

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МЕТА-АНАЛИЗ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БИОМАССЫ БЫСТРОРАСТУЩИХ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД

В.А. Усольцев<sup>1, 2\*</sup>, И.С. Цепордей<sup>1</sup>, А.А. Парамонов<sup>3</sup>,  
С.В. Третьяков<sup>3, 4</sup>, С.В. Коптев<sup>3, 4</sup>, А.А. Карабан<sup>3, 4</sup>,  
И.В. Цветков<sup>3, 4</sup>, А.В. Давыдов<sup>3, 4</sup>, В.П. Часовских<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ботанический сад Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия;

<sup>3</sup> Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Архангельск, Россия;

<sup>4</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия;

<sup>5</sup> Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Эл. почта: \* [Usoltsev50@mail.ru](mailto:Usoltsev50@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 28.12.2022; принята к печати 03.02.2023

Потенциальное истощение ископаемых ресурсов и необходимость стабилизации климата требуют все более широкого использования возобновляемых источников энергии, в частности, путем культивирования быстрорастущих пород, таких как ива (*Salix* L.), тополь (*Populus* L.) и ольха (*Alnus* L.), на микроротационных плантациях. Фактическая биомасса деревьев, определяемая на пробных площадях, редко приводится в научных статьях, а обычно дается в сжатом виде в форме уравнений зависимости биомассы от диаметра ствола и/или высоты дерева. В этой связи, а также из-за высокой трудоемкости получения эмпирических данных на пробных площадях получила распространение разработка обобщающих (generic) моделей биомассы на основе мета-анализа как способа объединения результатов независимых исследований. Целью настоящего исследования было (а) сформировать базу эмпирических данных, а также псевдоданных, восстановленных путем табулирования аллометрических моделей биомассы *Salix*, *Populus* и *Alnus* в известных диапазонах диаметров ствола по имеющимся опубликованным источникам; (б) разработать аллометрические мета-модели надземной биомассы трех названных родов и провести их сравнительный анализ; (в) выполнить анализ смещений при оценке надземной биомассы деревьев посредством мета-моделей относительно исходных данных; (г) разработать модели для оценки фракционного состава биомассы деревьев трех родов по значениям надземной биомассы, полученным по ее мета-моделям. Установлено, что всеобщие мета-модели объясняют около 99% изменчивости надземной биомассы и характеризуются незначительными отклонениями (в среднем около 2%) от исходных значений. Мета-модели биомассы фракций, связанные с мета-моделями надземной биомассы по рекурсивному принципу, объясняют изменчивость массы листвы, ветвей, стволов и корней соответственно на 70–90; 87–95; 99,3–99,7 и 93–99%. Предложенные мета-модели надземной биомассы деревьев могут быть применены в регионах, для которых отсутствуют аллометрические модели биомассы. При введении в модели корректировочного коэффициента, учитывающего форму нижней части ствола, они могут быть использованы для оценки углерод-депонирующей способности не только энергетических плантаций, но и насаждений управляемых лесов по данным таксации. **Ключевые слова:** *Salix* L., *Populus* L., *Alnus* L., фитомасса ствола, всеобщая модель, мета-анализ, регрессионный анализ.

## COMPARATIVE META-ANALYSIS OF ALLOMETRIC MODELS OF FAST-GROWING HARDWOOD BIOMASS

V.A. Usoltsev<sup>1, 2\*</sup>, I.S. Tsepordey<sup>1</sup>, A.A. Paramonov<sup>3</sup>, S.V. Tretyakov<sup>3, 4</sup>, S.V. Koptev<sup>3, 4</sup>,  
A.A. Karaban<sup>3, 4</sup>, I.V. Tsvetkov<sup>3, 4</sup>, A.V. Davydov<sup>3, 4</sup>, V.P. Chasovskikh<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

<sup>2</sup> Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russia;

<sup>3</sup> Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia;

<sup>4</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;

<sup>5</sup> Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

E-mail: \* [Usoltsev50@mail.ru](mailto:Usoltsev50@mail.ru)

The potential depletion of fossil resources and the need to stabilize the climate require an increasing use of renewable energy sources, in particular, through the cultivation of fast-growing species such as willow (*Salix* L.), poplar (*Populus* L.) and alder (*Alnus* L.) on microrotation plantations. The actual biomass of trees determined on sample plots is rarely published in scientific papers and is usually presented as equations of the dependence of biomass on stem diameter and / or tree height. In this regard, as well because it is difficult to obtain empirical data on sample plots, the development of generic models of biomass based on meta-analysis as a way to generalize the results of independent studies has gained popularity. The purpose of the present study was (a) to construct a database of empirical data, as well as pseudo-data recovered by tabulating allometric models of *Salix*, *Populus* and *Alnus* biomass in known ranges of stem diameters according to available published sources; (b) to develop allometric meta-models of the aboveground biomass of the three aforementioned genera and to perform their comparative analysis; (c) to analyze biases in the assessments of the aboveground biomass of trees with meta-models vs. the original data; (d) to develop models for assessing the component composition of tree biomass of the three genera based on the values of aboveground biomass extracted from its meta-models. It is found that the generic meta-models explain about 99% of the variability of aboveground biomass and produce minor deviations (about 2% on average) from the initial values. Meta-models of biomass components associated with meta-models of aboveground biomass based on the recursive principle explain the variability of the mass of foliage, branches, stems and roots by 70-90, 87-95, 99.3-99.7 and 93-99% respectively. The proposed meta-models of aboveground biomass of trees can be applied in regions for which there are no allometric models of biomass. When a correction factor that takes into account the shape of the lower part of tree stem is introduced into the models, they can be used to assess the carbon depositing capacity of not only energy plantations, but also of managed forests using forest mensuration data.

**Keywords:** *Salix* L., *Populus* L., *Alnus* L., stem biomass, generic model, meta-analysis, regression analysis.

Потенциальное истощение ископаемых ресурсов и настоятельная необходимость стабилизации климата требуют все более широкого использования возобновляемых источников энергии [50]. В настоящее время биомасса растений обеспечивает около 10% мировых поставок энергии [81] и в будущем будет важным компонентом первичных источников энергии [24]. Производство возобновляемой энергии осуществляется на микроротационных плантациях быстрорастущих древесных видов с периодом ротации от 2 до 20 лет. Основной акцент сделан на плантациях ивы (*Salix* L.) с наиболее короткой ротацией, но используются и другие лиственные виды, такие как тополь (*Populus* L.), ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) и береза (*Betula* L.) с более длительными ротациями. Основным преимуществом микроротационных плантаций являются высокие урожаи биомассы, обеспечивающие их экономическую эффективность [47].

Возделывание быстрорастущих лиственных видов имеет также существенный экологический эффект [46]. В Германии через 12 лет после посадки клонов ивы и тополя на бывших пахотных землях содержание органического углерода и общего азота в верхнем слое почвы увеличилось соответственно на 4,0 и 0,2 г/кг, при этом рН был значительно ниже под клонами ивы при сравнении с клонами тополя [49]. Названные виды используют также при мелиорации и рекультивации нарушенных земель [2, 54]. Различие видов по почвоулучшающим свойствам было установлено даже в пределах рода, например, на бедных песчаных почвах положительное влияние ольхи зеленой (*Alnus viridis* (Chaix) D.C.) было менее выражено в сравнении с ольхой черной (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) [31].

Помимо изучения почвоулучшающей роли насаждений мелколиственных видов, в России существует проблема оценки их углерод-депонирующей способности на землях, вышедших из-под сельскохозяйст-

венного пользования в 1990-е годы [1, 5, 12]. Экспансия мелколиственных видов наблюдается не только на бывших пахотных землях, но и в связи с изменением климата: осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) замещает березу Черепанова (*Betula pubescens* Ehrh. ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hämet-Ahti в субарктическом экотоне Швеции [80], и происходит активная экспансия ольхи зеленой в высотном экотоне в Альпах [20].

Ива, тополь, ольха серая и береза являются пионерными древесными видами, способными к регенерации от пней и корневых отпрысков и хорошо приспособлены к условиям произрастания, преобладающим в умеренных и бореальных регионах [69]. Сравнительное исследование скорости роста и эффективности превращения солнечной радиации в химическую энергию в условиях Скандинавии показало, что ива достигает годичной продукции 10 т/га в течение 4 лет, а тополь, ольха серая, береза, ель европейская (*Picea obovata* L.) и бук (*Fagus sylvatica* L.) соответственно в течение 7, 10, 17, 25 и 80 лет [33].

