

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

DOI:10.37482/0536-1036-2022-6-38-54

Разработка модели биомассы *Picea L.* и *Abies L.* для региональных условий Евразии

В.А. Усольцев^{1,2✉}, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

И.С. Цепордей¹, *канд. с.-х. наук, науч. сотр.*; *ResearcherID*: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

И.М. Данилин³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *Researcher ID*: [AAS-4960-2020](https://orcid.org/0000-0001-9706-6927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9706-6927>

¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; usoltsev50@mail.ru✉, ivan.tsepordey@yandex.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; usoltsev50@mail.ru

³Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН, Академгородок, д. 50, г. Красноярск, Россия, 660036; danilin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.01.21 / Одобрена после рецензирования 20.04.21 / Принята к печати 23.04.21

Аннотация. Лесные экосистемы играют большую роль в стабилизации климата, и непрерывный мониторинг их биомассы имеет первостепенное значение. Технология бортового лазерного сканирования получила широкое распространение при оценке биомассы деревьев за счет дистанционной регистрации таких таксационных показателей деревьев и древостоев, как ширина и площадь проекции кроны, высота дерева и древостоя. В работе использована авторская база эмпирических данных 1550 модельных деревьев ели *Picea L.* и 535 пихты *Abies L.* Евразии. База данных содержит сведения о высоте дерева, ширине и длине кроны, биомассе ствола, листвы, ветвей и корней. Выявлено, что наибольшую информативность имеют 2-факторные аллометрические модели компонентов биомассы, включающие в качестве независимых переменных ширину кроны и высоту дерева. Для всех компонентов биомассы установлена положительная связь с шириной кроны и высотой дерева. На статистически достоверном уровне биомасса компонентов одинаковых по размеру деревьев пихты на 45–71 % больше, чем у ели. Это можно объяснить тем, что при одной и той же высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % меньше по сравнению с елью. Оценен вклад зимних температур и осадков в изменчивость компонентов биомассы. Биомасса всех компонентов равновеликих деревьев описывается пропеллерообразной 3D-зависимостью. В теплых регионах при повышении количества осадков биомасса увеличивается, по мере перехода к холодным регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса становится больше, по мере перехода в сухие условия – меньше. Включение в аллометрическую модель длины кроны как дополнительной независимой переменной практически не улучшило ее прогностическую способность. Вклад таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов биомассы составляет соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %. Климатические переменные в наибольшей



степени объясняют изменчивость биомассы стволов и надземной биомассы (от 18 до 20 %), в наименьшей степени – хвои и ветвей (от 8 до 9 %). Полученные результаты могут быть полезны при лазерном мониторинге биомассы лесов и прогнозировании возможных изменений структуры биомассы деревьев в случае климатических отклонений.

Ключевые слова: гидротермические градиенты, компоненты биомассы, лазерное зондирование деревьев, аллометрические модели, средняя температура января, годовое количество осадков, ель, пихта

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания FEUZ-2021-0014.

Для цитирования: Усольцев В.А., Цепордей И.С., Данилин И.М. Разработка модели биомассы *Picea L.* и *Abies L.* для региональных условий Евразии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 38–54. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-38-54>

Original article

Designing a Model of the *Picea L.* and *Abies L.* Biomass for Regional Climatic Conditions in Eurasia

Vladimir A. Usoltsev^{1,2}✉, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Ivan S. Tsepordey², Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

Igor M. Danilin³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAS-4960-2020](https://orcid.org/0000-0001-9706-6927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9706-6927>

¹Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; usoltsev50@mail.ru✉, ivan.tsepordey@yandex.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

³V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; danilin@ksc.krasn.ru

Received on January 15, 2021 / Approved after reviewing on April 20, 2021 / Accepted on April 23, 2021

Abstract. Forest ecosystems play a major role in climate stabilization, and continuous monitoring of their biomass is of paramount importance. Airborne laser scanning technology has become widespread in assessing tree biomass by remote sensing of such inventory indices of trees and stands as crown width and projection area, tree and stand height. The work uses the author's observation database of 1550 model trees of spruce (*Picea L.*) and 535 model trees of fir (*Abies L.*) growing in Eurasia. The database provides information on tree height, crown width and length, as well as biomass of trunk, foliage, branches and roots. It was found that two-factor allometric models of biomass components, including crown width and tree height as independent variables, are the most informative. A positive correlation with crown width and tree height has been identified for all biomass components. Biomass of components of similar-sized fir trees was found to be 45–71 % higher than that of spruce at the statistically reliable level. This is possibly due to the fact that with the same height the crown width of the fir is 11 % less compared to the spruce. The contribution of winter temperatures and precipitation to the variability of biomass components was estimated. The biomass of all components of equal-sized trees is described by a propeller-like 3D dependence. In warm regions, the biomass increases with increasing precipitation; the dependence is characterized

by an opposite or neutral trend with the transition to cold regions. The biomass increases with increasing temperature in humid regions, and decreases with the transition to dry climatic conditions. Inclusion of crown length as an additional independent variable in the allometric model practically did not improve its predictive ability. The contribution of inventory indices of trees, their species, and climatic variables to explaining the variability of biomass components is 72.9, 13.5 and 13.6 %, respectively. Climatic variables explain most of the variability in trunk and above-ground biomass (18 to 20 %), least of all in needles and branches (8 to 9 %). The findings can be useful for laser monitoring of forest biomass and predicting possible changes in tree biomass structure in case of climatic deviations.

Keywords: hydrothermal gradients, biomass components, LiDAR sensing of trees, allometric models, mean January temperature, annual precipitation, spruce, fir

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment FEUZ-2021-0014.

For citation: Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Danilin I.M. Designing a Model of the *Picea L.* and *Abies L.* Biomass for Regional Climatic Conditions in Eurasia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 38–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-38-54>

Введение

Глобальные леса содержат около 80 % углерода всей наземной биомассы, это превышает его содержание в атмосфере [22]. В течение последних двух 10-летий для оценки наземной биомассы интенсивно используется технология активного бортового лазерного зондирования, обеспечивающая получение высокоточной информации о пространственных и темпоральных характеристиках лесов. Появился принципиально новый лазерно-локационный метод съемки лесного полога, позволяющий обрабатывать огромные массивы данных (в сотни гигабайт) лазерного зондирования в режиме реального времени практически одновременно с выполнением измерений, причем не только всего лесного покрова в целом, но и отдельных деревьев [4].

