

Научная статья

УДК 630*5/6

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-64-75

Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix* L.): мета-анализ

*А.А. Парамонов*¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

В.А. Усольцев^{2,4}, 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>

С.В. Третьяков^{1,3}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

И.В. Цветков^{1,3}, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAU-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

*И.С. Цепордей*⁴, 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>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

⁴Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.22 / Одобрена после рецензирования 23.02.23 / Принята к печати 26.02.23

Аннотация. Изменение климата оказывает негативное воздействие на окружающую среду, в т. ч. на лесные экосистемы. Однако леса не только являются пассивными объектами, на которые направлено влияние изменения климата, но и благодаря своей способности поглощать и накапливать углерод могут сами существенно воздействовать на этот процесс. Связывание углерода лесными экосистемами играет важную роль в смягчении последствий изменения климата. Поэтому необходимо знание о количестве углерода, запасенного в лесной фитомассе, и все более актуальным становится точное определение фитомассы лесных деревьев. Вследствие поглощения углекислого газа в процессе роста растений и его высвобождения при сжигании древесины лес является источником углеродно-нейтральной энергии. Идея использования фитомассы в качестве источника энергии для замены ископаемого топлива наиболее перспективна в отношении быстрорастущих пород. К ним относятся ивы (род *Salix* L.), произрастающие в Европе, Азии, Америке и Африке и встречающиеся от тундры до тропиков. Ива успешно применяется как топливо во многих странах, она показывает превосходные рост и продуктивность даже на ювенильных стадиях и при определенных климатических условиях среди древесных растений характеризуется самой высокой способностью преобразовывать солнечное излучение в фитомассу. Короткоротационные план-

тации ив представляют собой экологически перспективный энергетический ресурс для снижения уровня парниковых газов. Поскольку разработка моделей фитомассы – трудоемкий процесс, применяются так называемые обобщенные мета-модели. Цель настоящего исследования состоит в построении обобщенных моделей надземной фитомассы и фитомассы фракций (листва, ветви, ствол, корни) деревьев ивы на основе мета-анализа данных. В ходе работы построены модели для оценки надземной фитомассы деревьев как по диаметру у основания ствола, так и по диаметру на высоте груди, информативность которых близка к функциональной, а смещения составляют лишь около 2 %. Поскольку каждая фракция фитомассы обладает специфичной углероддепонирующей способностью и вносит разный вклад в углеродный баланс, разработаны обобщенные модели для оценки массы листвы, ветвей, стволов и корней в связи с надземной фитомассой деревьев, объясняющие от 82 % (для листвы) до 99 % (для стволов и корней) общей изменчивости фитомассы.

Ключевые слова: *Salix* L., фитомасса ствола, надземная фитомасса, фитомасса фракций, обобщенная модель, мета-анализ, регрессионный анализ

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы – 123022800113-9).

Для цитирования: Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Цветков И.В., Цепордей И.С. Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix* L.): мета-анализ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 64–75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-64-75>

Original article

Generic Models of Willow (genus *Salix* L.) Tree Phytomass: a Meta-Analysis

*Andrey A. Paramonov*¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Vladimir A. Usoltsev^{2,4}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

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

Sergey V. Tretyakov^{1,3}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Ilya V. Tsvetkov^{1,3}, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

*Ivan S. Tsepordey*¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

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

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

⁴Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Received on November 28, 2022 / Approved after reviewing on February 23, 2023 / Accepted on February 26, 2023

