Roots</i>	0,74	1,35	1,99	—	—	—	—
	Надземная <i>Aboveground</i>	4,71	11,65	21,04	—	—	—	—
	Крона <i>Crown</i>	1,29	5,00	11,41	—	—	—	—
	Хвоя <i>Needles</i>	0,62	2,21	4,78	—	—	—	—
	Ветви <i>Branches</i>	0,67	2,79	6,64	—	—	—	—
	Ствол в коре <i>Stem above bark</i>	3,42	6,65	9,63	—	—	—	—
	Древесина ствола <i>Stem wood</i>	2,86	5,65	8,25	—	—	—	—
	Кора ствола <i>Stem bark</i>	0,56	1,00	1,38	—	—	—	—
14	Общая фитомасса <i>Total biomass</i>	11,18	29,86	57,03	92,48	136,04	—	—
	Корни <i>Roots</i>	3,06	6,68	11,08	16,13	21,72	—	—
	Надземная <i>Aboveground</i>	8,12	23,18	45,95	76,35	114,32	—	—
	Крона <i>Crown</i>	0,41	2,29	6,84	15,19	28,28	—	—
	Хвоя <i>Needles</i>	0,18	0,91	2,52	5,27	9,31	—	—
	Ветви <i>Branches</i>	0,23	1,37	4,32	9,93	18,97	—	—
	Ствол в коре <i>Stem above bark</i>	7,70	20,90	39,11	61,16	86,04	—	—
	Древесина ствола <i>Stem wood</i>	6,92	18,99	35,78	56,22	79,38	—	—
	Кора ствола <i>Stem bark</i>	0,78	1,91	3,33	4,94	6,67	—	—
22	Общая фитомасса <i>Total biomass</i>	—	—	92,52	154,58	232,90	327,61	438,84
	Корни <i>Roots</i>	—	—	26,33	40,23	56,33	74,45	94,46
	Надземная <i>Aboveground</i>	—	—	66,19	114,35	176,57	253,16	344,38
	Крона <i>Crown</i>	—	—	3,92	9,45	18,88	33,35	53,99
	Хвоя <i>Needles</i>	—	—	1,35	3,01	5,67	9,51	14,72
	Ветви <i>Branches</i>	—	—	2,58	6,43	13,21	23,84	39,27
	Ствол в коре <i>Stem above bark</i>	—	—	62,27	104,90	157,69	219,81	290,39
	Древесина ствола <i>Stem wood</i>	—	—	58,29	98,59	148,63	207,67	274,89
	Кора ствола <i>Stem bark</i>	—	—	3,97	6,31	9,06	12,14	15,51

Таблица 8
Таблица аддитивного фракционного состава фитомассы деревьев (кг абсолютно сухой массы) для оценки
фитомассы культур двухвойных сосен, произрастающих на территории Евразии

Table 8

Additive component composition of tree biomass (kg of absolutely dry matter) for the evaluation of plantations
biomass in Eurasia

H, м H, m	Фракции фитомассы Biomass fractions	Диаметр ствола на высоте груди, см Diameter at breast height, cm						
		6	10	14	18	22	26	30
6	Общая фитомасса Total biomass	5,35	12,76	22,60	—	—	—	—
	Корни Roots	0,65	1,18	1,73	—	—	—	—
	Надземная Aboveground	4,70	11,58	20,87	—	—	—	—
	Крона Crown	1,50	5,60	12,44	—	—	—	—
	Хвоя Needles	0,82	2,85	6,02	—	—	—	—
	Ветви Branches	0,68	2,76	6,42	—	—	—	—
	Ствол в коре Stem above bark	3,20	5,98	8,42	—	—	—	—
	Древесина ствола Stem wood	2,62	4,97	7,08	—	—	—	—
	Кора ствола Stem bark	0,58	1,00	1,34	—	—	—	—
14	Общая фитомасса Total biomass	10,97	29,30	55,97	90,75	133,50	—	—
	Корни Roots	2,73	5,92	9,79	14,21	19,10	—	—
	Надземная Aboveground	8,24	23,38	46,18	76,54	114,40	—	—
	Крона Crown	0,52	2,80	8,26	18,09	33,24	—	—
	Хвоя Needles	0,27	1,30	3,57	7,39	12,96	—	—
	Ветви Branches	0,25	1,50	4,69	10,70	20,28	—	—
	Ствол в коре Stem above bark	7,72	20,58	37,92	58,45	81,16	—	—
	Древесина ствола Stem wood	6,84	18,47	34,29	53,14	74,08	—	—
	Кора ствола Stem bark	0,88	2,11	3,63	5,31	7,08	—	—
22	Общая фитомасса Total biomass	—	—	90,79	151,70	228,55	321,50	430,65
	Корни Roots	—	—	23,51	35,83	50,05	66,02	83,64
	Надземная Aboveground	—	—	67,28	115,87	178,50	255,47	347,01
	Крона Crown	—	—	4,90	11,69	23,17	40,63	65,28
	Хвоя Needles	—	—	1,98	4,43	8,31	13,89	21,41
	Ветви Branches	—	—	2,91	7,26	14,87	26,74	43,87
	Ствол в коре Stem above bark	—	—	62,38	104,18	155,33	214,84	281,74
	Древесина ствола Stem wood	—	—	57,89	97,10	145,26	201,44	264,74
	Кора ствола Stem bark	—	—	4,49	7,08	10,07	13,40	17,00

Путем табулирования аддитивной модели фитомассы деревьев естественных сосняков и культур по задаваемым значениям D и H получили искомые таблицы фракционного состава фитомассы деревьев, предназначенные для оценки фитомассы сосновых насаждений, произрастающих на территории Евразии (табл. 7 и 8).