Благодаря способности проникновения лазерного луча сквозь толщу полога данные зондирования, представляющие 3-мерные облака точек, дают подробную 3D-картину структуры леса, позволяют выполнять идентификацию отдельных деревьев, включая нижний ярус, и получать их таксационные характеристики. Точность картирования существенно повышается при совмещении бортового и наземного лазерного сканирования [20].

При использовании дистанционных методов ширина кроны и высота дерева всегда были основными показателями для оценки лесных ресурсов [6]. В ходе исследований по Международной биологической программе для сосны обыкновенной 3 климатических зон Сибири были предложены зависимости биомассы кроны от ее ширины [5]. Хотя методы дистанционного зондирования отдельных деревьев менее разработаны по сравнению с методами традиционной наземной таксации, за последние годы достигнуты существенные успехи в области индивидуального обнаружения деревьев и регистрации формы и структуры кроны (ширина кроны, высота дерева, площадь проекции и объем кроны) на основе новых высокопроизводительных алгоритмов и применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [24].

До недавнего времени при традиционной таксации надземную биомассу оценивали по ее аллометрической зависимости от диаметра ствола на высоте груди (далее – диаметр ствола) [32]. С целью повышения точности оценок биомассы в аллометрическое уравнение стали включать вторую независимую переменную – высоту дерева [10]. Проанализировав мировые данные о надземной биомассе древостоев, М. Cannell [15] установил, что при одних и тех же диаметре ствола и высоте дерева надземная биомасса может быть разной, особую сложность представляют древесные виды с развитой кроной. Тем не менее характеристики кроны только недавно начали включать в структуру аллометрической модели [19].

В тропических лесах на массу кроны приходится почти половина надземной биомассы дерева. Поэтому используемые для тропических лесов аллометрические уравнения, которые включают высоту деревьев, но не учитывают размеров кроны, занижают биомассу деревьев на 11–14 %. При этом ширина кроны может обладать большей способностью объяснять изменчивость надземной биомассы (10,5 %) по сравнению с высотой дерева (6,0 %) [19]. Диаметр ствола в качестве независимой переменной в аллометрической модели для тропических лесов Южной Америки объяснил 87 % изменчивости надземной биомассы деревьев. Включение в модель базисной плотности и ширины кроны в качестве дополнительных независимых переменных повысило коэффициент детерминации до 93 %. Ширина кроны может обладать высокой информативностью не только в тропических лесах, кустарниковых сообществах и редколесьях, но и в бореальных лесах Европы, например, для сосны обыкновенной аллометрия «масса хвои – ширина кроны» деревьев объясняет до 85 % изменчивости биомассы хвои [31].

Ширина кроны применялась при оценке надземной биомассы многоствольных деревьев и кустарников вместо диаметра ствола, поскольку в подобных случаях диаметр ствола оказывался трудно измеряемым и недостаточно информативным. В частности, для саксаульников (*Haloxylon Bunge*), произрастающих в пустынях Средней Азии, были разработаны аллометрические модели связи надземной биомассы с высотой дерева (куста) и шириной кроны [3]:

$$\ln P_{\text{н}} = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – регрессионные коэффициенты; $P_{\text{н}}$ – надземная биомасса дерева, кг; H – высота дерева, м; $D_{\text{кр}}$ – ширина кроны, м.

Позднее по данным надземной биомассы 2635 деревьев саксаула, взятых на 100 пробных площадях в пустынях Казахстана, по формуле (1) рассчитаны модели с коэффициентами детерминации от 0,841 до 0,854, предназначенные как для дистанционной, так и для наземной инвентаризации саксауловых сообществ [7]. Для мангровых (*Aegiceras corniculatum*) лесов Китая, в которых деревья часто представлены многоствольными «кустами», уравнение имеет другую структуру [18]:

$$\ln P_{\text{н}} = a_0 + a_1 \ln(D_{\text{кр}}^2 H) \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации 0,993. Для одноствольных деревьев *Kandelia candel* аналогичное уравнение (2) характеризовалось меньшим коэффициентом детерминации – 0,847 [18].

Первоначально наземная инвентаризация лесов часто проводилась с помощью аллометрических уравнений, включающих в качестве независимых

переменных диаметр ствола и высоту дерева. При переходе к лазерной таксации стали совмещать первые модели с моделями, полученными на основе данных лазерного зондирования. Так, для еловых древостоев (*Picea crassifolia* Kom.) Китая была построена модель

$$D = a_0 + a_1 H + a_2 CPA, \quad (3)$$

где D – диаметр ствола, см; CPA – площадь проекции кроны, м²; $R^2 = 0,514$; стандартная ошибка (SE) – 5,82 [17].

Полученная модель (3) далее совмещена с ранее опубликованными моделями для массы стволов, ветвей, хвои и генеративных органов *Picea crassifolia*. Опубликованные модели имели вид

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D^2 H), \quad (4)$$

где P_i – биомасса i -го компонента, кг.

Модели (3) и (4) являются связанными (рекурсивными), применимыми для оценки компонентов биомассы деревьев ели как при наземной таксации, так и при лазерном зондировании. Значения компонентов биомассы получали путем подстановки модели (3) в модель (4).

В одной из новейших работ [21] было поставлено целью выяснить, можно ли при помощи двух независимых переменных ($D_{кр}$ и H) объяснить значительную долю изменчивости надземной биомассы деревьев, не используя диаметр ствола в качестве независимой переменной. Сформирована база данных о 2395 модельных деревьях 127 семейств, охватывающих все планетарные биомы. Модель (1) сопоставлена по информативности с предложенной авторами [21] моделью, включающей комбинированную переменную ($HD_{кр}$) в качестве независимой переменной:

$$\ln P_n = a_0 + a_1 \ln(HD_{кр}). \quad (5)$$

Установлено, что модель (5) лучше объясняет изменчивость биомассы по сравнению с моделью (1).