Abstract. Climate change has a negative impact on the environment, including forest ecosystems. However, forests are not only passive objects affected by climate change, but also, due to their ability to absorb and accumulate carbon, they themselves can significantly influence this process. Carbon sequestration by forest ecosystems plays an important role in mitigating the effects of climate change. Therefore, it is necessary to know about the amount of carbon stored in forest phytomass, and it is becoming increasingly important to accurately determine the phytomass of forest trees. Due to the absorption of carbon dioxide during plant growth and its release during wood burning, forests are a carbon-neutral energy source. The idea of using phytomass as an energy source to replace fossil fuels is most promising for fast-growing species. These include willows (genus *Salix* L.), native to Europe, Asia, America and Africa and found from the tundra to the tropics. Willow is successfully used as fuel in many countries, showing excellent growth and productivity even at juvenile stages and, under certain climatic conditions, having the highest capacity among woody plants to convert solar radiation into phytomass. Short-rotation willow plantations represent an ecologically promising energy resource for reducing greenhouse gas levels. Since the development of phytomass models is a laborious process, so-called “generic meta-models” are used. The aim of this study has been to construct generic models of both aboveground phytomass and phytomass fractions (foliage, branches, stem, roots) of willow trees based on meta-analysis of data. In the course of the work, the models have been constructed for assessing the aboveground phytomass of trees both in diameter at the stem base and in diameter at breast height, the information content of which is close to functional, and the biases are only about 2 %. Since each fraction of phytomass has a specific carbon-sequestering capacity and makes a different contribution to the carbon balance, generic models have been developed to estimate the mass of foliage, branches, stems and roots in relation to the aboveground phytomass of trees, explaining from 82 % (for foliage) to 99 % (for stems and roots) of the total variability of phytomass.

Keywords: *Salix* L., stem phytomass, aboveground phytomass, phytomass fractions, generic model, meta-analysis, regression analysis

Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of the research effort carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency (the topic registration no. 123022800113-9).

For citation: Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Tsvetkov I.V., Tsepordey I.S. Generic Models of Willow (genus *Salix* L.) Tree Phytomass: a Meta-Analysis. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 64–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-64-75>

Введение

Климатические изменения негативно влияют на окружающую среду, в т. ч. на лесные экосистемы. Однако леса не являются только пассивными объектами, подверженными влиянию изменения климата, – благодаря своей способности к поглощению и накоплению углерода они могут существенно воздействовать на этот процесс. Связывание углерода лесными экосистемами способно помочь в смягчении последствий изменения климата. Поэтому необходимо точное знание о количестве углерода, содержащегося в лесной фитомассе, и актуальность этого вопроса все возрастает [23].

Лес является источником углеродно-нейтральной энергии благодаря поглощению углекислого газа в процессе роста растений и его высвобождению при сжигании древесины [19]. Идея использования фитомассы в качестве альтернативного источника энергии наиболее перспективна в отношении быстрорастущих пород. К ним относится ива (красотал, тальник, лоза, ветла, лозина, верба, шелюга, ракита) – род *Salix* L. Ивы составляют довольно многочисленную группу растений в Европе, Азии, Америке и Африке и встречаются от тундры до тропиков [1]. Ива является одним из наиболее многообещающих видов топлива из фитомассы во многих странах. Она демонстрирует превосходные рост и продуктивность даже на ювенильных стадиях и при определенных климатических условиях обладает самой высокой среди древесных растений способностью преобразовывать солнечное излучение в фитомассу [31]. Короткоротационные плантации ив – это экологически перспективный энергетический ресурс, который мог бы позволить снизить количество парниковых газов в атмосфере [29].

При оценке фитомассы деревьев в мировой литературе получила распространение степенная (аллометрическая) функция [30], в логарифмированной форме имеющая вид

$$\ln P_i = a + b \ln D, \quad (1)$$

где P_i – масса в абсолютно сухом состоянии i -й фракции (ствол, ветви, хвоя, листва, корни), кг; a , b – коэффициенты уравнения; D – диаметр ствола, см.

Надежность текущих оценок запасов углерода в лесах и понимание динамики углерода в экосистемах могут быть улучшены путем использования существующих знаний об аллометрии деревьев в виде моделей (1), которые применимы непосредственно к данным таксации древостоев на пробных площадях [18]. Поскольку разработка моделей фитомассы является трудоемким процессом, существуют обобщенные (generic) модели, принцип построения которых был изложен ранее [28].

Для многовидовых тропических и субтропических лесов практически невозможно предложить аллометрическую модель оценки надземной фитомассы каждого вида [32]. Поэтому на обширном экспериментальном материале получают универсальные (обобщенные) многовидовые аллометрические модели [13]. Для более точных оценок надземной фитомассы конкретных видов предпочтительнее использовать видоспецифические модели [16]. При этом обобщенные модели дают приемлемую точность и небольшие смещения, главным образом для надземной фитомассы, поскольку масса кроны очень чувствительна к условиям среды [14].