Для оценки углерод-депонирующей способности лесов активно разрабатываются аллометрические модели биомассы деревьев, выраженные степенной функцией [55]. Исследовано множество структур подобных моделей, включающих в качестве независимых переменных различные комбинации диаметра ствола, высоты дерева и длины живой кроны, но они практически не повышали точность оценок биомассы по сравнению с аллометрической ее зависимостью от диаметра ствола, имеющей биологическую интерпретацию [59, 60]. Аллометрические модели разработаны по большей части для деревьев среднего и крупного размера, имеющих диаметр ствола на высоте груди более 12–15 см [48, 55, 75]. По мере снижения высоты дерева указанный диаметр смещается в верхнюю часть ствола, становится более изменчивым, а оценка биомассы по соответствующей аллометрической мо-

дели – смещенной [16]. Наименьшей изменчивостью и наибольшей точностью при оценке биомассы характеризуется диаметр на 1/3 высоты ствола [14], совпадающей с положением его центра тяжести [41], но использование его проблематично при перечете деревьев и определении биомассы на единице площади.

С другой стороны, массовое производство микроротационных (энергетических) плантаций стимулировало оценку биомассы деревьев на начальных этапах роста по диаметру у основания ствола ( $D_0$ ) [4, 26, 45, 47, 56, 62]. Поскольку с возрастом дерева у основания ствола формируется корневой наплыв, диаметр у основания ствола становится довольно изменчивым, а его измерение – проблематичным. Поэтому у молодых деревьев на микроротационных плантациях одни исследователи измеряют диаметр у основания ствола  $D_0$ , а другие – на некотором расстоянии от него (от 10 до 50 см) [7, 64]. Поскольку при этом результаты становятся не сопоставимыми, вводятся поправочные коэффициенты для приведения диаметра, измеренного на разных высотах, к величине диаметра  $D_0$ . Для лиственных видов при расстоянии от основания ствола 5, 10, 50 и 130 см предложены коэффициенты соответственно 1,08; 1,16; 1,33 и 1,45 [19].

Экспериментальные данные о биомассе деревьев, полученные на пробных площадях, представлены довольно громоздкими таблицами [18], они редко приводятся в научных статьях, обычно хранятся в архивах исследователей и с их уходом теряются для науки. В большинстве случаев информация о биомассе деревьев дается в сжатом виде в форме аллометрических моделей зависимости биомассы от диаметра ствола и/или высоты дерева, и таких моделей насчитываются уже десятки тысяч [55]. В этих моделях скрыта огромная информация, и игнорирование ее в наступившей эре больших данных (Big Data Era), искусственного интеллекта и нейронных сетей [18, 53] было бы неправомерно. Сегодня предлагается стандартизированный словарь, который позволяет объединять наборы данных о свойствах биологических объектов из разнородных источников и облегчает создание интерфейсов между программными средствами для обработки и анализа таких данных [71], и осознается необходимость систематизации данных о свойствах биологических объектов и управления ими для повторного использования [51].

Наличие упомянутых сводок аллометрических моделей предоставляет возможность выбора той из них, область применения которой наиболее близка к интересующему региону. Однако такие сводки часто являются неполными с точки зрения охвата различных древесных видов в разных экологических условиях, в них могут отсутствовать уравнения для интересующих географических районов или не учитываться различия, касающиеся того или иного фракционного состава биомассы [40].

В этой связи, а также из-за чрезвычайно высокой трудоемкости получения эмпирических данных на пробных площадях получила распространение разработка обобщающих (generic, generalized) моделей биомассы на основе мета-анализа как способа объединения результатов независимых исследований [17, 18, 30, 37, 44, 61, 68]. Мета-моделирование расширяет доступность данных из разных регионов, поскольку при отсутствии исходных данных специфичную для регионов информацию можно извлечь из опубликованных моделей путем генерирования псевдоданных. Аллометрические мета-модели биомассы деревьев могут давать на региональном уровне среднюю ошибку около 8–11% [64] и среднее смещение оценок около 2% [11], что сопоставимо с точностью получения исходных данных на пробных площадях [28]. Тем не менее, сегодня мнения исследователей разделились: одни считают некорректной экстраполяцию обобщенных моделей биомассы на другие регионы [58, 84], другие единодушны в выводе о возможном широком использовании обобщенных уравнений зависимости биомассы лишь от диаметра ствола [39, 63, 73, 74, 76].

Наряду с мета-моделированием биомассы в пределах одного вида предлагаются обобщения более высокого уровня, когда в одной модели объединяются данные по нескольким видам [29, 85]. Подобным обобщающим моделям дается теоретическое обоснование в виде фрактальной модели [83], теории метаболического масштабирования [82] или теории адаптивного распределения масс [66], и модель адресуется всему видовому сообществу той или иной группы. Видоспецифичная мета-модель предпочтительна, когда требуется точная оценка биомассы для того или иного вида [35]. Мета-модели, синтезирующие данные биомассы нескольких древесных видов, могут быть использованы не только для прогнозирования биомассы тех видов, для которых пока нет специальных аллометрических моделей [64], но могут применяться также для оценки биомассы в многовидовых экосистемах крупных регионов [34]. Тем не менее, использование многовидовой мета-модели имеет ограничения, связанные с климатом, местоположением, видовым составом и плотностью древесины, и может привести к существенным смещениям [30].

Варьирование разных фракций биомассы деревьев неоднозначно. Например, массы крон и стволов формируются за различные промежутки времени, варьируют в связи с возрастом дерева с противоположными знаками [13] и при оценке массы всего дерева по его линейному размеру, коррелирующему с возрастом, противоположные знаки изменчивости разных фракций взаимно компенсируются, обеспечивая объясненную изменчивость биомассы дерева в целом на уровне 95% и выше [15, 72]. Поэтому обобщающие модели предлагаются исключительно для наземной биомассы деревьев [29, 38, 82].

В этой связи представляет интерес разработка обобщающих моделей надземной биомассы деревьев быстрорастущих видов посредством мета-анализа как фактических, так и ранее опубликованных и «восстановленных» псевдо-данных биомассы, связанных с диаметром у основания ствола. Назначение подобных моделей – оценка биомассы в микроротационных (энергетических) плантациях быстрорастущих видов, выращиваемых в соответствующих климатических условиях. В то же время известно, что различные фракции биомассы имеют разное содержание элементов питания и разную интенсивность их круговорота [70]. Поэтому, наряду с разработкой всеобщих моделей надземной биомассы деревьев, необходима информация о вкладах разных фракций биомассы в надземную биомассу дерева.

В данном исследовании мы намерены:

- 1) сформировать базу эмпирических данных, а также псевдоданных, восстановленных путем табулирования аллометрических моделей биомассы родов *Salix* L., *Populus* L. и *Alnus* L. в известных диапазонах диаметра ствола по имеющимся опубликованным источникам;
- 2) выполнить сравнительный анализ аллометрических мета-моделей надземной биомассы трех названных родов с целью установить приемлемый уровень обобщения модели: или единой для трех родов, или специфичной для каждого рода в отдельности;
- 3) выполнить анализ смещений при оценке надземной биомассы деревьев посредством мета-моделей относительно исходных данных;
- 4) разработать модели для оценки фракционного состава биомассы деревьев трех родов по значениям надземной биомассы, полученным по ее мета-моделям.

## Материалы и методы исследования

Исходные материалы для нашего мета-анализа представлены как фактическими значениями биомассы, полученными на пробных площадях, так и метаданными (псевдоданными), полученными путем табулирования ранее опубликованных аллометрических моделей биомассы по задаваемым значениям диаметра ствола в известных диапазонах варьирования исходных данных. Их характеристика дана в табл. 1.

Все данные получены на территории зон бореальных и умеренных лесов Евразии и Северной Америки и представлены всем многообразием видового состава родов *Salix*, *Populus* и *Alnus* (табл. 1). Поэтому наш дальнейший анализ биомассы деревьев будет выполнен на уровне трех названных родов. В основном представлены данные о надземной биомассе, реже – о фракционном составе биомассы и исключительно редко – о биомассе корней (табл. 1). Поскольку во

многих источниках были замерены диаметры ствола лишь на высоте груди, для наших моделей был выполнен расчет диаметров у основания по известному диаметру на высоте груди согласно модели, объясняющей 99% изменчивости соответствующей переменной (см. сноску в табл. 1).

