

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ВСЕОБЩИХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ

В. А. УСОЛЬЦЕВ,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
К. В. КОЛЧИН,
аспирант,
В. А. АЗАРЕНОК,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
Уральский государственный лесотехнический университет
(620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37)

Ключевые слова: *Picea L.*, аллометрические модели, фитомасса дерева, пробные площади, региональные различия, стандартные и систематические ошибки.

Леса играют важную роль в снижении количества парниковых газов в атмосфере и предотвращении изменения климата. Одним из способов количественной оценки углеродного обмена в лесном покрове является определение изменений в запасах его фитомассы и углерода со временем. Запас фитомассы на единице площади начинается с определения его на уровне отдельных деревьев. Известно строгое и устойчивое аллометрическое соотношение между фитомассой дерева и его диаметром (простая аллометрия), или между фитомассой дерева и несколькими массообразующими (морфометрическими) показателями (многофакторная аллометрия). В настоящее время в разных странах и континентах проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (generic, generalized, common models), которые обеспечивали бы аллометрической модели приемлемую точность при оценке фитомассы насаждений. В статье на основе сформированной базы данных о фитомассе деревьев *Picea* в количестве 1 065 определений построены аллометрические модели четырех видов, включающие в себя фиктивные переменные, которые дают возможность дать региональные оценки их фитомассы по известным морфометрическим показателям (диаметр ствола и кроны, высота дерева). Предложенные аллометрические модели свидетельствуют об их адекватности фактическим данным (коэффициент детерминации от 0,814 до 0,984) и могут применяться при региональных оценках фитомассы деревьев ели. Однако всеобщие аллометрические модели, построенные по всему массиву фактических данных, дают в экорегионах слишком большие стандартные ошибки (до 221 %) и неприемлемые смещения обоих знаков (от +311 до -99 %), что исключает возможность их применения на региональных уровнях.

ON POSSIBILITIES FOR APPLICATION OF GENERIC AND REGIONAL ALLOMETRIC MODELS WHEN ESTIMATING SPRUCE TREE BIOMASS

V. A. USOLTSEV,
doctor of agricultural sciences, professor,
K. V. KOLCHIN,
postgraduate student,
V. A. AZARENOK,
doctor of agricultural sciences, professor,
Ural State Forest Engineering University
(37 Sibirskiy tract Str., 620100, Ekaterinburg)

Keywords: *Picea L.*, allometric models, tree biomass, sample plots, regional differences, standard errors, biases.

Forests play an important role in reducing the amount of greenhouse gases in the atmosphere and preventing climate change. One way to quantify carbon exchange in forest cover is estimating changes in its biomass and carbon pools over time. Biomass estimating on the unit of area starts with harvesting sample trees and weighing their biomass. It is known the strong and sustainable relationship between tree biomass and its diameter (simple allometry), or between tree biomass and a number of mass-forming (morphometric) indices (multi-factor allometry). At present, in different countries and continents, the studies of the applicability of the so-called generic (generalized, common) allometric models are intensified that would give acceptable accuracy in estimating forest biomass. In the article on the basis of the compiled database of tree biomass of *Picea* at a number of 1065 trees, allometric models of the four modifications are designed, which include the block of independent dummy variables. These models provide an opportunity to give regional estimates of tree biomass when using some known mass-forming indices (stem and crown diameter and tree height). Allometric models proposed are indicative of their adequacy for the actual data (coefficients of determination are 0.814 to 0.984) and can be applied in regional estimating of spruce tree biomass. However, generic allometric models built using the total quantity of actual data give in different ecoregions too large standard errors (up to 221 %) and unacceptable both positive and negative biases (from +311 to -99 %), that excludes any possibility of their application at regional levels.