В частности, изучение обобщенных моделей, разработанных на основе результатов моделирования надземной фитомассы для 6 видов растений Северной Америки, показало, что средние различия между значениями, предсказанными с помощью обобщенных моделей, и оценками по исходным моделям, как правило, находились в пределах погрешностей оценок, полученных по исходным моделям [24]. Исследование нескольких древесных и кустарниковых видов Австралии выявило, что линии регрессии надземной фитомассы для конкретного местообитания и вида находились в пределах 95%-го доверительного интервала ее прогнозирования на основе обобщенной модели [25].

Наш опыт построения обобщенных моделей для древесных родов показал перспективность использования мета-анализа в целях получения устойчивых оценок надземной фитомассы. Например, модель для рода *Betula* L., включающая данные 10 видов из 16 стран, объяснила 97 % изменчивости надземной фитомассы при среднем смещении 2,6 % [9]. Был также выполнен сравнительный мета-анализ аллометрических моделей фитомассы быстрорастущих лиственных пород [8]. Он включал данные 6 видов *Salix* L. из 3 стран, 4 видов *Populus* L. из 7 стран и 7 видов *Alnus* L. из 9 стран, и для каждого рода получены аллометрические модели, объясняющие 99 % изменчивости надземной фитомассы деревьев с средними смещениями от 1,7 до 2,2 %. Для каждого из 10 родов подлесочных растений (*Crataegus* Tourn. ex L., *Cornus* L., *Lonicera* L., *Salix* L., *Viburnum* L., *Corylus* L., *Rubus* L., *Sorbus* L., *Prunus* L., *Rosa* L.), представленных разными видами в количестве от 2 (*Crataegus*) до 17 (*Prunus*), были рассчитаны аллометрические мета-модели надземной фитомассы, объясняющие от 94,2 до 99,5 % ее изменчивости при смещениях в диапазоне от 0,02 до 1,4 % [7]. Построенная обобщенная модель для оценки объема ствола рода *Salix* L. методом мета-анализа данных объясняет 99,9 % варьирования региональных псевдо-данных при среднем смещении около 2 % [5].

Обобщенные модели для оценки отдельных фракций фитомассы показывают менее надежные результаты. Например, для 7 древесных видов Европы были разработаны обобщенные модели фитомассы на основе синтеза данных, полученных в ходе нескольких исследований. Обнаружено, что обобщенные модели для надземной фитомассы объясняют от 98,3 до 99,7 % ее изменчивости, в то время как для листвы и хвои – от 63,5 до 92,8 % и для ветвей – от 84,5 до 96,6 % [22]. Аллометрическая всеобщая модель для рода *Prunus* L., включающая данные 6 видов из 5 стран, объяснила 98 % изменчивости фитомассы ствола и надземной фитомассы, но лишь 91 % изменчивости фитомассы листвы и ветвей [6].

Цель настоящего исследования состоит в построении обобщенных моделей как надземной фитомассы, так и фитомассы фракций (листва, ветви, ствол, корни) деревьев ивы (род *Salix* L.) на основе мета-анализа данных.

Объекты и методы исследования

Поскольку за рубежом многочисленные исследования фитомассы ивы проводятся на плантациях с 2–4-летней ротацией, в соответствующих работах измеряют диаметр ствола у его основания [20], и он используется в качестве независимой переменной в моделях [23]. Наш мета-анализ фитомассы выполнен по данным диаметров как у основания ствола, так и на высоте груди (табл. 1).

Мы использовали опубликованные данные [4] и неопубликованные собственные материалы по Архангельской области, полученные с 2018 по 2021 гг. по методике И.И. Гусева [2]. Все данные о фитомассе приведены к абсолютно сухому состоянию. За исключением названных двух источников, в качестве исходных данных фитомассы использованы восстановленные мета-данные.