Сравнительный анализ таблиц 7 и 8 показывает, что в аддитивных уравнениях кодирование деревьев естественных сосняков и культур бинарной переменной учитывает различие их по фракционной структуре фитомассы. Например, естественные сосняки пре-

вышают культуры по общей, подземной фитомассе, фитомассе ствола в коре и древесины ствола равновеликих деревьев соответственно на 2, 13, 3 и 4 %. По надземной фитомассе, массе кроны, хвой, ветвей и коры ствола, напротив, культуры превышают естественные древостои соответственно на 1, 21, 42, 9 и 9 %. Наибольшее различие естественных сосняков и культур наблюдается по массе хвой (42 %), что объясняется ростом последних при меньшей густоте. Культуры и естественные сосняки различаются и по доле хвой в надземной фитомассе, которая составляет в первом случае 7,7, а во втором 5,5 %.

Закключение. Таким образом, впервые в русскоязычной литературе на уникальной по объему базе фактических данных на примере двухвойного под-рода сосны *Pinus* L., представленного как естественными древостоями, так и культурами, разработана система аддитивных соотношений фракционного состава фитомассы, на основе которой составлены соответствующие таблицы для оценки фитомассы деревьев по двум входам – диаметру ствола и высоте дерева. Предложенная модель и соответствующие таблицы для оценки подеревной фитомассы дают

возможность определения в первом приближении фитомассы естественных сосняков и культур (т/га) Евразии по данным измерительной таксации. Поскольку ранее было показано [9], что подобные всеобщие модели и таблицы могут иметь смещения в локальных условиях их применения, на следующем этапе исследований предстоит разработать более детальные, региональные модели и таблицы фитомассы путем «разбиения» предложенной здесь всеобщей модели на региональные с помощью фиктивных переменных.

Литература

1. Усольцев В. А. Об аддитивных моделях биомассы деревьев: неопределенности и попытка их аналитического обзора // Эко-потенциал. 2017. № 2. С. 23–46.
2. Усольцев В. А., Воронов М. П., Колчин К. В., Азаренок В. А. Трансконтинентальная аддитивная аллометрическая модель и таблица для оценки фитомассы деревьев ели // Аграрный вестник Урала. 2017. № 7. С. 36–45.
3. Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations // Forest Science. 2015. Vol. 61. № 1. P. 35–45.
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. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Ekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, 2016. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>.
6. Толмачев А. И. Основы учения об ареалах: Введение в хорологию растений. Л., 1962. 100 с.
7. Чернышев В. Д. Пути физиолого-энергетических адаптаций хвойных в экстремальных условиях // Биологические проблемы Севера. VI-й симпозиум. Вып. 5. Якутск, 1974. С. 13–17.
8. Усольцев В. А., Воронов М. П., Колчин К. В. Структура фитомассы деревьев лесобразующих пород в трансконтинентальных градиентах Евразии // Эко-потенциал. 2017. № 1. С. 55–71. URL : <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6505/1/eko-17-04.pdf>.
9. Усольцев В. А., Колчин К. В., Воронов М. П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea* L.) // Эко-потенциал. 2017. № 1. С. 22–39. URL : <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>.
10. Cunia T., Briggs R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 376–384.
11. Reed D. D., Green E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models // Canadian Journal of Forest Research. 1985. Vol. 15. P. 1184–1187.

References

1. Usoltsev V. A. On additive models of tree biomass: some uncertainties and the attempt of their analytical review // Eco-Potential. 2017. № 2. P. 23–46. URL : <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6550>.
2. Usoltsev V. A., Voronov M. P., Kolchin K. V., Azarenok V. A. Transcontinental additive allometric model and weight table for estimating spruce tree biomass // Agrarian Bulletin of the Urals. 2017. № 7. P. 36–45.
3. Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations // Forest Science. 2015. Vol. 61. No. 1. P. 35–45.
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. 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. URL : <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>.
6. Tolmachev A. I. Fundamentals of plant habitat theory: Introduction to plant communities' chorology. L., 1962. 100 p.
7. Chernyshev V. D. The ways of physiological and energy adaptations of coniferous in extreme environments // Biological problems of the North. VI-th Symposium. Issue. 5. Yakutsk, 1974. P. 13–17.

8. Usoltsev V. A., Voronov M. P., Kolchin K. V. Single-tree biomass structure of forest-forming species in transcontinental gradients of Eurasia // Eco-Potential. 2017. № 1. P. 55–71. URL : <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6505/1/eko-17-04.pdf>.
9. Usoltsev V. A., Kolchin K. V., Voronov M. P. Dummy variables and biases of allometric models when local estimating tree biomass (on an example of *Picea* L.) // Eco-Potential. 2017. № 1 (17). P. 22–39. URL : <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>.
10. Cunia T., Briggs R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 376–384.
11. Reed D. D., Green E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models // Canadian Journal of Forest Research. 1985. Vol. 15. P. 1184–1187.

*Авторы выражают признательность кандидату физико-математических наук,
старшему научному сотруднику Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
Григорию Борисовичу Кофману за критические замечания, высказанные в ходе подготовки рукописи.*