Исходные данные надземной биомассы деревьев в связи с диаметрами стволов нами обработаны по программе стандартного регрессионного анализа ([http://www.statgraphics.com/for more information](http://www.statgraphics.com/for%20more%20information)).

## Результаты и их обсуждение

С целью установить приемлемый уровень обобщения моделей, исходные данные, представленные в табл. 1, обработаны согласно структуре модели смешанных эффектов (mixed-effects modelling) [16, 43]:

$$\ln Pa = a_0 + \sum a_i X_i + b \ln D_0, \quad (1)$$

где:  $Pa$  – надземная биомасса дерева, кг;  $D_0$  – численная переменная, а именно, диаметр у основания ствола, см;  $\sum a_i X_i$  – блок фиктивных (индикаторных) переменных в количестве  $(i + 1)$ , кодирующий исследуемые древесные роды согласно схеме (табл. 2). Специфика фиктивных переменных состоит в том, что они «не обладают смыслом собственного существования, а светят отраженным светом глубинных сущностей» [18. С. 213].

Поскольку регрессионный коэффициент  $b$  при переменной  $\ln D_0$  может быть специфичным для каждого рода, в модель ввели комбинированные переменные ( $X_1 \times \ln D_0$ ) и ( $X_2 \times \ln D_0$ ) и в результате расчета получили:

$$\ln Pa = -3,5788 + 2,6112 \ln D_0 + 0,4302 X_1 + 0,1754 X_2 - 0,0977 X_1 \times \ln D_0 - 0,0106 X_2 \times \ln D_0. \quad (2)$$

Оказалось, что в уравнении (2) регрессионные коэффициенты при переменных  $\ln D_0$ ,  $X_1$  и  $X_1 \times \ln D_0$  значимы на уровне  $p < 0,0001$ , при переменной  $X_2$  – на уровне  $p < 0,004$ , а при переменной  $X_2 \times \ln D_0$  – на уровне  $p < 0,62$ . В последнем случае комбинированная переменная статистически не значима ( $t = 0,49 < t_{95} = 1,96$ ). Таким образом, на статистически значимом уровне зависимости биомассы от диаметра ствола различаются для *Salix* и *Populus* по величине свободного члена и регрессионного коэффициента, а для *Salix* и *Alnus* – по величине свободного члена, что исключает возможность построения модели, обобщенной для трех родов.

Поэтому рассчитаны модели (3),

$$\ln Pa = a + b \ln D_0, \quad (3)$$

Они специфичны для каждого рода и объясняют около 99% изменчивости биомассы дерева, что близко к функциональной связи (табл. 3).

Графики распределения остатков моделей (3) свидетельствуют о равномерности их распределения и об отсутствии корреляций (рис. 1).

Согласно фрактальной модели Г. Веста [83], представляющей симбиоз теорий пайп-модели и фракталов, надземная биомасса дерева связана с диаметром ствола при значении регрессионного коэффициента  $b$ , равном  $8/3$ , или  $2,67$ . В результате анализа мировой сводки 279 аллометрических моделей, взятых из 190 источников, было получено значение  $b$ , равное  $2,37$  [87], и результирующая эмпирическая модель давала более точную оценку надземной биомассы при сравнении с теоретической моделью Г. Веста. В на-

ших моделях (3) регрессионные коэффициенты  $b$  варьируют от  $2,53$  до  $2,61$ , то есть в диапазоне между соответствующими значениями теоретической [83] и эмпирической [87] аллометрических моделей.

Хотя полученные мета-модели объясняют 99% варьирования исходных псевдоданных, имеются систематические смещения последних относительно значений биомассы, полученных по мета-моделям (3), при соответствующих стандартных отклонениях (табл. 4). Однако величина смещений в среднем составляет лишь около 2%, и в случаях применения мета-модели при таксации насаждений трех исследуемых родов в регионах ими можно пренебречь.

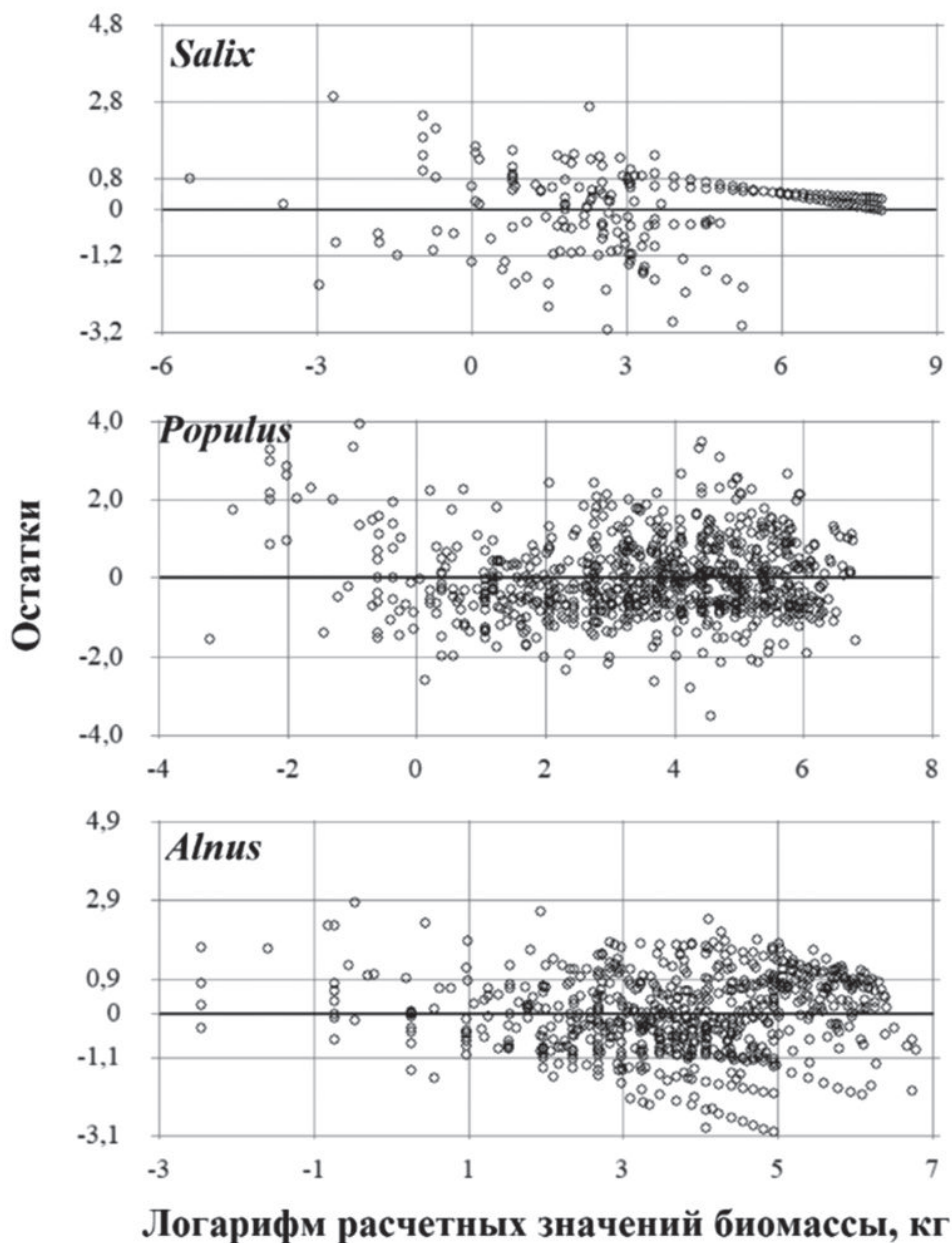


Рис. 1. Распределение остатков моделей (3)