Таблица 1

**Исходные данные надземной фитомассы ивы,
включенные в мета-анализ**
**The initial data of the aboveground willow phytomass included
in the meta-analysis**

Виды	Страна или регион	Источник данных	Форма представления данных	Диапазон		
				надземной фитомассы дерева, кг	диаметра ствола, см	
					у основания	на высоте груди
<i>Salix carpea</i> L., <i>S. borealis</i> Fries, <i>S. triandra</i> L.	Архангельская область, РФ	Н/о*	Фактические	1,6...40,3	5,5...19,2	3,3...12,7
<i>S. carpea</i> L.	Вологодская и Новгородская области, РФ	[4]	Фактические	0,1...102,1	1,4...29,1**	1,0...23,7
	Словакия	[22]	Модель	0,01...3,1	0,5...7,0	–
<i>S. nigra</i> Marsh.	Шт. Мэн, США	[33]	Модель	1,3...128,0	4,1...29,5**	3,0...24,0
<i>S. bebbiana</i> Sarg.	Великие Озера, США	[26]	Модель	2,0...113,3	5,4...24,8**	4,0...20,0
<i>Salix</i> L.	Шт. Мэн, США	[27]	Модель	0,6...11,5	2,8...10,4**	2,0...8,0
		[18]	Модель	0,6...1925,0	2,8...70,4**	2,0...60,0
<i>S. nigra</i> Marsh.	Долина Миссисипи, США	[17]	Модель	2,7...23,5	5,4...15,3**	4,0...12,0
<i>S. discolor</i> Muhl., <i>S. alba</i> L., <i>S. dasycladoides</i> Wimm., <i>S. sachalinensis</i> F. Schmidt	Шт. Нью-Йорк, США	[11]	Модель	0,5...2953,0	2,8...81,5**	2,0...70,0

*Н/о – неопубликованные данные авторов статьи. **Значения D_0 получены расчетным способом по уравнению $\ln D_0 = 0,36738 + 0,94932 \ln D_{1,3}$; $R^2 = 0,99$ [15], где D_0 и $D_{1,3}$ – диаметры ствола соответственно у его основания и на высоте груди, см.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа исходных данных предлагаются модели надземной фитомассы (P_a , кг), объясняющие 99 % ее изменчивости:

$$\ln P_a = -3,5856 + 2,6118 \ln D_0, \text{ adj}R^2 = 0,992; \text{ SE} = 0,22; n = 185; \quad (2)$$

$$\ln P_a = -2,4863 + 2,4461 \ln D_{1,3}, \text{ adj}R^2 = 0,994; \text{ SE} = 0,18; n = 177, \quad (3)$$

где n – число деревьев, по которым взяты данные; $\text{adj}R^2$ и SE – см. в [5].

Регрессионный коэффициент при независимой переменной $\ln D_0$ составил 2,61, при $\ln D_{1,3}$ – 2,45, т. е. показатели лежали в диапазоне между соответствующими значениями теоретической [30] и эмпирической [34] аллометрических моделей.

Графическое выражение мета-моделей (2) и (3) показано на рис. 1, а соотношение исходных и расчетных данных – на рис. 2.

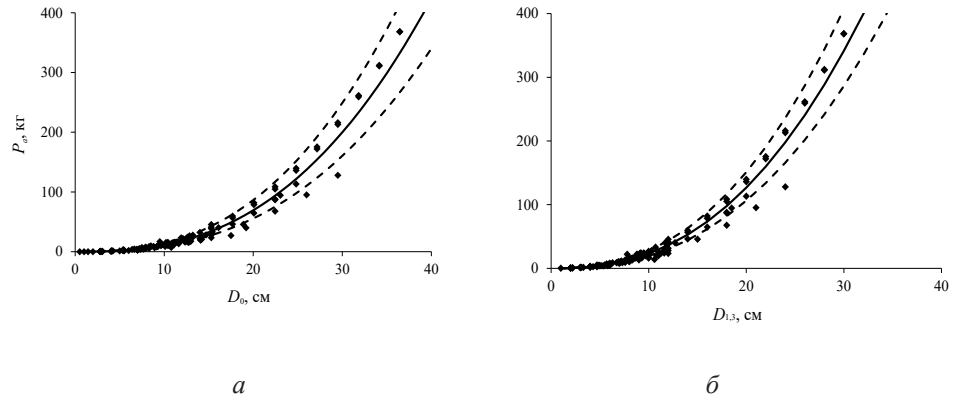


Рис. 1. Графические интерпретации мета-моделей на фоне исходных данных (показаны точками): *a* – (2); *б* – (3)