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

Леса играют важную роль в снижении количества парниковых газов в атмосфере и предотвращении изменения климата. Одним из способов количественной оценки углеродного обмена в лесном покрове является определение изменений в запасах его фитомассы и углерода со временем. Запас фитомассы на единице площади начинается с определения его на уровне отдельных деревьев. Известно строгое и устойчивое аллометрическое соотношение между фитомассой дерева и его диаметром (простая аллометрия), или между фитомассой дерева и несколькими массообразующими (морфометрическими) показателями (многофакторная аллометрия). В настоящее время в разных странах и континентах проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (generic, generalized, common models), которые обеспечивали бы аллометрической модели приемлемую точность при оценке фитомассы насаждений [1, 2]. Хотя применяемые всеобщие уравнения характеризуются высокими показателями адекватности, их использование при расчете фитомассы на единице площади данного региона или конкретного древостоя не гарантирует приемлемую точность оценки. Поэтому с целью минимизации затрат при максимуме точности оценок необходим анализ сме-

щений, обусловленных применением той или иной всеобщей аллометрической модели в локальных географических регионах. Для этого нужна наиболее полная база данных о фактической структуре фитомассы деревьев, взятых так называемым «деструктивным» методом на пробных площадях. В этой связи в зарубежной литературе провозглашено наступление «эры больших массивов данных» (the Big Data Era) [3, 4, 5, 6]. Первые опыты формирования подобных баз данных для лесов Евразии уже имеются [3, 7, 8, 9].

Цель и методика исследований. В настоящем исследовании мы ограничиваемся анализом смещенных всеобщих аллометрических уравнений при локальной оценке фитомассы деревьев ели (*Picea* L.). В качестве одного из методических подходов к анализу названных смещений нами принят метод фиктивных переменных [10, 11]. Фактические данные фитомассы деревьев ели (1065 определений) после извлечения их из базы данных [8] распределены по 9 экорегионам и обозначены соответственно девятью фиктивными переменными от X_1 до X_9 . В качестве нулевого варианта принят весь массив данных (табл. 1).

В качестве базовой модели принята аллометрическая зависимость надземной фитомассы (Pa , кг) дерева в четырех вариантах: (1) от диаметра ствола

Таблица 1

Схема кодирования региональных и нулевого (общего) массива фактических данных фитомассы деревьев ели

Table 1

Encoding scheme of regional and zero (general) array of actual data of phytomass of fir-trees

Регион* Region	Вид <i>Picea</i> Dietr. Variety of <i>Picea</i> Dietr.	Блок фиктивных переменных Block of fictitious variables									Число наблюдений Number of observations
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	
Все регионы, All regions в том числе: including	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1065
СЕш CE	<i>P. abies</i> (L.)Karst.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	390
СР SR	<i>P. abies</i> (L.)Karst.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	234
ВРсп EEEP	<i>P. abies</i> (L.)Karst.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	70
УРюж (Е) URs (F)	<i>P. obovata</i> L.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	40
УРюж (К) URs (C)	<i>P. obovata</i> L.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	276
УРсп (Е) URm (F)	<i>P. obovata</i> L.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	20
ЗСлс WSfs	<i>P. obovata</i> L.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10
ПТ PT	<i>P. schrenkiana</i> F.et M.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	15
ДВ FE	<i>P. ajanensis</i> Lindl. et Gord.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10

Примечание: *СЕш – Среднеевропейская провинция, широколиственные леса; СР – Скандинавско-Русская провинция; ВРсп – Восток Русской равнины, средняя тайга; УРюж (Е) – Урал, южная тайга, естественные ельники; УРюж (К) – Урал, южная тайга, культуры; УРсп (Е) – Урал, средняя тайга, естественные ельники; ЗСлс – Западная Сибирь, лесостепь; ПТ – Памиро-Тяньшаньская провинция (Северо-Западный Китай); ДВ – Дальневосточная провинция.

Note: *CE – the Central European province, the broad-leaved woods; SR – the Scandinavian-Russian province; EEEP – the East of East European Plain, middle taiga; URs (F) – the Urals, the southern taiga, natural fir groves; URs (C) – the Urals, the southern taiga, cultures; URm (F) – the Urals, middle taiga, natural fir groves; WSfs – Western Siberia, forest-steppe; PT – the Pamiro-Tyanshan province (Northwest China); FE – the Far East province.