Для проверки гипотезы о возможности оценки биомассы деревьев без замера диаметра ствола предложена вспомогательная модель [18]:

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln(HD_{кр}). \quad (6)$$

Затем уравнение (6) подставлено в модель Дж. Чейва [16] для надземной биомассы деревьев тропических лесов, в которой D является одной из независимых переменных. Сопоставлена ошибка этой 2-ступенчатой системы уравнений с ошибкой, полученной по уравнению (5), и сделан вывод в пользу модели (5). Таким образом, авторы получили положительный ответ на вопрос, можно ли при оценке биомассы деревьев не измерять диаметр ствола [21]. Позднее предложен улучшенный вариант модели определения надземной биомассы без замера диаметра ствола с применением технологии БПЛА, в основу которой положена теория пайп-модели [24].

Включение в аллометрические модели биомассы температуры и осадков в качестве дополнительных независимых переменных существенно улучшило точность оценок и дало возможность прогнозирования изменений биомассы при климатических сдвигах [34]. Однако модели были разработаны для надземной биомассы деревьев в целом, без деления ее на компоненты, и не учитывали вклада климатических переменных в ее изменчивость.

Темнохвойные леса бореальной зоны на больших площадях представлены смешанными елово-пихтовыми древостоями: ель (*Picea L.*) и пихта (*Abies L.*) обычно растут совместно с преобладанием того или другого вида. В результате сравнительного исследования биологической продуктивности ельников с примесью пихты (с долей участия ели от 60 до 90 %) и пихтарников с примесью ели (с долей участия пихты от 60 до 90 %) на Среднем Урале (окрестности г. Нижние Серги) не было выявлено статистически значимого различия тех и других в возрастном диапазоне от 20 до 130 лет и выведено общее уравнение для оценки надземной биомассы обеих пород по известному возрасту древостоев с коэффициентом детерминации 0,895 [9].

По данным 303 и 100 пробных площадей соответственно ели и пихты, заложенных на территории Северной Евразии, установлено, что при одних и тех же запасах стволовой древесины надземная и общая биомасса ельников превышает биомассу пихтарников в молодняках на <50 % и в спелом возрасте на <17 % [8]. Затем была сформирована дополненная база данных о биомассе ели и пихты для всей Евразии, включающая соответственно 670 и 255 пробных площадей. Результат сопоставления двух видов оказался прямо противоположным: при одних и тех же запасах стволовой древесины надземная и общая биомасса пихтарников превысила биомассу ельников соответственно на 8–14 % и 7–11 % [29]. Таким образом, на уровне древостоев в одном случае различий двух видов по биомассе нет, в другом биомасса ели превышает биомассу пихты, а в третьем, наоборот, биомасса пихты больше биомассы ели.

Подобная неопределенность имеется и на уровне отдельных деревьев. На основе сформированной базы данных о фитомассе 926 и 109 модельных деревьев соответственно ели и пихты, произрастающих в лесах Евразии, установлено, что у деревьев разного вида, равных возраста и размеров нет статистически значимых различий как по абсолютной величине биомассы, так и по фракционной (компонентной) структуре [11]. Другой результат получен на Среднем Урале. Была определена структура надземной биомассы 34 и 32 модельных деревьев соответственно ели и пихты, взятых в спелых смешанных елово-пихтовых древостоях, и установлено, что надземная биомасса всех компонентов у деревьев ели выше, чем у пихты, при одинаковых размерах деревьев [9]. В обоих случаях размеры кроны не вводились в модели биомассы в качестве независимой переменной, т. к. они не предназначались для дистанционного лазерного зондирования.

Таким образом, как на уровне древостоев, так и на уровне деревьев нет окончательного вывода о наличии или отсутствии различий в структуре биомассы ели и пихты.

В данном исследовании мы ставим перед собой следующие задачи: на основе ранее опубликованных работ выбрать независимые переменные (таксационные показатели деревьев), наиболее подходящие для дистанционного зондирования биомассы деревьев; по сформированной базе данных о биомассе деревьев ели и пихты Евразии выделить структуру модели, которая была бы наиболее информативной при оценке компонентов биомассы; установить наличие/отсутствие статистически значимых различий биомассы деревьев ели и пихты; выяснить, как компоненты биомассы соотносятся с таксационными показателями деревьев и колебаниями температуры и осадков на

территории Евразии; выявить вклад в объяснение изменчивости компонентов биомассы таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных.

Объекты и методы исследования

Для решения поставленных задач мы использовали авторскую базу эмпирических данных о биомассе лесообразующих пород Евразии, содержащую сведения о 15 200 деревьях [28]. Из базы данных отобрана информация о 1550 и 535 модельных деревьях соответственно *Picea* L. и *Abies* L. с замеренными таксационными и биопродукционными параметрами (табл. 1). Род *Picea* L. представлен в основном видами *P. abies* (L.) H. Karst. и *P. obovata* Ledeb., в меньшей мере – видами *P. schrenkiana* F. et M., *P. ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr., *P. koraiensis* Nakai. и *P. purpurea* Mast. Род *Abies* L. – в основном видами *A. sibirica* L. и *A. alba* Mill., в меньшей мере – *A. veitchii* Lindl., *A. holophylla* Maxim. и *A. nephrolepis* Maxim. Обработка экспериментального материала выполнена в программе Statgraphics.