Fig. 1. The graphical interpretations of meta-models against the background of the initial data (shown with dots): *a* – (2); *б* – (3)

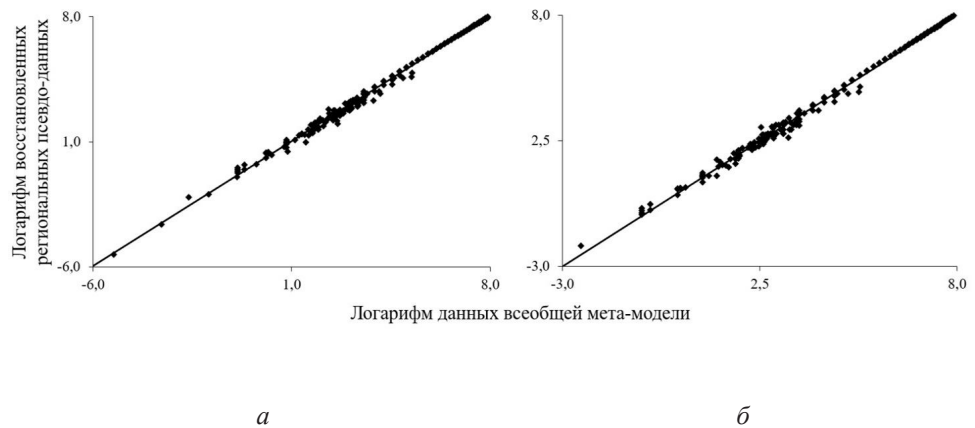


Рис. 2. Соотношение восстановленных региональных псевдо-данных фитомассы деревьев и данных обобщенной мета-модели: *a* – (2); *б* – (3)

Fig. 2. The ratio of the restored regional pseudo-data of tree phytomass and the data of the generic meta-model: *a* – (2); *б* – (3)

Данные табл. 2 свидетельствуют, что смещения, как и в предыдущих исследованиях [5, 7–9], составили около 2 %.

Поскольку каждая фракция фитомассы обладает специфичной углероддепонирующей способностью и вносит разный вклад в углеродный баланс [21], разработаны обобщенные модели для оценки массы листьев, ветвей, стволов и корней, использующие данные о надземной фитомассе деревьев и объясняющие от 82 (для листьев) до 99 (для стволов и корней) % общей изменчивости фитомассы. Был применен рекурсивный принцип последовательного совмещения моделей [10]. Характеристика исходных данных о фракционном составе фитомассы деревьев, включенных в наш мета-анализ, дана в табл. 3.

Таблица 2

Средние смещения региональных псевдо-данных надземной фитомассы ивы относительно значений, полученных табулированием мета-моделей
The average biases of the regional pseudo-data of the aboveground willow phytomass relative to the values obtained by tabulating meta-models

Показатель	Источник данных									В целом
	Н/о	[4]	[23]	[33]	[26]	[27]	[18]	[17]	[11]	
Для модели (2)										
Среднее систематическое смещение	-5,68	10,84	-19,16	-13,54	-8,59	14,78	11,80	-10,88	11,02	2,21
Ошибка среднего	±3,42	±5,01	±5,24	±8,08	±0,49	±8,87	±1,59	±6,01	±0,38	±1,50
Для модели (3)										
Среднее систематическое смещение	0,99	1,75	–	-18,90	-13,94	4,69	8,40	-17,28	7,84	1,46
Ошибка среднего	±2,89	±4,22	–	±6,78	±0,96	±7,38	±0,97	±5,22	±0,16	±1,27

Таблица 3

Исходные данные о фракционном составе фитомассы ивы, включенные в мета-анализ
The initial data on the fractional composition of willow phytomass included in the meta-analysis