Таблица 2
Характеристика аллометрических моделей
Table 2
Characteristic of allometric models

Независимая переменная <i>Independent variable</i>	Номер уравнения <i>Number of equation</i>	Константы уравнений при их независимых переменных <i>Constants of the equations at their independent variables</i>								
		a_0	a_1X_1	a_2X_2	a_3X_3	a_4X_4	a_5X_5	a_6X_6	a_7X_7	a_8X_8
ln(Pa)	(1)	-1.467	0.141	-0.136	-0.167	-0.0049	-0.075	0.162	0.214	0.260
	(2)	-0.411	0.018	-0.028	-0.155	0.044	-0.028	0.531	-0.120	0.198
	(3)	0.102	0.946	-0.386	-0.689	0.109	-0.387	-0.402	-0.997	2.153
	(4)	-1.180	0.130	-0.162	-0.248	-0.129	-0.0124	1.827	-0.434	0.540
Продолжение таблицы 2										
Независимая переменная <i>Independent variable</i>	Номер уравнения <i>Number of equation</i>	Константы уравнений при их независимых переменных <i>Constants of the equations at their independent variables</i>						R ² *	SE*	
		a_9X_9	$a_{10}(\ln D)$	$a_{11}(\ln H)$	$a_{12}(\ln Dcr)$	$a_{13}(\ln D)(\ln H)$	$a_{14}(\ln Dcr)(\ln H)$			
ln(Pa)	(1)	0.063	2.111	–	–	–	–	0.959	0.41	
	(2)	0.246	1.030	-0.275	–	0.350	–	0.984	0.25	
	(3)	-1.317	–	–	3.406	–	–	0.814	0.88	
	(4)	-0.027	–	1.680	-0.482	–	0.500	0.984	0.25	

Примечание: *R² – коэффициент детерминации, SE – стандартная ошибка уравнения.

Note: *R² – determination coefficient, SE – standard equation error.

на высоте груди (D , см), (2) от диаметра ствола и высоты дерева (H , м), (3) от диаметра (ширины) кроны (Dcr , м) и (4) от диаметра кроны и высоты дерева. Анализ аллометрических моделей по последним двум вариантам обусловлен исключительным прогрессом последних лет в области дистанционного зондирования Земли, в связи с чем происходит смещение ее приоритетов от наземных методов в пользу дистанционных [6, 12, 13, 14].

Результаты исследований. За основу регрессионного анализа фактических данных фитомассы деревьев, упомянутых в табл. 1, взята аллометрическая модель, структурированная в соответствии с нашей схемой кодирования фиктивных переменных (табл. 1). В результате получены четыре уравнения, характеристика которых дана в табл. 2. Все константы уравнений значимы на уровне вероятности $P_{0.01}$, и уравнения адекватны фактическим данным.

Далее необходимо выяснить, насколько применимы всеобщие аллометрические модели при оценке фитомассы деревьев ели в локальных условиях экорегионов. После исключения региональных фиктивных переменных всеобщие модели (1)–(4) получили вид

$$\ln(Pa) = -1.467 + 2.111(\ln D), (5)$$

$$\ln(Pa) = -0.411 + 1.030(\ln D) - 0.275(\ln H) + 0.350(\ln D)(\ln H), (6)$$

$$\ln(Pa) = 0.102 + 3.406(\ln Dcr), (7)$$

$$\ln(Pa) = -1.180 - 0.482(\ln Dcr) + 1.680(\ln H) + 0.500(\ln Dcr)(\ln H) (8)$$

Путем табулирования (5)–(8) по фактическим данным деревьев каждого экорегиона получены расчетные показатели фитомассы, и сопоставле-

нием последних с фактическими рассчитаны стандартные ошибки при оценке фитомассы в регионах с помощью всеобщих моделей, а также соответствующие смещения (табл. 3).

Выводы. Аллометрические модели, полученные на основе базы данных о фитомассе деревьев ели и включающие в себя фиктивные переменные, дают возможность дать региональные оценки их фитомассы по известным морфометрическим показателям (диаметр ствола и кроны, высота дерева). Коэффициент детерминации в зависимости (1) существенно выше, чем в зависимости (3) ($0,959 > 0,814$), а двухфакторные модели (2) и (4) показали одинаковые коэффициенты детерминации (0,984). Полученные региональные аллометрические модели свидетельствуют об их адекватности фактическим данным и могут применяться при локальных оценках фитомассы деревьев ели.