Таблица 1

Статистики анализируемых параметров деревьев ели и пихты
Statistics of analyzed indices of spruce and fir trees

Статистический показатель	Параметры деревьев							
	H	$L_{кр}$	$D_{кр}$	P_c	P_v	P_x	P_n	P_k
<i>Picea</i>								
Mean	13,8	7,9	2,7	136,4	20,4	12,6	168,1	24,8
Min	0,43	0,70	0,25	0,005	0,001	0,004	0,011	0,003
Max	44,8	29,5	10,9	4122,0	1259,6	305,0	5089,0	444,6
SD	9,3	4,6	1,5	337,7	59,3	26,1	413,0	58,3
CV, %	67,6	58,8	55,8	247,6	291,0	206,9	245,7	234,7
n	1415,0	1185,0	963,0	1327,0	1542,0	1549,0	1331,0	403,0
<i>Abies</i>								
Mean	12,8	9,3	3,0	139,1	24,0	16,5	183,4	32,3
Min	0,13	0,39	0,25	0,0002	0,0001	0,0004	0,0006	0,16
Max	32,7	23,8	9,3	2133,0	465,4	1063,8	2468,4	315,3
SD	8,3	4,6	1,8	231,4	48,3	50,0	299,7	55,2
CV, %	65,4	49,1	58,4	166,4	201,1	303,1	163,5	170,6
n	541,0	378,0	302,0	535,0	517,0	517,0	517,0	62,0

Примечание: Mean, Min и Max – соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; H – высота дерева, м; $L_{кр}$, $D_{кр}$ – соответственно длина и диаметр кроны, м; P_c , P_v , P_x , P_n , P_k – соответственно биомасса ствола в коре, ветвей, хвои, надземная биомасса и биомасса корней в абсолютно сухом состоянии, кг.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании анализа работ [3, 18, 21] мы пришли к выводу, что наиболее информативными независимыми переменными при оценке биомассы деревьев путем дистанционного зондирования являются ширина кроны и высота дерева. При этом не требуется замер диаметра ствола. Ответ на 1-й вопрос нашего исследования получен.

Для ответа на 2-й и 3-й вопросы мы рассчитали 4 вида моделей:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2 X; \quad (7)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1[\ln(D_{\text{кр}}^2 H)] + a_2 X; \quad (8)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1[\ln(D_{\text{кр}} H)] + a_2 X; \quad (9)$$

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2(\ln H) + a_3 X. \quad (10)$$

С целью установления различия ели и пихты по биомассе деревьев (или его отсутствия) в моделях (7)–(10) в качестве дополнительной независимой переменной введена бинарная переменная X , которой кодируются данные по ели ($X = 1$) и пихте ($X = 0$). Результаты расчета по моделям показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета по уравнениям (7)–(10)
Calculation results according to equations (7)–(10)

Показатель	Зависимые переменные			
	$\ln P_e$	$\ln P_x$	$\ln P_v$	$\ln P_n$
Модель (7)				
a_0^*	1,5566	0,3707	-0,1774	2,0135
$\ln D_{\text{кр}}$	3,3778	2,3737	2,9892	3,0903
X	-1,1023	-0,7738	-0,6432	-0,9758
adjR ²	0,755	0,752	0,815	0,775
SE	1,22	0,83	0,85	1,05
Модель (8)				
a_0	-0,8331	-0,9166	-1,7638	-0,0295
$\ln(D_{\text{кр}}^2 H)$	1,1386	0,7581	0,9452	1,0291
X	-0,6856	-0,5758	-0,3994	-0,6058
adjR ²	0,912	0,843	0,901	0,916
SE	0,73	0,66	0,62	0,64
Модель (9)				
a_0	-1,6454	-1,3172	-2,2355	-0,7099
$\ln(D_{\text{кр}} H)$	1,6387	1,0691	1,3277	1,4741
X	-0,5298	-0,5045	-0,3130	-0,4699
adjR ²	0,950	0,853	0,905	0,947
SE	0,55	0,64	0,61	0,51
Модель (10)				
a_0	-2,4868	-1,3403	-2,1151	-1,2477
$\ln D_{\text{кр}}$	0,6372	1,0378	1,4914	0,8174
$\ln H$	2,3019	1,0895	1,2215	1,9091
X	-0,3502	-0,5000	-0,3362	-0,3521
adjR ²	0,970	0,853	0,906	0,957
SE	0,42	0,64	0,61	0,46

Примечание: * – свободный член здесь и далее скорректирован на логарифмическое преобразование по G. Baskerville [12]; adjR² – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных.

Коэффициент детерминации показывает, что адекватность сравниваемых моделей последовательно повышается в направлении от (7) к (10) и наибольшей информативностью обладает модель (10). В моделях (8) и (9) переменные вследствие их перемножения жестко связаны между собой и их совместный эффект характеризуется одним общим регрессионным коэффициентом. Скорее всего, ортогональность переменных, введенных в модель (10) по отдельности, обеспечивает большую ее пластичность благодаря тому, что каждая из переменных характеризуется своим регрессионным коэффициентом. Так, мы получили ответ на 2-й вопрос исследования. Необходимо отметить, что сказанное противоречит выводу Т. Jucker с соавторами [21]. Причина может быть в том, что исходные данные [21] взяты по хвойным и лиственным древесным и кустарниковым видам в целом, а не отдельно для каждого вида.

Бинарная переменная X в моделях (7)–(10) значима на уровне $p < 0,001$. Она имеет знак «–». Это означает, что при одной и той же высоте дерева и ширине кроны биомасса всех надземных компонентов у пихты существенно больше, чем у ели. Согласно регрессионным коэффициентам при бинарной переменной X , в наиболее информативной модели (10) биомасса хвои, ветвей, ствола и надземная биомасса у деревьев пихты больше по сравнению с деревьями ели одинаковых размеров соответственно на 65, 40, 42 и 42 %.

По-видимому, в совокупности всех видов в пределах рода *Abies* деревья имеют более узкую крону в сравнении с *Picea*, а поскольку мы сопоставляем ель и пихту при равенстве как высоты дерева, так и ширины кроны, то у деревьев пихты оказывается больше концентрация биомассы. Это предположение подтвердилось после расчета по уравнению связи ширины кроны с высотой дерева для елей и пихт:

$$\ln D_{кр} = -0,4490 + 0,5559(\ln H) + 0,1066X; \text{adj}R^2 = 0,683; \text{SE} = 0,33. \quad (11)$$

Оказалось, что при одинаковой высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % уже, чем у ели, и это различие статистически значимо ($t = 4,8 > t_{999} = 3,29$).