Табл. 1

Характеристика исходных данных по *Salix* L., *Populus* L. и *Alnus* L., включенных в мета-анализ

| Вид                                   | Страна или регион                  | Источник | Форма представления данных | Диапазоны    |           |           |                                 |          |            | Объем исходной выборки |      |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------------|--------------|-----------|-----------|---------------------------------|----------|------------|------------------------|------|
|                                       |                                    |          |                            | биомассы, кг |           |           | диаметра у основания ствола, см |          |            |                        |      |
|                                       |                                    |          |                            | листья       | ветвей    | ствола    | надземной                       | корней   | ствола, см |                        |      |
| <b><i>Salix</i></b>                   |                                    |          |                            |              |           |           |                                 |          |            |                        |      |
| <i>S. carpea, borealis</i>            | Северо-запад России                | [10]     | Фактические                | 0,06–1,1     | 0,18–9,3  | 1,3–20,0  | 1,6–40,3                        | –        | –          | 5,5–19,2               | 52   |
| <i>S. carpea</i>                      | Центр европейской части России     | [79]     | Фактические                | 0,02–4,4     | 0,02–27,8 | 0,09–74,6 | 0,1–102,1                       | 0,03–5,9 | 0,001–0,62 | 1,4–29,1*              | 22   |
| <i>S. carpea</i>                      | Словакия                           | [62]     | Модель                     | 0,002–0,47   | 0,001–1,0 | 1,56      | 0,01–3,1                        | –        | –          | 0,5–7,0                | 8**  |
| <i>S. nigra</i>                       | США                                | [86]     | Модель                     | 0,2–6,5      | 0,40–12,5 | 0,9–109   | 1,3–128,0                       | 0,5–38,0 | –          | 4,1–29,5*              | 8**  |
| <i>S. bebbiana</i>                    | США                                | [65]     | Модель                     | 0,16–4,4     | –         | 1,5–81,1  | 2,03–113,3                      | –        | –          | 5,4–24,8*              | 9**  |
| <i>Salix</i> sp.                      | США                                | [67]     | Модель                     | 0,1–1,0      | 0,20–2,0  | 0,33–8,45 | 0,6–11,5                        | –        | –          | 2,8–10,4*              | 7**  |
| <i>Salix</i> sp.                      | США                                | [36]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,6–1925                        | –        | –          | 2,8–70,4*              | 35** |
| <i>S. nigra</i>                       | США                                | [36]     | Модель                     | –            | –         | –         | 2,7–23,5                        | –        | –          | 5,4–15,3*              | 9**  |
| <i>S. discolor, alba, dasycloides</i> | США                                | [21]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,5–2953                        | –        | –          | 2,8–81,5*              | 35** |
| <b><i>Populus</i></b>                 |                                    |          |                            |              |           |           |                                 |          |            |                        |      |
| <i>P. tremula</i>                     | Европейская часть России           | [79]     | Фактические                | 0,01–12,2    | 0,02–86,1 | 0,1–413   | 0,2–512                         | 1,2–27,2 | –          | 1,4–41,6*              | 81   |
| <i>P. tremula</i>                     | Тургайский прогиб, Казахстан       | [79]     | Фактические                | 0,1–9,6      | 0,3–60,6  | 1,6–269   | 2–422                           | –        | –          | 4,7–39,2*              | 38   |
| <i>P. tremula</i>                     | Казахский мелкосопочник, Казахстан | [79]     | Фактические                | 0,1–17,6     | 0,2–347   | 3,8–486   | 45–830                          | –        | –          | 6,5–54,4*              | 79   |
| <i>P. tremula</i>                     | Западная Сибирь, Россия            | [79]     | Фактические                | 0,03–10,2    | 0,1–94,8  | 0,2–481   | 0,1–572                         | –        | –          | 1,0–42,2*              | 144  |
| <i>P. tremula</i>                     | Средняя Сибирь, РФ                 | [79]     | Фактические                | 0,01–9,7     | 0,01–83,5 | 0,06–500  | 0,2–574                         | –        | –          | 1,2–45,6*              | 92   |
| <i>P. tremula</i>                     | Украина                            | [79]     | Фактические                | 0,04–38,6    | 0,06–275  | 0,1–551   | 0,2–1065                        | –        | –          | 1,6–50,3*              | 257  |
| <i>P. tremuloides</i>                 | США                                | [86]     | Модель                     | 0,1–1,1      | 0,1–2,1   | 0,8–15,8  | 1,0–19,0                        | 0,4–5,3  | –          | 4,1–11,6*              | 25** |
| <i>P. tremula</i>                     | Словакия                           | [62]     | Модель                     | 0,01–0,48    | 0,01–2,6  | 0,02–7,8  | 0,03–10,3                       | 0,01–1,9 | –          | 1,0–9,0                | 9**  |
| <i>P. deltoids</i>                    | Индия                              | [22]     | Модель                     | 0,02–30,0    | 0,3–155   | 0,3–229   | 0,6–409                         | –        | –          | 2,8–34,1*              | 14** |
| <i>P. grandidentata</i>               | США                                | [59]     | Модель                     | 0,01–4,3     | 0,01–10,6 | 0,1–32,0  | 0,1–46,9                        | –        | –          | 1,4–13,5*              | 13** |
| <i>Populus</i> гибрид                 | США                                | [59]     | Модель                     | 0,03–4,2     | 0,03–16,9 | 0,1–29,5  | 0,2–50,6                        | –        | –          | 1,4–17,7*              | 14** |
| <i>P. grandidentata</i>               | Канада                             | [42]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,5–430                         | –        | –          | 2,8–41,1*              | 17** |
| <i>P. tremuloides</i>                 | Канада                             | [42]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,5–126                         | –        | –          | 2,8–24,8*              | 10** |
| <i>P. tremuloides</i>                 | Канада                             | [52]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,4–461                         | –        | –          | 2,8–41,1*              | 17** |
| <i>P. tremuloides</i>                 | США                                | [67]     | Модель                     | –            | –         | –         | 0,4–71,9                        | –        | –          | 2,8–18,9*              | 14** |
| <i>P. tremuloides</i>                 | Канада                             | [27]     | Модель                     | –            | –         | –         | 2,9–386                         | –        | –          | 5,4–38,8*              | 15** |

**Alnus**

| <i>A. incana</i>    | Европейская часть России | [79] | Фактические | 0,05–5,7 | 0,09–26,5 | 1,1–119   | 1,8–151    | 0,5–15,5 | 4,6–27,4*  | 22    |
|---------------------|--------------------------|------|-------------|----------|-----------|-----------|------------|----------|------------|-------|
| <i>A. incana</i>    | Латвия                   | [79] | Фактические | 0,06–6,3 | 0,2–57,3  | 3,2–210   | 3,5–274    | 1,1–76,2 | 6,0–34,3*  | 9     |
| <i>A. glutinosa</i> | Украина                  | [79] | Фактические | 0,1–11,4 | 0,1–93,1  | 0,8–704   | 1,0–740,0  | –        | 3,1–50,3*  | 406   |
| <i>A. glutinosa</i> | Белоруссия               | [79] | Фактические | 0,1–1,3  | 1,4–13,3  | 18,8–146  | 20,3–158,9 | –        | 13,1–26,8* | 30    |
| <i>A. glutinosa</i> | Литва                    | [79] | Фактические | 0,1–8,6  | 0,3–59,6  | 3,5–521   | 3,9–589,0  | –        | 5,4–41,1*  | 31    |
| <i>A. hirsuta</i>   | Приморье, Россия         | [79] | Фактические | 0,6–7,3  | 5,1–41,6  | 21–248    | 26,9–293,0 | –        | 12,5–38,5* | 7     |
| <i>A. inokumae</i>  | Япония                   | [79] | Фактические | 0,6–2,3  | 1,5–4,1   | 3,7–12,8  | 6,1–17,8   | 1,3–1,9  | 7,2–13,4*  | 12    |
| <i>A. rugosa</i>    | США                      | [86] | Модель      | 0,2–0,7  | 0,3–1,7   | 0,8–13,3  | 1,3–15,7   | 0,4–4,4  | 4,1–11,6*  | 11*   |
| <i>A. incana</i>    | Эстония                  | [77] | Модель      | –        | –         | –         | 0,1–167    | –        | 1,4–24,8*  | 20**  |
| <i>A. rugosa</i>    | США                      | [67] | Модель      | 0,1–0,6  | 0,2–1,5   | 0,3–9,8   | 0,6–11,9   | –        | 2,8–10,4*  | 7**   |
| <i>A. sinuata</i>   | Канада                   | [25] | Модель      | –        | –         | –         | 0,5–8,5    | –        | 2,8–9,2*   | 6**   |
| <i>A. rubra</i>     | США                      | [45] | Модель      | 0,01–3,7 | 0,01–11,7 | 0,04–20,4 | 0,1–34,0   | –        | 1,0–15,0   | 15*** |

\* Значения  $D_0$  получены расчетным способом по уравнению  $\ln D_0 = 0,36738 + 0,94932 \ln D_{1,3}$ ;  $R^2 = 0,99$  [32]. \*\* Объем исходной выборки получен путем табулирования модели по задаваемым значениям диаметра ствола в пределах диапазона фактических данных.