Виды	Страна или регион	Источник данных	Форма представления данных	Диапазон, кг				
				фитомассы фракций				надземной фитомассы
				P_f	P_b	P_s	P_r	
<i>Salix carpea</i> L., <i>S. borealis</i> Fries, <i>S. triandra</i> L.	Архангельская область, РФ	Н/о	Фактические	0,06...1,1	0,18...9,3	1,30...20,0	–	1,60...40,3
<i>S. carpea</i> L.	Вологодская и Новгородская области, РФ	[4]	Фактические	0,02...4,4	0,02...27,8	0,09...74,6	0,03...5,9	0,10...102,1
<i>S. carpea</i> L.	Словакия	[23]	Модель	0,002...0,5	0,001...1,0	0,002...1,6	0,001...0,6	0,01...3,1
<i>S. nigra</i> Marsh.	Шт. Мэн, США	[33]	Фактические	0,20...6,5	0,40...12,5	0,90...109,0	0,50...38,0	1,30...128,0
<i>S. bebbiana</i> Sarg.	Великие Озера, США	[26]	Модель	0,16...4,4	–	1,50...81,1	–	2,03...113,3
<i>Salix</i> L.	Шт. Мэн, США	[27]	Модель	0,10...1,0	0,20...2,0	0,33...8,5	–	0,60...11,5
<i>Salix</i> L.	Румыния	[12]	Модель	0,06...1,5	0,26...3,5	0,34...4,7	0,30...3,1	0,68...9,7

Примечание: P_f , P_b , P_s и P_r – соответственно фитомасса листвы, ветвей, ствола и корней.

Общий вид модели для фракционного состава фитомассы:

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

Характеристика полученных расчетом моделей дана в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика мета-моделей (4)
The characteristics of meta-models (4)

Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты мета-моделей		adjR ²	SE	n
	a	b			
$\ln P_f$	-2,1869	0,6706	0,819	0,55	100
$\ln P_b$	-1,6355	0,9668	0,949	0,39	90
$\ln P_s$	-0,4667	1,0616	0,993	0,15	100
$\ln P_r$	-1,2750	1,0304	0,991	0,22	40

Полученные коэффициенты детерминации близки к литературным данным [22]. Для расчета углерододепонирующей способности ив предложены показатели содержания углерода в фитомассе стволов, ветвей, листья и корней – соответственно 46,1; 48,9; 47,5 и 47,9 % [3].

Графическое изображение моделей для фракций фитомассы дано на рис. 3.

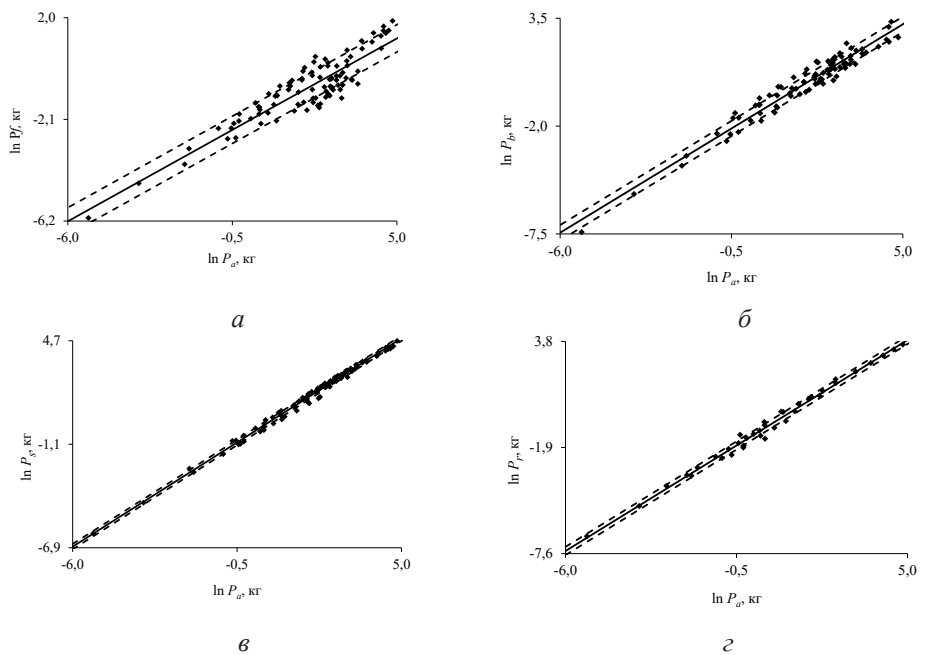


Рис. 3. Графические интерпретации мета-моделей (4) на фоне исходных данных (показаны точками): а, б, в, г – соответственно листья, ветви, ствол и корни

Fig. 3. The graphical interpretations of meta-models (4) against the background of the initial data (shown with dots): а, б, в, г – foliage, branches, stem and roots, respectively

Заключение

Таким образом, на основе мета-данных предложены обобщенные модели для оценки надземной фитомассы ивы по диаметру у основания ствола и по

диаметру на высоте груди, обладающие информативностью, близкой к функциональной. Их смещения составили около 2 %.