Полученное на трансконтинентальном уровне соотношение биомассы деревьев ели и пихты мы проверили на локальном уровне. Для этого использовали опубликованные фактические данные 28 деревьев ели европейской и пихты белой в елово-пихтовом древостое вблизи г. Галлен в Швейцарских Альпах [14]. Хотя Н. Burger [14] не увидел различий между биомассой кроны у елей и пихт, его вывод не был подтвержден статистическим анализом. Мы обработали данные модельных деревьев Н. Burger методом множественного регрессионного анализа и в диапазоне диаметров ствола от 10 до 30 см получили следующую зависимость:

$$\ln P_{кр} = -2,5560 + 0,6818(\ln CPA) + 1,8858(\ln H) - 0,1184X; \text{adj}R^2 = 0,983; \text{SE} = 0,08, \quad (12)$$

где $P_{кр}$ – биомасса кроны дерева в абсолютно сухом состоянии, кг.

Как и в сопоставлении биомассы ели и пихты на трансконтинентальном уровне, в модели (12) бинарная переменная имеет знак «–», $p < 0,01$. Наш вывод, объясняющий наличие большей биомассы деревьев у пихты, чем у ели, более узкой кроной у первой, подтверждается закономерностью, полученной нами по данным Н. Burger:

$$\ln CPA = -1,5718 + 1,7717(\ln D) - 0,6736(\ln H) + 0,2164X; \text{adj}R^2 = 0,968; \text{SE} = 0,11. \quad (13)$$

Согласно этой закономерности, площадь проекции кроны у одинаковых по размеру деревьев пихты на 24 % меньше, чем у ели.

Для ответа на 4-й вопрос данные о географических координатах модельных деревьев нанесены на карты средней январской температуры (https://store.mapsofworld.com/image/cache/data/map_2014/currents-and-temperature-jan-enlarge-900x700.jpg) и среднегодовых осадков (<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>) [33] (рис. 1 и 2) и одновременно совмещены с таксационными и биопродукционными показателями деревьев в одной общей матрице, которая включена затем в процедуру регрессионного анализа [30]. Отказ от использования средней годовой температуры в пользу средней температуры января был обоснован ранее [30].

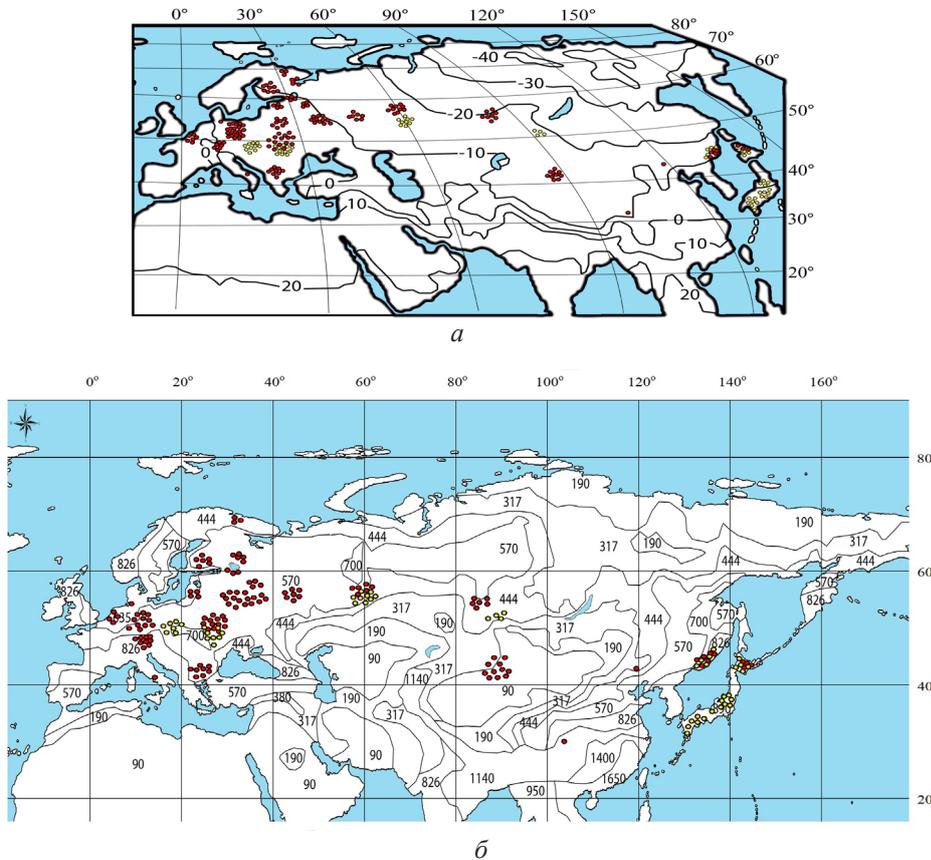


Рис. 1. Распределение фактических данных биомассы 1550 и 535 соответственно еловых (красные кружки) и пихтовых (желтые кружки) модельных деревьев: *a* – на карте январских изотерм, °C; *б* – на карте среднегодовых осадков, мм [33]

Fig. 1. Distribution of the biomass measurement data of 1550 and 535 of spruce (red circles) and fir (yellow circles) model trees, respectively: *a* – map of January isotherms, °C; *b* – map of annual average precipitation, mm [33]

На основе проведенного анализа предложена структура модели, включающая в качестве независимых переменных как морфометрические характеристики деревьев, так и климатические показатели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1(\ln D_{\text{кр}}) + a_2(\ln H) + a_3 X + a_4[\ln(T + 40)] + a_5(\ln PR) + a_6[\ln(T + 40)](\ln P), \quad (14)$$

где T – средняя температура января, °C; PR – среднегодовое количество осадков, мм; $[\ln(T + 40)](\ln PR)$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие температур и осадков.

Поскольку средняя температура января в высоких широтах характеризуется отрицательной величиной, для ее логарифмирования в модели (14) она приведена к виду $(T + 40)$.