**Кодирование трех родов фиктивными переменными**

Табл. 2

| Род            | Фиктивные переменные |       |
|----------------|----------------------|-------|
|                | $X_1$                | $X_2$ |
| <i>Salix</i>   | 0                    | 0     |
| <i>Populus</i> | 1                    | 0     |
| <i>Alnus</i>   | 0                    | 1     |

**Результаты расчета модели (3)**

Табл. 3

| Род            | Показатели |        |                     |
|----------------|------------|--------|---------------------|
|                | $a^*$      | $b$    | $\text{adj}R^2$ SE* |
| <i>Salix</i>   | -3,5614    | 2,6118 | 0,992 0,22          |
| <i>Populus</i> | -3,1550    | 2,5338 | 0,989 0,20          |
| <i>Alnus</i>   | -3,3852    | 2,6012 | 0,985 0,20          |

\* Свободный член здесь и далее скорректирован на логарифмическое преобразование [23];  $\text{adj}R^2$  - коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE - стандартная ошибка уравнения.



Табл. 4

Стандартные отклонения и смещения региональных данных надземной биомассы относительно значений, полученных табулированием мета-модели

| <i>Salix</i>      |             |                  | <i>Populus</i>    |             |                  | <i>Alnus</i>      |             |                  |
|-------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------|------------------|
| Источник и страна | SD*         | Смещение         | Источник и страна | SD          | Смещение         | Источник и страна | SD          | Смещение         |
| [10] РФ           | 24,6        | -5,7 ± 3,4       | [79] РФ           | 11,4        | 5,8 ± 1,8        | [79] РФ           | 15,0        | 21,4 ± 3,2       |
| [79] РФ           | 23,5        | 10,8 ± 5,0       | [79] РФ           | 16,7        | 17,2 ± 1,9       | [79] РФ           | 10,9        | -3,1 ± 3,6       |
| [62] Словакия     | 14,8        | -19,1 ± 5,2      | [79] РФ           | 15,9        | -0,2 ± 1,3       | [79] РФ           | 17,1        | -3,6 ± 0,8       |
| [86] США          | 22,9        | -13,5 ± 8,1      | [79] РФ           | 24,4        | 4,7 ± 2,8        | [79] РФ           | 10,3        | 11,2 ± 1,8       |
| [65] США          | 1,5         | -8,6 ± 0,5       | [79] РФ           | 22,6        | -0,6 ± 2,4       | [79] РФ           | 6,5         | -22,3 ± 1,1      |
| [67] США          | 23,5        | 14,8 ± 8,9       | [79] РФ           | 18,5        | -6,7 ± 1,2       | [79] РФ           | 25,3        | -2,2 ± 9,5       |
| [48] США          | 9,4         | 11,8 ± 1,6       | [86] США          | 21,7        | -7,1 ± 4,9       | [79] РФ           | 19,9        | 18,5 ± 5,7       |
| [36] США          | 18,0        | -10,9 ± 6,0      | [62] Словакия     | 11,6        | 19,4 ± 3,8       | [86] США          | 24,2        | 0,5 ± 13,9       |
| [21] США          | 2,3         | 11,0 ± 0,4       | [22] Индия        | 4,4         | -17,1 ± 1,2      | [77] Эстония      | 22,7        | 22,1 ± 2,3       |
| –                 | –           | –                | [42] Канада       | 2,5         | 16,3 ± 0,6       | [67] США          | 13,5        | 10,2 ± 5,1       |
| –                 | –           | –                | [42] Канада       | 0,5         | 13,6 ± 0,1       | [25] Канада       | 8,5         | 13,2 ± 3,5       |
| –                 | –           | –                | [52] Канада       | 7,4         | 18,9 ± 1,8       | [45] США          | 12,5        | -3,8 ± 3,4       |
| –                 | –           | –                | [67] США          | 12,4        | 16,7 ± 3,3       | [45] США          | 25,7        | 17,1 ± 6,6       |
| –                 | –           | –                | [27] Канада       | 3,8         | 9,9 ± 0,9        | –                 | –           | –                |
| –                 | –           | –                | [59] США          | 7,5         | 9,5 ± 2,1        | –                 | –           | –                |
| –                 | –           | –                | [59] США          | 14,9        | 10,5 ± 4,0       | –                 | –           | –                |
| <b>В целом</b>    | <b>20,5</b> | <b>2,2 ± 1,5</b> | <b>В целом</b>    | <b>19,7</b> | <b>1,7 ± 0,7</b> | <b>В целом</b>    | <b>21,0</b> | <b>2,0 ± 0,8</b> |

\* SD – стандартное отклонение.

Табл. 5

## Характеристика моделей (4)

| Род            | Зависимая переменная* | Регрессионные коэффициенты мета-моделей |          | adjR <sup>2</sup> | SE   |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------------|----------|-------------------|------|
|                |                       | <i>a</i>                                | <i>b</i> |                   |      |
| <i>Salix</i>   | lnP <sub>f</sub>      | -2,0356                                 | 0,6706   | 0,819             | 0,55 |
|                | lnP <sub>b</sub>      | -1,5595                                 | 0,9668   | 0,949             | 0,39 |
|                | lnP <sub>s</sub>      | -0,4554                                 | 1,0616   | 0,993             | 0,15 |
|                | lnP <sub>r</sub>      | -1,2508                                 | 1,0304   | 0,991             | 0,22 |
| <i>Populus</i> | lnP <sub>f</sub>      | -2,4549                                 | 0,7792   | 0,900             | 0,51 |
|                | lnP <sub>b</sub>      | -2,0314                                 | 1,0352   | 0,941             | 0,50 |
|                | lnP <sub>s</sub>      | -0,2457                                 | 1,0095   | 0,996             | 0,12 |
|                | lnP <sub>r</sub>      | -1,4521                                 | 0,9932   | 0,976             | 0,37 |
| <i>Alnus</i>   | lnP <sub>f</sub>      | -1,8819                                 | 0,5980   | 0,704             | 0,55 |
|                | lnP <sub>b</sub>      | -1,8477                                 | 0,8695   | 0,870             | 0,47 |
|                | lnP <sub>s</sub>      | -0,2864                                 | 1,0363   | 0,997             | 0,08 |
|                | lnP <sub>r</sub>      | -1,2545                                 | 0,9405   | 0,929             | 0,30 |

\* P<sub>f</sub>, P<sub>b</sub>, P<sub>s</sub> и P<sub>r</sub> – соответственно биомасса листьев, ветвей, ствола и корней, кг.



Поскольку моделей, характеризующих связь каждой фракции биомассы с диаметром ствола (см. табл. 1), обычно меньше, чем данных надземной биомассы, особенно при ее оценке в энергетических плантациях, модели для фракционного состава мы рассчитали, используя надземную биомассу в качестве независимой переменной. Применен рекурсивный принцип построения цепочки двух связанных моделей [78], первое звено которой представлено моделями (3), а второе рассчитано по данным табл. 1 и имеет общий вид:

$$\ln(P_i) = a + b \ln Pa. \quad (4)$$

Характеристика полученных расчетом моделей (4) дана в табл. 5.

Расчетные значения фракций биомассы в связи с диаметром ствола у его основания можно получить последовательным табулированием рекурсивной системы моделей: вначале табулируются модели (3) по задаваемым значениям  $D_0$ , а затем табулируется модель (4) по расчетным значениям надземной биомассы. Как и в результатах других авторов [57], коэффициент детерминации для массы листвы оказался ниже по срав-

нению с коэффициентами для остальных фракций. Причина в том, что ассимиляционный аппарат более чутко реагирует на изменение внешних условий при сравнении с другими фракциями биомассы [9], что обуславливает повышенный информационный «шум».

Графическая интерпретация мета-моделей фракционного состава биомассы (см. табл. 5) на фоне исходных данных, наглядно подтверждающая их высокую адекватность, показана на рис. 2.

Мета-модели (3) и (4) могут быть совмещены с традиционными таксационными нормативами, ориентированными на оценку биомассы и углерод-депонирующей способности трех исследованных родов по диаметру ствола на высоте груди. Для этого можно ввести поправочный коэффициент по соотношениям  $D_{1,3} = 0,69D_0$  [19] или  $\ln D_{1,3} = -0,35031 + 1,03991 \ln D_0$  ( $R^2 = 0,99$ ) [32]. В случае необходимости обеспечения повышенной точности при использовании мета-модели может быть выведено соотношение  $D_{1,3}$  и  $D_0$ , учитывающее региональные особенности формы нижней части стволов деревьев [3, 8, 62].

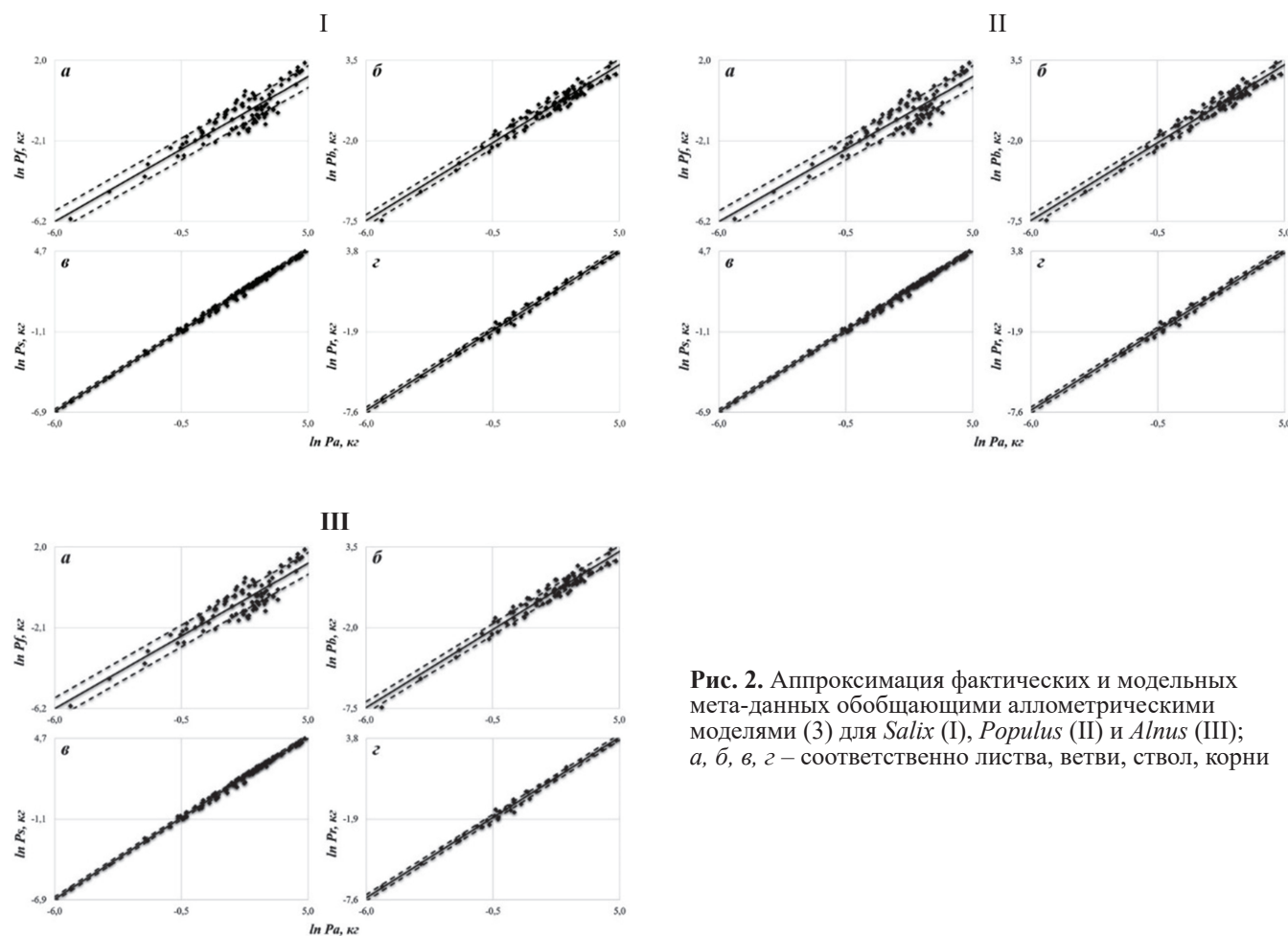


Рис. 2. Аппроксимация фактических и модельных мета-данных обобщающими аллометрическими моделями (3) для *Salix* (I), *Populus* (II) и *Alnus* (III); а, б, в, г – соответственно листва, ветви, ствол, корни

## Заключение

Таким образом, на основе эмпирических данных о биомассе деревьев и восстановленных псевдоданных (мета-данных), полученных путем табулирования опубликованных моделей биомассы, построены мета-модели, предназначенные для оценки биомассы деревьев быстро растущих мелколиственных родов (*Salix L.*, *Populus L.*, *Alnus L.*) в миниротационных (энергетических) плантациях по известному диаметру ствола у его основания.

Предложенные мета-модели объясняют около 99% изменчивости надземной биомассы и характеризуются незначительными смещениями (в среднем около 2%) от исходных значений. Мета-модели биомассы фракций, связанные с мета-моделями надземной биомассы по рекурсивному принципу, объясняют изменчивость массы листьев, ветвей, стволов и корней соответственно на 70–90; 87–95; 99,3–99,7 и 93–99%.

Предложенные мета-модели надземной биомассы деревьев могут быть применены в регионах, для которых отсутствуют локальные фактические данные и аллометрические модели биомассы, при этом с учетом возможных неопределенностей, вызванных неучтенными местными особенностями местопроизрастаний. При введении в модели корректировочного коэффициента, учитывающего форму нижней части

ствола, они могут быть использованы также для оценки углерод-депонирующей способности не только энергетических плантаций, но и насаждений управляемых лесов по данным таксации. Нужно иметь в виду, что только на совокупности объектов в пределах того или иного региона возможные смещения могут быть ограничены величиной 2% вследствие компенсации положительных и отрицательных локальных смещений биомассы.

Поскольку при отборе результатов предыдущих исследований для включения их в мета-модель и при формировании псевдо-выборок нами не использованы методы формализации процесса [18], полученные результаты, по-видимому, потребуют последующего уточнения.

*Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственных заданий ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства, регистрационный номер тем АААА-А18-118030290042-6, 1022040100465-9-4.1.2; конкурса научных проектов «Молодые ученые Поморья» по гранту № 01Ф-02-08/558, а также в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.*

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Балашкевич ЮА. Заращение бывших сельскохозяйственных земель древесной растительностью. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006;13:4-6.
2. Баранник ЛП. Экологическая пригодность древесных и кустарниковых пород для лесной рекультивации в Кузбассе. В кн.: Трофимов СС, ред. Восстановление техногенных ландшафтов Сибири. Новосибирск: Наука; 1977. С. 120-38.
3. Вайс АА. Форма нижней части стволов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) и возраст деревьев в условиях Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного района. Вестн Алтайск гос аграрн ун-та. 2013;110(12):61-4.
4. Горобец АИ, Лихацкий ЮП. Влияние почвенно-гидрологических условий на продуктивность микроротационной плантации ивы корзиночной. Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016;4:98-108.
5. Гульбе ЯИ. Динамика биологической продуктивности южнотаяжных древостоев ольхи серой (на примере Ярославской области): Автореф. канд. дисс. М.; 2012.
6. Дрейпер Н, Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика; 1973.
7. Логинова ЛА. Продуктивность и энергетический потенциал ивовых ценозов на примере Воронежской области. Автореф. канд. дисс. Воронеж; 2010.
8. Марцинковский ЛА. О зависимости между диаметрами деревьев лиственницы на высоте пня и на высоте груди. В кн.: Лиственница: Сборник научных трудов. Красноярск: СТИ; 1964. С. 15-7.
9. Мякушко ВК, Вольвач ФВ, Плюта ПГ. Экология сосновых лесов. Киев: Урожай; 1989.
10. Парамонов АА, Усольцев ВА, Третьяков СВ и др. Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области. Леса России и хозяйство в них. 2022; 4:10-19.
11. Парамонов АА, Усольцев ВА, Третьяков СВ и др. Всеобщие модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix L.*): мета-анализ. Лесной журнал. 2023. (В печати).

12. Перепечина ЮИ, Глушенков ОИ, Корсиков РС. Оценка лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения в Брянской области. Лесотехнический журнал. 2015;1:74-84.
13. Усольцев ВА. Вес кроны березы и осины в насаждениях Северного Казахстана. Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1972;4:77-80.
14. Усольцев ВА. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та; 1985. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).
15. Усольцев ВА. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука; 1988. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).
16. Усольцев ВА, Колчин КВ, Воронов МП. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea L.*). Эко-потенциал. 2017;17(1):22-39.
17. Усольцев ВА, Шубаири СОР, Дар ДА и др. Проблемы оценки биопродуктивности лесов в аспекте биогеографии: мета-анализ как способ обобщения результатов независимых исследований. Эко-потенциал. 2017; 20(4):10-34. ([https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7016/1/ek-4-17\\_03.pdf](https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/7016/1/ek-4-17_03.pdf)).
18. Шитиков ВК, Розенберг ГС, Крамаренко СС, Якимов ВН. Современные подходы к статистическому анализу экспериментальных данных. В кн.: Розенберг ГС, Гелашвили ДБ, ред. Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений). Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна, 2008. С. 212-50.
4. Gorobets AI, Likhatsky YuP. [The influence of soil-hydrological conditions on the productivity of micro-rotational plantation of basket willow]. Trudy Sankt-Peterburgskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Lesnogo Khozyaystva. 2016;4:98-108. (In Russ.)
5. Gulbe YaI. [Dynamics of Biological Productivity of Southern Taiga Stands of Gray Alder in Yaroslavl Region]. PhD Theses. Moscow; 2012. (In Russ.)
6. Draper N, Smith G. Applied Regression Analysis. New York: Wiley, 1966.
7. Loginova LA. [Productivity and Energy Potential of Willow Cenoses in Voronezh Region]. PhD Theses. Voronezh; 2010. (In Russ.)
8. Martsinkovsky LA. [On the relationship between the diameters of larch trees at the height of the stump and at the breast height]. In: Listvennitsa: Sbornik Nauchnykh Trudov. Krasnoyarsk: 1964. P. 15-7. (In Russ.)
9. Miakushko VK, Volvach FV, Pliuta PG. Ekologiya Sosnovykh Lesov. [Ecology of Pine Forests]. Kiev: Urozhay; 1989. (In Russ.)
10. Paramonov AA, Usoltsev VA, Tretyakov SV et al. [Willow tree biomass and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk Region]. Lesa Rossii i Khozyaystvo v Nikh. 2022;4:10-19. (In Russ.)
11. Paramonov AA, Usoltsev VA, Tretyakov SV et al. [Generic models of willow (genus *Salix L.*) tree biomass: A meta-analysis]. Lesnoy Zhurnal. 2023. In press. (In Russ.)
12. Perepechina YuI, Glushenkov OI, Korsikov RS. [Assessment of forests located on agricultural lands in Bryansk Region]. Lesotekhnicheskii Zhurnal. 2015;1:74-84. (In Russ.)
13. Usoltsev VA. [Weight of birch and aspen crowns in forests of Northern Kazakhstan]. Vestnik Selskokhozyaystvennoy Nauki Kazakhstana. 1972;4:77-80. (In Russ.)

#### Общий список литературы/Reference List

1. Balashkevich YuA. [Overgrowing of former agricultural lands with woody vegetation]. Aktualnye Problemy Lesnogo Kompleksa. 2006;13:4-6. (In Russ.)
2. Barannik LP. [Ecological suitability of tree and shrub species for forest recultivation in Kuzbass]. In: Trofimov SS, ed. Vosstanovleniye Tekhnogennykh Landshaftov Sibiri. [Restoration of Technogenic Landscapes of Siberia]. Novosibirsk: Nauka; 1977. P. 120-38. (In Russ.)
3. Weiss AA. [The shape of the lower part of the trunks of the common pine (*Pinus sylvestris L.*) and the age of trees in the conditions of the West Siberian subtaiga-forest-steppe region]. Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2013;110(12):61-4. (In Russ.)
4. Usoltsev VA. Modelirovaniye Struktury i Dinamiki Fitomassy Drevostoyev. [Modeling of the Structure and Dynamics of Stand Biomass]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University; 1985. (In Russ.)
5. Usoltsev VA. Rost i Struktura Fitomassy Drevostoyev. [Growth and Structure of Tree Stands Biomass]. Novosibirsk: Nauka; 1988. (In Russ.)
6. Usoltsev VA, Kolchin KV, Voronov MP. [Dummy variables and biases of generic allometric models in the local assessment of tree biomass (as exemplified with *Picea L.*)]. Eco-potential. 2017;17(1):22-39. (In Russ.)
7. Usoltsev VA, Shubairi SOR, Dar A et al. [Problems of forest bioproductivity assessment in the aspect of biogeography: a meta-analysis as a way

- to generalize the results of independent researches]. Eco-potential. 2017;20(4):10-34. (In Russ.)
18. Shitikov VK, Rosenberg GS, Kramarenko SS, Yakimov VN. [Modern approaches to statistical analysis of experimental data]. In: Rosenberg GS, Gelashvili DB, eds. Problemy Ekologicheskogo Eksperimenta (Planirovanie i Analiz Nabliudeniya). [Problems of Ecological Experiment (Planning and Analysis of Observations)]. Togliatti: Institute of Ecology of the Volga Basin; 2008 P. 212-50. (In Russ.)
  19. Annighöfer P, Ameztegui A, Ammer Ch et al. Species-specific and generic biomass equations for seedlings and saplings of European tree species. Eur J For Res. 2016;135:313-29.
  20. Anthelme F, Grossi J-L, Brun J-J, Didier L. Consequences of green alder expansion on vegetation changes and arthropod communities removal in the northern French Alps. For Ecol Manag. 2001;145:57-65.
  21. Arevalo CBM, Volk TA, Bevilacqua E, Abrahamson L. Development and validation of aboveground biomass estimations for four *Salix* clones in central New York. Biomass Bioenergy. 2007;31:1-12.
  22. Arora G, Chaturvedi S, Kaushal R et al. Growth, biomass, carbon stocks, and sequestration in an age series of *Populus deltoides* plantations in Tarai region of central Himalaya. Turk J Agric For. 2014;38:550-60.
  23. Baskerville GL. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Can J Forest Res. 1972;2(1):49-53.
  24. Berndes G, Hoogwijk M, van den Broek R. The contribution of biomass in the future global energy system: A review of 17 studies. Biomass Bioenergy. 2003; 25:1-28.
  25. Binkley D, Lousier JD, Cromack K Jr. Ecosystem effects of Sitka alder in a Douglas-fir plantation. Forest Sci. 1984;30(1):26-35.
  26. Blujdea V, Pili R, Dutca I et al. Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. Forest Ecol Manag. 2012;264:172-84.
  27. Campbell JS, Lieffers VJ, Pielou EC. Regression equations for estimating single tree biomass of trembling aspen: assessing their applicability to more than one population. Forest Ecol Manag. 1985;11:283-95.
  28. Chave J, Condit R, Aguilar S et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Phil Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2004;359:409-20.
  29. Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Glob Chang Biol. 2014;20:3177-90.
  30. Chen J, Fang X, Wu A et al. Allometric equations for estimating biomass of natural shrubs and young trees of subtropical forests. New Forest. 2023 <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09963-z>.
  31. Chodak M, Sroka K, Woś B, Pietrzykowski M. Effect of green alder (*Alnus viridis*) and black alder (*Alnus glutinosa*) on chemical and microbial properties of sandy mine soils. Geoderma. 2019;356(3):113924.
  32. Chojnacky DC, Heath LS, Jenkins JC. Updated generalized biomass equations for North American tree species. Forestry. 2014;87:129-51.
  33. Christersson L, Sennerby-Forsse L, Zsuffa L. The role and significance of woody biomass plantations in Swedish agriculture. Forest Chron. 1993;69(6):687-93.
  34. Cole TG, Ewel JJ. Allometric equations for four valuable tropical tree species. Forest Ecol Manag. 2006;229(1-3):351-60.
  35. Conti G, Gorné L, Zeballos S et al. Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. Glob Ecol Biogeogr. 2019;28(7):961-75.
  36. Dahal B, Poudel KP, Renninger HJ et al. Aboveground biomass equations for black willow (*Salix nigra* Marsh.) and eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh.). Trees Forests People. 2022;7:e100195.
  37. De-Miguel S, Mehtätalo L, Durkaya A. Developing generalized, calibratable, mixed-effects meta-models for large-scale biomass prediction. Can J Forest Res. 2014;44:648-56.
  38. Enquist BJ, Niklas KJ. Invariant scaling relations across tree-dominated communities. Nature. 2001;410:655-60.
  39. Feller MC. Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia. Bioresour Technol. 1992;39:9-16.
  40. Forrester DI, Tachauer IHH, Annighöfer P et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. Forest Ecol Manag. 2017;396:160-75.
  41. Forslund RR. A geometrical tree volume based on the location of the centre of gravity of the bole. Can J Forest Res. 1982;6(4):441-7.
  42. Freedman B, Duinker PN, Barclay H et al. Forest biomass and nutrient studies in central Nova Scotia. Maritimes Forest Research Centre, Can Forest Serv, Dep Environ Inf Rep M-X-134; 1982.
  43. Fu LY, Zeng WS, Tang SZ et al. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China. J Forest Sci. 2012;58(3):101-5.
  44. Glass GV. Primary, secondary and meta-analysis of research. Educ Res. 1976;5(10):3-8.
  45. Helgersson OT, Cromack K, Stafford S et al. Equations for estimating aboveground components of young Douglas-fir and red alder in a coastal

- Oregon plantation. *Can J Forest Res.* 1988;18: 1082-5.
46. Huss-Danell K, Lundniark J-E. Growth of nitrogen-fixing *Alnus incana* and *Lupinus* spp. for restoration of degenerated forest soil in northern Sweden. *Stud Forest Suec.* 1987;181:1-20.
  47. Hytönen J, Saarsalmi A. Biomass production of coppiced grey alder and the effect of fertilization. *Silva Fenn.* 2015;49(1):1260.
  48. Jenkins JC, Chojnacky DC, Heath LS, Birdsey RA. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Sci.* 2003;49:12-35.
  49. Kahle P, Hildebrand E, Baum C, Boelcke B. Long-term effects of short rotation forestry with willows and poplar on soil properties. *Arch Agron Soil Sci.* 2007;53(6):673-82.
  50. Kauter D, Lewandowski I, Claupein W. Pappeln in kurzumtriebswirtschaft: eigenschaften und qualitätsmanagement bei der festbrennstoffbereitstellung – ein überblick. *Pflanzenbauwissenschaften.* 2001;5:64-74.
  51. Keller A, Ankenbrand MJ, Bruelheide H et al. Ten (mostly) simple rules to future-proof trait data in ecological and evolutionary sciences. *Methods Ecol Evol.* 2022. doi: 10.1111/2041-210X.14033.
  52. Ker MF. Tree biomass equations for ten major species in Cumberland County, Nova Scotia. Information Report, Maritimes Forest Research Centre, Canada. No. M-X-108;1980.
  53. Kudyba S, ed. Big Data, Mining, and Analytics. Components of Strategic Decision Making. Boca Raton: CRC Press; 2014.
  54. Kuznetsova T, Rosenvald K, Ostonen I et al. Survival of black alder (*Alnus glutinosa* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in a reclaimed oil shale mining area. *Ecol Eng.* 2010; 36:495-502.
  55. Luo Y, Wang X, Ouyang Z et al. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth Syst Sci Data.* 2020;12(1):21-40.
  56. Mleczek M, Rutkowski P, Rissmann I et al. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass Bioenergy.* 2010;34:1410-18.
  57. Muukkonen P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *Eur J Forest Res.* 2007;126:157-66.
  58. Muukkonen P, Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum. *Silva Fenn.* 2006;40(4):763-73.
  59. Nelson AS, Weiskittel AR, Wagner RG, Saunders MR. Development and evaluation of aboveground small tree biomass models for naturally regenerated and planted species in eastern Maine, U.S.A. *Biomass Bioenergy.* 2014;68:215-27.
  60. Niklas KJ. Plant allometry: the scaling of form and process. Chicago, IL. The University of Chicago Press; 1994.
  61. Ounban W, Puangchit L, Diloksumpun S. Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn. f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. plantations in Thailand. *J Agric Nat Resour.* 2016;50:48e53.
  62. Pajtík J, Konôpka B, Šebeň V. Mathematical biomass models for young individuals of forest tree species in the region of the Western Carpathians. Zvolen: National Forest Centre; 2018.
  63. Pastor J, Aber JD, Melillo JM. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some Northeast tree species. *For Ecol Manag.* 1984;7:265-74.
  64. Paul KI, Roxburgh SH, England JR et al. Development and testing of allometric equations for estimating aboveground biomass of mixed-species environmental plantings. *Forest Ecol Manag.* 2013;310:483-94.
  65. Perala DA, Alban DH. Allometric biomass estimators for aspen-dominated ecosystems in the upper Great Lakes. USDA Forest Service. North Central Forest Experiment Station. Res. Paper NC-314; 1993.
  66. Poorter H, Jagodzinski AM, Ruiz-Peinado R et al. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytol.* 2015;208(3):736-49.
  67. Ribe JH. Puckerbrush weight tables. Miscellaneous Report 152. Life Sciences and Agricultural Experiment Station; University of Maine. Orono, ME; 1973.
  68. Rojas-García F, De Jong BHJ, Martínez-Zurimendi P, Paz-Pellat F. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Ann For Sci.* 2015;72:835-64.
  69. Rytter L. Grey alder in forestry. A review. *Norw J Agric Sci. Suppl.* 1996;24:65-84.
  70. Scarascia-Mugnozza G, Bauer GA, Persson H et al. Tree biomass, growth and nutrient pools. In: E.-D. Schulze, ed. Carbon and Nutrient Cycling in European Forest Ecosystems. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag; 2000. P. 49-62.
  71. Schneider FD, Fichtmueller D, Gossner MM et al. Towards an ecological trait-data standard. *Meth Ecol Evol.* 2019;10:2006-19.
  72. Shaiek O, Loustau D, Trichet P et al. Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. *Ann For Sci.* 2011;68:443-52.
  73. Singh T. Generalizing biomass equations for the boreal forest region of west-central Canada. *Forest Ecol Manag.* 1986;17:97-107.

74. Son Y, Hwang JW, Kim ZS et al. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea. *Bioresour Technol.* 2001;78:251-5.
75. Ter-Mikaelian MT, Korzukhin MD. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecol Manage.* 1997;97:1-24.
76. Tritton LM, Hornbeck JW. Biomass estimation for northeastern forests. *Bull Ecol Soc Amer.* 1981;62:106-7.
77. Uri V, Lõhmus K, Kiviste A, Aosaar J. The dynamics of biomass production in relation to foliar and root traits in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forestry.* 2009;82(1):61-74.
78. Usoltsev VA. Mensuration of forest biomass: Modernization of standard base of forest inventory. In: XIX World Congress Proceedings, IUFRO, Division 4. Canada, Montreal; 1990. P. 79-92.
79. Usoltsev VA. Single-Tree Biomass Data for Remote Sensing and Ground Measuring of Eurasian Forests: Digital Version. 2<sup>nd</sup> ed. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS; 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>.
80. Van Bogaert R, Jonasson C, De Dapper M, Callaghan TV. Range expansion of thermophilic aspen (*Populus tremula* L.) in the Swedish Subarctic. *Arct Antarct Alp Res.* 2010;42:362-75.
81. Volk TA, Verwijst T, Tharakan PJ et al. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Front Ecol Environ.* 2004;2(8):411-8.
82. West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science.* 1997;276:122-6.
83. West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the structure and allometry of plant vascular system. *Nature.* 1999;400:664-7.
84. Wirth C, Schumacher J, Schulze E-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.* 2004;24:121-39.
85. Xiang WH, Zhou J, Ouyang S et al. Species specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China. *Eur J Forest Res.* 2016;135:963-79.
86. Young HE, Ribe JH, Wainwright K. Weight tables for tree and shrub species in Maine. *Life Sciences & Agriculture Experiment Station Miscellaneous Report 230*; 1980.
87. Zianis D, Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecol Manag.* 2004;187:311-32.