Разработаны обобщенные модели для оценки массы листвы, ветвей, стволов и корней по данным о надземной фитомассе деревьев, также характеризующиеся высокой адекватностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферов Г.И. Ива. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 101 с.
Antsiferov G.I. *Willow*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 101 p. (In Russ.).
2. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с.
Gusev I.I. *Ecosystem Modeling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
3. Пристова Т.А. Запасы углерода в древесных растениях березово-елового молодняка послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 1. С. 72–82.
Pristova T.A. Carbon Reserves in Woody Plants of Birch-Spruce Young Stock of Post-Harvest Origin of the Middle Taiga of the Komi Republic. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2022, no. 1, pp. 72–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.1.72>
4. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах Европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 359 с.
Smirnov V.V. *Organic Mass in Some Forest Phytocenoses of the European Part of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 359 p. (In Russ.).
5. Усольцев В.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цепордей И.С. Модель объема ствола ивы: мета-анализ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 49–58.
Usoltsev V.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Tsepordey I.S. Generic Model of Willow Stem Volume: A Meta-Analysis. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 3, pp. 49–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-49-58>
6. Усольцев В.А., Уразова А.Ф., Борников А.В., Цепордей И.С. Видоспецифичная аллометрия и «всеобщая» модель структуры надземной биомассы рода *Prunus* L.: мета-анализ // Леса России и хоз-во в них. 2019. № 3(70). С. 4–15.
Usoltsev V.A., Urazova A.F., Bornikov A.V., Tsepordey I.S. Species-Specific Allometry and a Generic Model of the Aboveground Biomass Structure of the Genus *Prunus* L.: a Meta-Analysis. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2019, no. 3(70), pp. 4–15. (In Russ.).
7. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Азаренок В.А., Кох Е.В. Всеобщие аллометрические модели фитомассы подлесочных видов: мета-анализ // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1(57). С. 5–20.
Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Azarenok V.A., Kokh E.V. Generic Allometric Models of Understory Species BioMASS: Meta-Analysis. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 1(57), pp. 5–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.5>
8. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. 2023. Т. 15, № 1. С. 7–20.
Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. Comparative Meta-Analysis of Allometric Models of Fast-Growing Hardwood Biomass. *Biosfera*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i1.789>

9. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Часовских В.П. Всеобщие аллометрические модели фитомассы берез (род *Betula* L.): мета-анализ // Тр. СПбНИИЛХ. 2023. № 4. С. 4–15.

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Generic Models of Birch (Genus *Betula* L.) Tree Biomass: a Meta-Analysis. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2023, no. 4, pp. 4–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.4.4>

10. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.

Chetyrkin E.M. *Statistical Methods of Forecasting*. Moscow, Statistika Publ., 1977. 200 p. (In Russ.).

11. Arevalo C.B.M., Volk T.A., Bevilacqua E., Abrahamson L. Development and Validation of Aboveground Biomass Estimations for Four *Salix* Clones in Central New York. *Biomass and Bioenergy*, 2007, vol. 31, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.012>

12. Blujdea V.B.N., Pilli R., Dutca I., Ciuvat L., Abrudan I.V. Allometric Biomass Equations for Young Broadleaved Trees in Plantations in Romania. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 264, pp. 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>

13. Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martínez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Péliissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. 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>

14. Chen J., Fang X., Wu A., Xiang W., Lei P., Ouyang S. Allometric Equations for Estimating Biomass of Natural Shrubs and Young Trees of Subtropical Forests. *New Forests*, 2024, vol. 55, pp.15–46. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09963-z>

15. Chojnacky D.C., Heath L.S., Jenkins J.C. Updated Generalized Biomass Equations for North American Tree Species. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 1, pp. 129–151. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt053>