Применение двухфакторных всеобщих моделей вида (2) и (4) в экорегионах дает меньшие стандартные ошибки (в среднем соответственно 30 и 77 %) по сравнению с простыми уравнениями вида (1) и (3) (в среднем соответственно 41 и 160 %). Однако вследствие наличия больших стандартных ошибок (до 402 %) и неприемлемых региональных смещений обоих знаков (от +311 до -99 %) применение всеобщих аллометрических моделей четырех исследованных видов на региональных уровнях неприемлемо.

С другой стороны, аллометрические модели фитомассы вида (4) при более высоких стандартных ошибках определения (в среднем 77 %) в сравнении с моделями (2) (в среднем 30 %) компенсируют этот недостаток преимуществом бортового лазерного

Таблица 3
Ошибки определения фитомассы деревьев ели в экорегионах по всеобщим моделям (5)–(8)

Table 3

Errors of determination of phytomass of fir trees in ecoregions by general models (5)–(8)

№	Экорегион <i>Ecoregion</i>	Номер уравнения <i>Number of equation</i>	Независимые числен- ные переменные <i>Independent numeric variables</i>	Ошибка, % <i>Error, %</i>	
				Стандартная <i>Standard</i>	Систематическая <i>Systematic</i>
1	Средне-Европейская про- винция, широколиствен- ные леса <i>The Central European province, the broad-leaved woods</i>	(5)	<i>D</i>	28.6	–8.9
		(6)	<i>D, H</i>	20.3	0.2
		(7)	<i>Dcr</i>	89.4	–78.7
		(8)	<i>Dcr, H</i>	115.5	–36.9
2	Скандинавско-Русская провинция <i>The Scandinavian-Russian province</i>	(5)	<i>D</i>	38.6	7.6
		(6)	<i>D, H</i>	26.2	5.4
		(7)	<i>Dcr</i>	159.2	93.9
		(8)	<i>Dcr, H</i>	95.4	–50.7
3	Восток Русской равнины, средняя тайга <i>East of East European Plato, middle taiga</i>	(5)	<i>D</i>	48.3	26.6
		(6)	<i>D, H</i>	34.1	19.7
		(7)	<i>Dcr</i>	196.2	141.2
		(8)	<i>Dcr, H</i>	44.8	31.9
4	Уральская провинция, южная тайга (E) <i>The Ural province, south taiga (F)</i>	(5)	<i>D</i>	32.1	4.4
		(6)	<i>D, H</i>	23.7	–1.7
		(7)	<i>Dcr</i>	42.6	–5.5
		(8)	<i>Dcr, H</i>	21.7	15.3
5	Уральская провинция, южная тайга (K) <i>The Ural province, south taiga (C)</i>	(5)	<i>D</i>	54.1	21.5
		(6)	<i>D, H</i>	33.7	7.5
		(7)	<i>Dcr</i>	189.5	90.2
		(8)	<i>Dcr, H</i>	97.6	–97.4
6	Уральская провинция, средняя тайга (E) <i>The Ural province, middle taiga (F)</i>	(5)	<i>D</i>	41.3	–4.6
		(6)	<i>D, H</i>	44.5	–37.3
		(7)	<i>Dcr</i>	49.5	49.5
		(8)	<i>Dcr, H</i>	57.8	–57.8
7	Западно-Сибирская рав- нинная провинция, лесо- степь <i>The Western Siberia prov- ince, forest-steppe</i>	(5)	<i>D</i>	59.9	5.3
		(6)	<i>D, H</i>	30.3	15.5
		(7)	<i>Dcr</i>	224.9	186.3
		(8)	<i>Dcr, H</i>	106.7	–98.8
8	Памиро-Тяньшаньская провинция <i>The Pamiro-Tyanshyan province</i>	(5)	<i>D</i>	29.7	–20.6
		(6)	<i>D, H</i>	21.4	17.2
		(7)	<i>Dcr</i>	89.1	–85.6
		(8)	<i>Dcr, H</i>	85.4	–56.9
9	Дальний Восток <i>Far East</i>	(5)	<i>D</i>	39.8	0
		(6)	<i>D, H</i>	34.6	–16.0
		(7)	<i>Dcr</i>	401.9	311.0
		(8)	<i>Dcr, H</i>	68.4	–49.7