Количество фактических данных о биомассе корней ели и пихты соответственно в 3 и 8 раз меньше по сравнению с данными о надземной биомассе (см. табл. 1). Подобная диспропорция характерна для известных баз данных о биомассе деревьев и древостоев [28, 30]. Из 403 деревьев ели с измеренной биомассой корней только у 180 деревьев были измерены длина и ширина кроны, а из 62 деревьев пихты – только у 16. Соответственно в расчет моделей (7)–(10) и (14) для биомассы корней пихты могли войти только 16 деревьев, что не обеспечивает устойчивость модели. По причине недостаточной представленности данных о биомассе корней мы рассчитали по модели (14) относительный показатель, а именно P_k/P_n , и связали оба вида в одной общей модели путем кодирования их бинарной переменной X . Результаты показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета по модели (14)
Calculation results according to model (14)

Показатель	a_0	$\ln D_{кр}$	$\ln H$	X	$\ln(T+40)$	$\ln PR$	$[\ln(T+40)] \times \ln PR$	adjR ²	SE
$\ln P_c$	80,4957	0,7231	2,1980	-0,3844	-24,0290	-13,1746	3,8212	0,973	0,41
$\ln P_x$	20,7811	1,1945	0,9296	-0,5375	-4,7868*	-3,9223	0,8962*	0,859	0,63
$\ln P_b$	25,6569	1,6146	1,1015	-0,3743	-6,7182	-4,6792	1,1580	0,908	0,60
$\ln P_n$	64,8856	0,9295	1,7764	-0,3851	-18,8002	-10,6358	3,0344	0,960	0,44
$\ln P_k/P_n$	0,4556	–	–	-0,1196	-0,5358	–	–	0,104	0,25

*Регрессионные коэффициенты не значимы на уровне $p < 0,05$.

Все регрессионные коэффициенты, представленные в табл. 3, достоверны на уровне $p < 0,001$, за исключением двух для биомассы хвои ($t = 1,2/1,5 < 1,96$). В модели для P_k/P_n оказались значимыми лишь регрессионные коэффициенты при X ($t = 2,4 > t_{0,8} = 2,33$) и при $\ln(T + 40)$ ($t = 6,7 > t_{0,99} = 3,29$).

Геометрическая интерпретация (рис. 2) данных, рассчитанных по (14), для биомассы ели получена путем подстановки в (14) средних значений H и $D_{кр}$ для ели. Здесь нами взята ель, потому что данные по ней по сравнению с пихтой представлены в значительно большем количестве.

Согласно рис. 2, зависимость всех компонентов биомассы одинаковых по размеру деревьев ели от температур и осадков описывается пропеллерообразной 3D-поверхностью. В холодных регионах при увеличении количества осадков биомасса снижается, но по мере перехода к теплым регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса увеличивается, но по мере перехода в сухие условия снижается или не реагирует на изменение температуры. Графики, показанные на рис. 2 для биомассы хвои, ветвей, стволов и надземной биомассы

ели, отличаются от аналогичных графиков для пихты (не показаны) лишь тем, что 3D-поверхности для пихты сдвинуты вверх по оси ординат согласно расчету по (14) соответственно на 71, 45, 47 и 47 %.

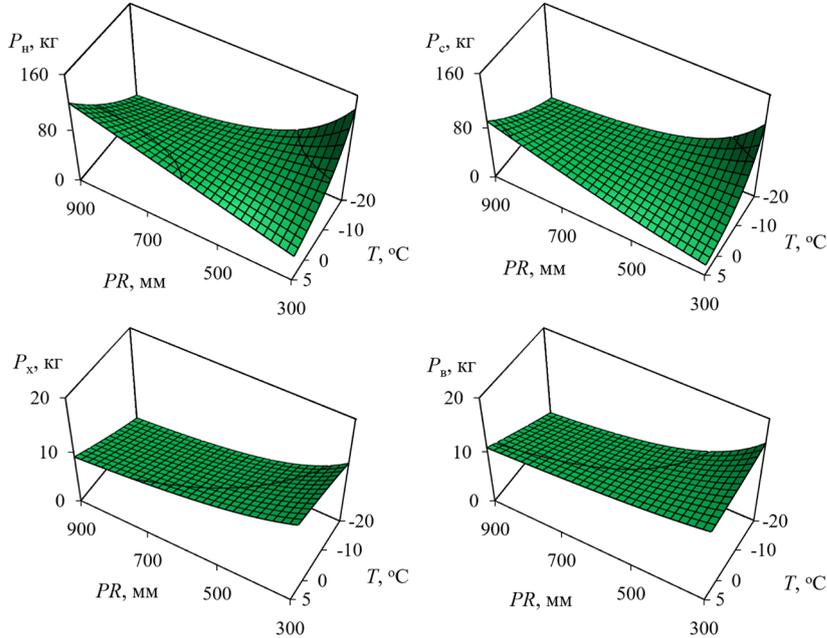


Рис. 2. Связь компонентов биомассы *Picea* L. со средней температурой января и средним количеством осадков

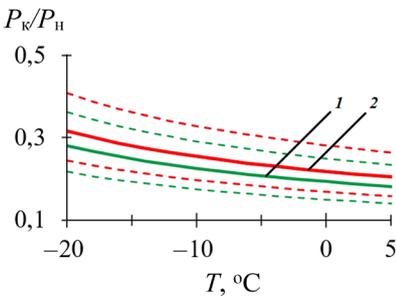
Fig. 2. Relationship of *Picea* L. biomass components with average January temperature and annual average precipitation (PR)

У других древесных видов, в частности двухвойных сосен, дуба и лиственницы, закономерности иногда отличаются по некоторым компонентам от представленных на рис. 2, а иногда противоположны по всем компонентам [30]. Вероятно, это связано с биологическими свойствами древесных видов и особенностями распределения ассимилятов дерева в различные его компоненты: ствол, ветви, хвою и корни [26].

Изменчивость отношения P_k/P_n объясняется независимыми переменными в наименьшей степени (10 %) по сравнению с компонентами надземной биомассы (86–97 %). Графическая интерпретация этой зависимости показана на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость отношения P_k/P_n еловых (1) и пихтовых (2) деревьев от средней температуры января. Сплошными линиями показаны средние значения регрессии, пунктирными – среднеквадратические отклонения

Fig. 3. Dependence of the P_k/P_n ratio (where P_n, P_k – above-ground and root biomass in absolute dry condition, respectively, kg) of spruce (1) and fir (2) trees on the average January temperature. The solid lines show the average regression values; the dotted lines show the standard deviations



Как и в публикации по биомассе двухвойных сосен [30], P_k/P_n еловых и пихтовых деревьев увеличивается по мере роста отрицательных температур января, т. е. в направлении высоких широт.