16. Conti G., Gorné L.D., Zeballos S.R., Lipoma M.L., Gatica G., Kowaljew E., Whitworth-Hulse J.I., Cuchiatti A., Poca M., Pestoni S., Fernandes P.M. Developing Allometric Models to Predict the Individual Aboveground Biomass of Shrubs Worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, vol. 28, iss. 7, pp. 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>

17. Dahal B., Poudel K.P., Renninger H.J., Granger J.J., Leininger T.D., Gardiner E.S., Souter R.A., Rousseau R.J. Aboveground Biomass Equations for Black Willow (*Salix nigra* Marsh.) and Eastern Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh.). *Trees, Forests and People*, 2022, vol. 7, art. no. 100195. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100195>

18. Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 1, pp. 12–35. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.12>

19. Marchetti M. Forest Biomass for Bioenergy: Opportunities and Constraints for Governance Context. *Forest Biomass Conference 2013*, 2013, pp. 37–38.

20. Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Strazyńska K., Stachowiak A. Biomass Productivity and Phytoremediation Potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, 2010, vol. 34, iss. 9, pp. 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.012>

21. Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G.A., Schulze E.-D. Growth and Carbon Stocks of a Spruce Forest Chronosequence in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 171, iss. 3, pp. 275–296. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00788-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00788-5)

22. Muukkonen P. Generalized Allometric Volume and Biomass Equations for Some Tree Species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 2007, vol. 126, pp. 157–166. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4>
23. Pajtik 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 – Forest Research Institute Zvolen, 2018. 89 p.
24. Pastor J., Aber J.D., Melillo J.M. Biomass Prediction Using Generalized Allometric Regressions for Some Northeast Tree Species. *Forest Ecology and Management*, 1984, vol. 7, iss. 4, pp. 265–274. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90003-3)
25. Paul K.I., Roxburgh S.H., England J.R., Ritson P., Hobbs T., Brooksbank K., Raison R.J., Larmour J.S., Murphy S., Norris J., Neumann C., Lewis T., Jonson J., Carter J.L., McArthur G., Barton C., Rose B. Development and Testing of Allometric Equations for Estimating Aboveground Biomass of Mixed-Species Environmental Plantings. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 310, pp. 483–494. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.054>
26. Perala D.A., Alban D. Allometric Biomass Estimators for Aspen-Dominated Ecosystems in the Upper Great Lakes. *Research Paper NC-314*. St. Paul, MN, US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1993. 38 p. <https://doi.org/10.2737/NC-RP-314>
27. Ribe J.H. Puckerbrush Weight Tables. *Miscellaneous Report 152*. Orono, ME, University of Maine, Life Sciences and Agriculture Experiment Station, 1973. 92 p.
28. Urban D.L., Acevedo M.F., Garman S.L. Scaling Fine-Scale Processes to Large-Scale Patterns Using Models Derived from Models: Meta-Models. *Spatial Modeling of Forest Landscape Change: Approaches and Applications*, 1999, chapt. 4, pp. 70–98.
29. Volk T.A., Luzadis V. Willow Biomass Production for Bioenergy, Biofuels and Bioproducts in New York. *Renewable Energy from Forest Resources in the United States*, 2009, pp. 238–260. <https://doi.org/10.4324/9780203888421-22>
30. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A General Model for the Structure and Allometry of Plant Vascular System. *Nature*, 1999, vol. 400, pp. 664–667. <https://doi.org/10.1038/23251>
31. Wilkinson A.G. Poplars and Willows for Soil Erosion Control in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 1999, vol. 16, iss. 4, pp. 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00007-0)
32. Yang T.H., Song K., Da L.J., Li X.P., Wu J.P. The Biomass and AboveGround Net Primary Productivity of *Schima superba-Castanopsis carlesii* Forests in East China. *Science China Life Sciences*, 2010, vol. 53, pp. 811–821. <https://doi.org/10.1007/s11427-010-4021-5>
33. Young H.E., Ribe J.H., Wainwright K. *MR 230: Weight Tables for Tree and Shrub Species in Maine*. Life Sciences & Agriculture Experiment Station Miscellaneous Report 230, 1980. 84 p.
34. Zianis D., Mencuccini M. On Simplifying Allometric Analyses of Forest Biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 187, iss. 2–3, pp. 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>

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