зондирования – несопоставимой с наземной такса-
цией скоростью измерения диаметров крон и вы-

сот деревьев, а также скоростью совмещения их с
аллометрическими моделями в режиме реального
времени.

Литература

1. Stas S. M., Rutishauser E., Chave J., Anten N.P.R., Laumonier Y. Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 389. P. 27–34.
2. Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P. et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175.
3. Falster D. S., Duursma R. A., Ishihara M. I. et al. BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants // *Ecology*. 2015. Vol. 96. № 5. P. 1445.
4. 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. Issue 3. P. 736–749.
5. Liang J., Crowther T.W., Picard N. et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests // *Science*. 2016. Vol. 354. Issue 6309. P. 196–208.
6. Jucker T., Caspersen J., Chave J. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. P. 177–190.
7. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург, 2016. 336 с.
8. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Ekaterinburg, 2016.
9. Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V.A. et al. A dataset of forest biomass structure for Eurasia // *Scientific Data*. 2017. Vol. 4. Article № 170070.
10. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М. : Статистика, 1973. 392 с.
11. 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.
12. Dalponte M., Reyes F., Kandare K., Gianelle D. Delineation of individual tree crowns from ALS and hyperspectral data: a comparison among four methods // *European Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 48. P. 365–382.
13. Sheridan R. D., Popescu S. C., Gatzliolis D., Morgan C. L. S., Ku N.-W. Modeling forest aboveground biomass and volume using airborne LiDAR metrics and forest inventory and analysis data in the Pacific Northwest // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. № 1. P. 229–255.
14. Усольцев В. А., Часовских В. П., Норицина Ю. В., Норицин Д. В. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ // *Сибирский лесной журнал*. 2016. № 4. С. 68–76.

References

1. Stas S. M., Rutishauser E., Chave J., Anten N.P.R., Laumonier Y. Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 389. P. 27–34.
2. Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P. et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175.
3. Falster D. S., Duursma R. A., Ishihara M. I. et al. BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants // *Ecology*. 2015. Vol. 96. № 5. P. 1445.
4. 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. Issue 3. P. 736–749.
5. Liang J., Crowther T.W., Picard N. et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests // *Science*. 2016. Vol. 354. Issue 6309. P. 196–208.
6. Jucker T., Caspersen J., Chave J. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. P. 177–190.
7. Usoltsev V.A. Single-tree biomass of forest-forming species in Eurasia: database, climate-related geography, weight tables. Ekaterinburg, 2016. 336 p.
8. Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Ekaterinburg, 2016.
9. Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V. A. et al. A dataset of forest biomass structure for Eurasia // *Scientific Data*. 2017. Vol. 4. Article № 170070.
10. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. M. : “Statistika” Publishing, 1973. 392 p.
11. 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. P. 22–39.
12. Dalponte M., Reyes F., Kandare K., Gianelle D. Delineation of individual tree crowns from ALS and hyperspectral data: a comparison among four methods // *European Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 48. P. 365–382.
13. Sheridan R. D., Popescu S. C., Gatzliolis D., Morgan C.L.S., Ku N.-W. Modeling forest aboveground biomass and volume using airborne LiDAR metrics and forest inventory and analysis data in the Pacific Northwest // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. № 1. P. 229–255.
14. Usoltsev V. A., Chasovskikh V. P., Noritsina Yu. V., Noritsin D. V. Allometric models of tree biomass for airborne laser scanning and ground inventory of carbon pool in the forests of Eurasia: Comparative analysis // *Siberian Journal of Forest Science*. 2016. № 4. P. 68–76.