В результате многофакторного регрессионного анализа получен ответ на 5-й вопрос. В табл. 4 мы видим, что средние вклады таксационных показателей деревьев, видовой принадлежности и климатических переменных в изменчивость компонентов биомассы составляют соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %. Климатические переменные в наибольшей степени объясняют изменчивость биомассы стволов и надземной биомассы (от 18 до 20 %) и в наименьшей степени – хвои и ветвей (от 8 до 9 %).

Таблица 4

Вклад независимых переменных при расчете по модели (14) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %
Contribution of the independent variables of equations calculated according to model (14) for the variability explanation of dependent variables, %

Показатель	Независимые переменные							
	$\ln D_{кр}$	$\ln H$	$\ln D_{кр} + \ln H$	X	$\ln(T+40)$	$\ln PR$	$[\ln(T+40)] \times (\ln PR)$	$\ln(T+40) + \ln PR + [\ln(T+40)] (\ln PR)$
$\ln P_c$	13,9	56,3	70,2	9,8	6,6	6,7	6,7	20,0
$\ln P_x$	35,1	36,5	71,6	20,6	2,2	3,1	2,5	7,8
$\ln P_b$	41,2	37,6	78,8	12,5	2,6	3,3	2,8	8,7
$\ln P_n$	20,1	51,0	71,1	11,0	5,8	6,1	6,0	17,9
$X \pm \sigma$	27,6± ±12,7	45,4± ±9,8	72,9± ±4,0	13,5± ±4,9	4,3± ±2,2	4,8± ±1,9	4,5± ±2,2	13,6± ±6,2

Примечание: $X \pm \sigma$ – среднее значение \pm стандартное отклонение.

При наземном лазерном сканировании древостоя может быть получено значение длины кроны, которое при известном значении высоты дерева характеризует изменение биомассы дерева в связи с его физиологическим состоянием, ценотическим положением в пологе и густотой древостоя. При включении в 2-факторную аллометрическую модель надземной биомассы длины кроны в качестве третьей независимой переменной объяснительная способность модели повысилась с 78 до 84 %, т. е. на 6 % [27]. Мы ввели в модель (14) длину кроны в качестве дополнительной независимой переменной. Оказалось, что включение данного показателя в модель не повышает ее объяснительную способность или повышает на незначительную величину – от 0,4 до 2 %.

Деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля. Эта специфика успешно фиксируется с помощью бортовых лазерных сенсоров. При множественной регистрации отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля и его очертанию можно с точностью 95 % различать сосну, ель и мелколиственные породы. Сосна отличается от березы характерными сгущениями точек, а ель от других пород – формой кроны [23].

Эффективным дистанционным методом зондирования растительности является лазерный мониторинг состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения [2]. В частности, хвоя пихты баль-

замической (*Abies balsamea* (L.) Mill.) по сравнению с елью красной (*Picea rubens* Sarg.) характеризуется повышенными спектральной яркостью (45 % против 30 %) и отражательной способностью, что позволяет различать эти породы при дистанционном зондировании лесного полога [2].

При современных темпах развития лазерной и IT-техники следует ожидать, что в скором времени дистанционно можно будет различать при помощи лидара с низколетающего БПЛА такие внешне похожие виды, как ель и пихта: по спектральной яркости [1] и противоположной ориентации шишек [25]. Наземное лазерное устройство [13] позволит подтвердить данные с лидара по структуре коры ствола (шероховатой у ели и гладкой у пихты).

Выводы

1. При дистанционной оценке биомассы деревьев ширина кроны и высота дерева в аллометрических моделях являются основными независимыми переменными, с высокой точностью регистрируемыми бортовым лазерным сенсором.

2. Наибольшей объяснительной способностью ширина кроны и высота дерева характеризуются при их раздельном введении в аллометрическую модель биомассы в качестве независимых переменных.

3. На основе авторской базы данных о биомассе *Picea* L. и *Abies* L. Евразии установлено, биомасса деревьев пихты с равными шириной кроны и высотой дерева на 45–71 % больше, чем у ели. Это можно объяснить тем, что при одной и той же высоте дерева ширина кроны у пихты на 11 % меньше по сравнению с елью.

4. Введение в аллометрическую модель температуры и осадков в качестве дополнительных независимых переменных показало, что биомасса равных по размеру деревьев описывается пропеллерообразной 3D-зависимостью. В холодных регионах при повышении количества осадков биомасса снижается, по мере перехода к теплым регионам зависимость характеризуется противоположным или нейтральным трендом. С ростом температуры во влажных регионах биомасса увеличивается, по мере перехода в сухие условия постепенно снижается.

5. Средние вклады таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов биомассы составляют соответственно 72,9; 13,5 и 13,6 %.

6. Полученные результаты могут быть полезны при мониторинге биомассы лесов на основе лазерного зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов С.В., Арцыбашев Е.С. Изучение отражательной способности древесных пород // Ботан. журн. 1957. Т. 42, № 4. С. 517–534.

Belov S.V., Artsybashev E.S. Studying the Reflectivity of Wood Species. *Botanicheskii Zhurnal*, 1957, vol. 42, no. 4, pp. 517–534. (In Russ.).

2. Белов М.Л., Фесенко Ю.С., Городничев В.А., Кувшинов А.В. Лазерный мониторинг состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 3. С. 1–17.

Belov M.L., Fesenko Yu.S., Gorodnichev V.A., Kuvshinov A.V. Laser Remote Sensing of Vegetation Cover Using Reflection Coefficients Measurement Data. *Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2016, no. 3, pp. 1–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.7463/rdopt.0316.0840843>

3. Вейсов С., Каплин В.Г. К методике определения надземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах // Проблемы освоения пустынь. 1976. № 1. С. 60–64.

Veyisov S., Kaplin V.G. To the Method of Biomass Estimating in White Saxaul of the Eastern Kara-Kum Desert. *Problems of Desert Development*, 1976, no. 1, pp. 60–64. (In Russ.).

4. Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. 182 с.

Danilin I.M., Medvedev E.M., Melnikov S.R. *Laser Scanning of the Earth and Forests*. Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., 2005. 182 p. (In Russ.).

5. Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Кн. изд-во, 1969. 155 с.

Pozdnyakov L.K., Protoporov V.V., Gorbatenko V.M. *Biological Productivity of Forests in Middle Siberia and Yakutia*. Krasnoyarsk, Knizhnoye Izdatel'stvo, 1969. 155 p. (In Russ.).

6. Самойлович Г.Г. Применение авиации и аэрофотосъемки в лесном хозяйстве. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 476 с.

Samoylovich G.G. *The Use of Aerial Photography and Aviation in Forestry*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 476 p. (In Russ.).

7. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с.

Usoltsev V.A. *Growth and Structure of the Phytomass of Forest Stands*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 253 p. (In Russ.).

8. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.

Usoltsev V.A. *Compiling Forest Biomass Data Banks*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 1998. 541 p. (In Russ.).

9. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 365 с.

Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E. *Biological Productivity of Ural Forests under Conditions of Air Pollutions: An Investigation of a System of Regularities*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2012. 365 p. (In Russ.).

10. Усольцев В.А., Усольцева Р.Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы березы и осины по диаметру и высоте ствола // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1977. № 7. С. 83–89.

Usoltsev V.A., Usoltseva R.F. Results of Approximating Birch and Aspen Aboveground Biomass on the Diameter and Height of a Tree Stem. *Vestnik sel'sko-khozyaystvennoy nauki Kazakhstana*, 1977, iss. 7, pp. 83–89. (In Russ.).

11. Усольцев В.А., Часовских В.П., Норитцин Д.В. Возрастная динамика и структура фитомассы деревьев ели и пихты в лесах Евразии // Эко-потенциал. 2015. № 4(12). С. 11–13.

Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsin D.V. Age Dynamics and Structure of Spruce and Fir Tree Biomass in the Forests of Eurasia. *Eko-potentsial*, 2015, no. 4(12), pp. 11–13. (In Russ.).

12. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>

13. Blanchette D., Fournier R.A., Luther J.E., Côté J.-F. Predicting Wood Fiber Attributes Using Local-Scale Metrics from Terrestrial LiDAR Data: A Case Study of Newfoundland Conifer Species. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 347, pp. 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.013>
14. Burger H. Der Kronenaufbau gleichalteriger Nadelholzbestände. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, 1939, vol. 21, iss. 1, pp. 5–57. (In Ger.).
15. Cannell M.G.R. Woody Biomass of Forest Stands. *Forest Ecology and Management*, 1984, vol. 8, iss. 3-4, pp. 299–312. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90062-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90062-8)
16. Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C. et al. Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees. *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 10, pp. 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
17. Fu L., Liu Q., Sun H., Wang Q., Li Z., Chen E., Pang Y., Song X., Wang G. Development of a System of Compatible Individual Tree Diameter and Aboveground Biomass Prediction Models Using Error-in-Variable Regression and Airborne LiDAR Data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 2, art. 325. <https://doi.org/10.3390/rs10020325>
18. Fu W., Wu Y. Estimation of Aboveground Biomass of Different Mangrove Trees Based on Canopy Diameter and Tree Height. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 10, part C, pp. 2189–2194. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.343>
19. Goodman R.C., Phillips O.L., Baker T.R. The Importance of Crown Dimensions to Improve Tropical Tree Biomass Estimates. *Ecological Applications*, 2014, vol. 24, iss. 4, pp. 680–698. <https://doi.org/10.1890/13-0070.1>
20. Hancock S., Anderson K., Disney M., Gaston K.J. Measurement of Fine-Spatial-Resolution 3D Vegetation Structure with Airborne Waveform Lidar: Calibration and Validation with Voxelised Terrestrial Lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 188, pp. 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.041>
21. Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F. et al. Allometric Equations for Integrating Remote Sensing Imagery into Forest Monitoring Programmes. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, iss. 1, pp. 177–190. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>
22. Kindermann G.E., McCallum I., Fritz S., Obersteiner M. A Global Forest Growing Stock, Biomass and Carbon Map Based on FAO Statistics. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 387–396. <https://doi.org/10.14214/sf.244>
23. Li J., Hu B., Noland T.L. Classification of Tree Species Based on Structural Features Derived from High Density LiDAR Data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, vol. 171-172, pp. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.012>
24. Machimura T., Fujimoto A., Hayashi K., Takagi H., Sugita S. A Novel Tree Biomass Estimation Model Applying the Pipe Model Theory and Adaptable to UAV-Derived Canopy Height Models. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 2, art. 258. <https://doi.org/10.3390/f12020258>
25. Neuville R., Bates J.S., Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 3, art. 352. <https://doi.org/10.3390/rs13030352>
26. 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, iss. 3, pp. 736–749. <https://doi.org/10.1111/nph.13571>
27. Ubuy M.H., Eid T., Bollandsås O.M., Birhane E. Aboveground Biomass Models for Trees and Shrubs of Enclosures in the Drylands of Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 2018, vol. 156, pp. 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.007>

28. Usoltsev V.A. *Single-Tree Biomass Data for Remote Sensing and Ground Measuring of Eurasian Forests*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31984.00001>
29. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Triple Harmonization of Transcontinental Allometric of *Picea* spp. and *Abies* spp. Forest Stand Biomass. *Ecology, Environment and Conservation*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 1966–1972. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36459345> (accessed 23.04.21)
30. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Tsepordey I.S., Ahrari A., Zhang M., Shoaib A.A., Chasovskikh V.P. Are There Differences in the Response of Natural Stand and Plantation Biomass to Changes in Temperature and Precipitation? A Case for Two-Needled Pines in Eurasia. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 331–341. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2020.04.001>
31. Vanninen P., Ylitalo H., Sievänen R., Mäkelä A. Effects of Age and Site Quality on the Distribution of Biomass in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 1996, vol. 10, iss. 4, pp. 231–238. <https://doi.org/10.1007/BF02185674>
32. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. *Science*, 1997, vol. 276, iss. 5309, pp. 122–126. <https://doi.org/10.1126/science.276.5309.122>
33. World Weather Map. *Maps of World*. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather> (accessed 23.04.21)
34. Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual Tree Biomass Equations and Growth Models Sensitive to Climate Variables for *Larix* spp. in China. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, pp. 233–249. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1024-9>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest