

Леса России и хозяйство в них. 2022. № 4. С. 10–19
Forests of Russia and economy in them. 2022. № 4. P. 10–19

Научная статья

УДК 630*52

DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002

БИОМАССА ДЕРЕВЬЕВ ИВЫ И ЕЕ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В УСЛОВИЯХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Андрей Алексеевич Парамонов¹, Владимир Андреевич Усольцев²,
Сергей Васильевич Третьяков³, Сергей Викторович Коптев⁴,
Алексей Александрович Карабан⁵, Илья Васильевич Цветков⁶,
Александр Владимирович Давыдов⁷, Иван Степанович Цепордей⁸

^{1, 3, 4, 5, 6, 7} Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Архангельск, Россия

^{3, 4, 5, 6, 7} Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

^{2, 8} Ботанический сад Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Владимир Андреевич Усольцев,

Usoltsev50@mail.ru

Аннотация. Земли, вышедшие из сельскохозяйственного пользования в России после 1990-х годов, интенсивно зарастают естественным путём такими породами, как ива, ольха и др., их вклад в углеродный бюджет лесного покрова неизвестен. Для оценки углероддепонирующей способности лесов активно разрабатываются аллометрические модели биомассы деревьев, особенно актуальные для смешанных лесов. В России единственные аллометрические модели для биомассы ивы козьей были построены по данным В. В. Смирнова (1971), полученным в подзонах средней тайги и хвойно-широколиственных лесов. Целью наших исследований было получение фактических данных о структуре надземной биомассы ивы, произрастающей в условиях северной тайги Архангельской области, и разработка аллометрических моделей для ее фракций. Предложены аллометрические модели для фракций надземной биомассы деревьев ивы, которые характеризуются высокими показателями адекватности исходным данным и могут быть полезны при оценке углероддепонирующей способности ивовых насаждений.

Ключевые слова: надземная биомасса, компоненты биомассы, всеобщая модель, аллометрические модели биомассы

Благодарности: публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства, регистрационный номер темы АААА-А18-118030290042-6; конкурса научных проектов «Молодые учёные Поморья» по гранту № 01Ф-02-08/558, а также в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Scientific article

DOI: 10.51318/FRET.2022.27.41.002

WILLOW TREE BIOMASS AND ITS ALLOMETRIC MODELS IN THE CONDITIONS OF THE ARKHANGELSK REGION

Andrey A. Paramonov¹, Vladimir A. Usoltsev^{3, 4}, Sergey V. Tretyakov^{1, 2}, Sergey V. Koptev^{1, 2},
Alexey Karaban^{1, 2}, Iliya V. Tsvetkov^{1, 2}, Alexander V. Davydov^{1, 2}, Ivan S. Tsepordey⁴

¹ Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

² Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia

³ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

⁴ Botanical Garden, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Vladimir A. Usoltsev,

Usoltsev50@mail.ru

Abstract. The lands that came out of agricultural use in Russia after the 1990s are intensively overgrown naturally with such species as willow, alder, etc., and their contribution to the carbon budget of the forest cover is unknown. To assess the carbon depositing capacity of forests, allometric models of tree biomass are being actively developed, especially relevant for mixed forests. In Russia, the only allometric models for goat willow biomass were constructed according to V. V. Smirnov (1971) data obtained in the subzones of the middle taiga and coniferous-deciduous forests. The aim of our research was to obtain experimental data on the structure of the aboveground biomass of willow growing in the conditions of the northern taiga of the Arkhangelsk region, and to develop allometric models for its fractions. Allometric models are proposed for fractions of the aboveground biomass of willow trees, which are characterized by high indicators of adequacy to the initial data and can be useful in assessing the carbon depositing capacity of willow plantations.

Keywords: aboveground biomass, biomass components, generic model, allometric models of biomass

Acknowledgments: The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state task of the SevNIILH FBU for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency, the registration number of the topic AAAA-A18-118030290042-6; the competition of scientific projects «Young Scientists of Pomerania» under grant № 01F-02-08/558, as well as within the framework of the State task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Введение

В последние десятилетия большие площади земель в России вышли из сельскохозяйственного пользования, но в Западной Европе подобная тенденция наблюдалась и ранее, в 1970–80-е годы. Одним из решений проблемы заброшенных земель было предложено выращивание культур быстрорастущих пород, достаточно неприхотливых к условиям произрастания и обеспе-

чивающих существенных вклад в повышение углероддепонирующей способности лесного покрова (Christersson et al., 1993). За рубежом короткоротационные (энергетические) лесные плантации ивы и тополя используются в качестве возобновляемого источника энергии. Эти две породы в бореальной зоне отличаются наиболее быстрыми темпами роста и депонирования углерода (рис. 1).

В условиях умеренного климата ежегодное производство древесной биомассы видов *Salix* может достигать 20 т сухого древесного вещества на гектар (Heinsoo et al., 2002; Productivity..., 2008). В последние десятилетия разведение короткоротационных плантаций сочетало в себе производство биомассы для получения энергии и мелиорацию земель. В своеобразных растительных

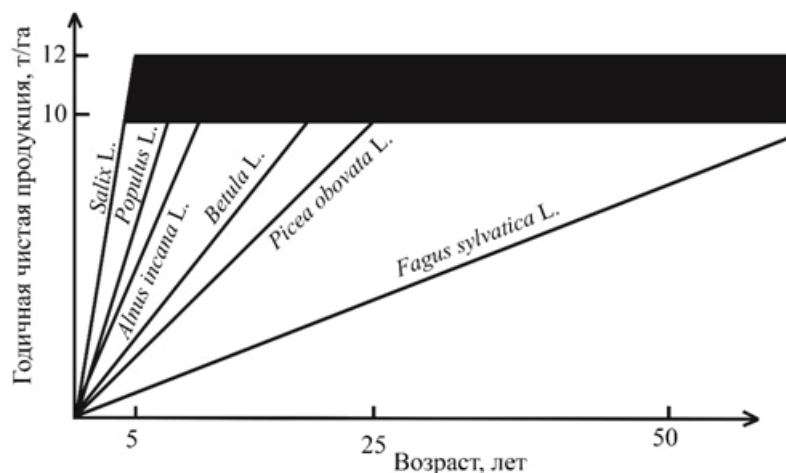


Рис. 1. Схематическое представление скорости, с которой различные породы деревьев достигают годичной продукции 10–12 т абсолютно сухой древесины на 1 га (Christersson et al., 1993)

Fig. 1. Schematic representation of the rate at which various tree species achieve annual production of 10–12 tons of absolutely dry wood per 1 ha (Christersson et al., 1993)

фильтрах корни поглощают питательные вещества сточных вод, а ризосфера растений обеспечивает аэробную среду для микробов, которые усиливают нитрификацию соединений биологических загрязнителей (Mitsch, Gosselink, 2000). Во всем мире ивы рекомендуются для фитомелиорации загрязненных металлами почв, поскольку они не только производят большую биомассу, но и эффективны в фитоэкстракции тяжелых металлов, таких как Cd и Zn, из загрязненных почв (Root development..., 2003). Некоторые клоны устойчивы к низким значениям pH (Examining the salt..., 2011) и к повышенным концентрациям некоторых микроэлементов (Assessment of willow..., 2011).

В России земли, вышедшие из сельскохозяйственного пользования после 1990-х годов, интенсивно зарастают естествен-

ным путём такими породами, как ива, ольха и др. (Жижин и др., 2021). Эти лесные площади часто не подлежат инвентаризации, их вклад в углеродный бюджет лесного покрова неизвестен. Для оценки углероддепонирующей способности лесов активно разрабатываются аллометрические модели биомассы деревьев, особенно актуальные для смешанных лесов, и их количество во всем мире исчисляется уже тысячами (A review..., 2020). В России единственные аллометрические модели для биомассы ивы козьей (Усольцев и др., 2022) построены по данным В. В. Смирнова (1971), полученным в подзонах средней тайги и хвойно-широколиственных лесов.

Цель, методика и объекты исследования

Целью наших исследований было получение фактических данных о структуре надземной

биомассы ивы, произрастающей в условиях северной тайги Архангельской области, и разработка аллометрических моделей для ее фракций.

Сбор полевого материала проводился с 2018 по 2021 гг. в Приморском, Вельском, Шенкурском, Плесецком и Верхнетоемском районах Архангельской области в древостоях, представленных видами *Salix carpea* L., *S. borealis* Fries. и их гибридными формами. Были заложены 53 пробные площади, на которых взято по одному среднему модельному дереву в возрастном диапазоне от 20 до 65 лет. Пробные площади закладывали в соответствии с ОСТ 56–69–83 «Площади пробные лесоустроительные» (ОСТ 56–69–83). Обработка модельных деревьев на пробных площадях проводилась с учетом методических рекомендаций И. И. Гусева (2002). В совокупности модельных деревьев было взято одно многоствольное дерево диаметром 15 см. Его биомасса была сопоставлена с биомассой равновеликих деревьев, полученной по регрессионной зависимости биомассы остальных 52 деревьев от диаметра ствола (см. модель (1)). Оказалось, что многоствольное дерево по отношению к остальным равновеликим деревьям даёт завышение биомассы хвои и ветвей соответственно на 94 и 12 % и занижение биомассы ствола и надземной соответственно на 25 и 17 %. В количественном отношении многоствольное модельное дерево составляет около 2 % от числа взятых модельных

деревьев. В реальных древостоях количество многоствольных деревьев может быть больше или меньше, и включение такого дерева в наш регрессионный анализ может привести к систематическим ошибкам при расчете биомассы на 1 га. Поэтому оно было исключено из последующего анализа. Полная характеристика полученных данных о 52 модельных деревьях ивы дана в табл. 1.

Известно, что оценка биомассы деревьев по двум основным массообразующим показателям – диаметру ствола и высоте дерева – дает более точные и несмещенные оценки биомассы по сравнению с моделями, рассчитанными только в связи с диаметром ствола (Sensitivity of above-ground..., 2016). Но известно также, что измерение высоты дерева в реальных условиях древостоя не только трудоемко, но и сопряжено со значительно большей ошибкой по сравнению с измерением диаметра ствола (Sensitivity of above-ground..., 2016). Кроме того, на пробных площадях, заложенных в относительно однородных лесорастительных условиях, высота дерева и диаметр ствола тесно коррелированы, и в таких случаях двухфакторная модель может дать неустойчивые оценки биомассы (Zianis, Mencuccini, 2003). В нашем случае корреляция между высотой дерева и диаметром ствола (см. табл. 1) оказалась довольно тесной, коэффициент корреляции составил 0,73. Поэтому в нашем исследовании при оценке биомассы ивы применена функция статической аллометрии (Мина, Клевезаль, 1976),

которая в логарифмированной форме имеет вид:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D, \quad (1)$$

где P_i – биомасса i -й фракции ($P_s, P_{bk}, P_b, P_f, P_a, P_r$ – соответственно биомасса ствола в коре, коры ствола, ветвей, листы, надземная и корней) в абсолютно сухом состоянии, кг;

D – диаметр ствола на высоте груди, см.

Оценка биомассы корней представляет наибольшую проблему по сравнению с определением фракционного состава надземной биомассы. В нашем исследовании биомасса корней не определялась, и для расчета моделей их биомассы использованы данные В. В. Смирнова (1971) для европейской части России. Коэффициенты регрессии уравнения (1) были рассчитаны с использованием программного обеспечения Statgraphics-19 (для получения дополнительной информации см. <http://www.statgraphics.com/>).

Результаты исследования

Результаты расчета моделей (1) приведены в табл. 2.

Графическая интерпретация некоторых моделей биомассы деревьев, представленных в табл. 2, на фоне исходных данных показана на рис. 2.

Ранее по данным 7120 модельных деревьев 12 древесных пород Евразии было установлено, что вклад длины кроны в объяснение изменчивости биомассы деревьев в аллометрических моделях в среднем составил 12 %. При включении в нашу модель (1) длины кро-

ны в качестве второй независимой переменной оказалось, что по большинству фракций (исключение составила модель для биомассы ветвей, в которой $t = 3,5 > t_{05} = 1,96$) уровень значимости длины кроны составил от 0,16 для массы ствола до 1,10 для массы листы, что ниже стандартного значения 1,96. Причина расхождения с ранее полученным результатом может быть в недостаточном объеме исходных данных и, соответственно, в недостаточно больших диапазонах изменчивости независимых переменных и взаимной корреляции диаметра ствола и длины кроны (Биомасса ассимиляционного аппарата..., 2020).

При оценке биомассы деревьев в короткоротационных плантациях обычно измеряют диаметр ствола у его основания. Чтобы полученные нами модели (табл. 2) можно было использовать при оценке углероддепонирующей способности ивы на короткоротационных плантациях, мы предлагаем уравнения связи D с D_0 и наоборот (модели (2) и (3)):

$$\ln D_0 = 0,5646 + 0,8823 \ln D; \quad \text{adj}R^2 = 0,859; \text{SE} = 0,104, \quad (2)$$

$$\ln D = -0,2665 + 0,9766 \ln D_0; \quad \text{adj}R^2 = 0,859; \text{SE} = 0,110. \quad (3)$$

Коэффициенты детерминации зависимостей (2) и (3) оказались ниже по сравнению с аналогичными взаимосвязями, установленными в США по данным 250 деревьев, где коэффициент детерминации составил 0,987 (Chojnacki et al., 2014).

Таблица 1
Table 1

Характеристика модельных деревьев ивы, взятых на 52 пробных площадях Архангельской области
Characteristics of willow model trees taken on 52 sample plots of the Arkhangelsk region

№	A , лет* A , yrs	D , см*** D , cm	D_0 , см* D_0 , cm	H , м* H , m	L_{cr} , м* L_{cr} , m	V_t^{**}	V_{bk}^{**}	P_s^{**}	P_{bk}^{**}	P_b^{**}	P_f^{**}	P_d^{**}	N , экз./га* N , trees per ha
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	55	8,8	14,0	12,0	8,4	0,036	0,005	18,733	2,701	3,201	0,407	22,341	2150
2	30	7,6	9,3	11,0	5,8	0,025	0,003	8,066	1,253	1,193	0,145	9,404	5700
3	30	7,6	9,6	11,0	4,4	0,025	0,004	12,615	1,711	1,860	0,353	13,154	2250
4	23	8,7	9,5	11,0	6,6	0,033	0,005	13,858	2,186	2,499	0,450	16,807	2250
5	30	8,3	10,2	11,0	7,7	0,030	0,005	14,248	1,935	1,150	0,203	15,601	2250
6	30	8,2	10,9	10,3	5,2	0,028	0,003	11,535	1,385	1,943	0,300	13,778	3175
7	25	7,0	8,5	9,6	4,8	0,019	0,004	8,284	1,653	1,249	0,290	9,823	3275
8	30	11,6	14,7	10,0	5,0	0,054	0,007	19,959	2,474	7,281	1,075	28,315	2250
9	30	6,9	9,6	9,8	5,9	0,019	0,003	8,854	1,266	1,515	0,215	10,584	3275
10	30	11,3	12,7	12,6	7,6	0,061	0,007	20,396	2,894	3,165	0,496	24,057	2250
11	70	11,7	14	11,6	4,6	0,062	0,010	28,645	3,745	3,201	0,616	32,462	2250
12	36	9,1	11,9	12,2	6,1	0,039	0,005	20,441	2,572	2,638	0,289	23,368	2250
13	35	9,3	12,4	10,7	4,5	0,037	0,006	14,325	2,060	1,852	0,299	16,476	2250
14	25	7,2	9,7	11,1	6,7	0,023	0,004	9,382	1,529	1,473	0,197	11,052	3275
15	20	4,7	7,0	7,7	5,4	0,008	0,002	2,250	0,589	0,314	0,070	2,634	3275
16	20	4,3	5,5	7,5	3,8	0,006	0,001	2,177	0,399	0,348	0,116	2,641	3275
17	25	6,1	8,9	8,8	3,5	0,014	0,003	5,571	0,875	0,773	0,244	6,588	3175
18	35	5,7	7,5	9,0	2,7	0,012	0,002	6,696	1,028	0,273	0,064	7,033	3175
19	25	4,7	7,2	9,0	3,6	0,008	0,001	4,950	0,827	0,274	0,091	5,315	3275
20	65	10,6	16,4	10,0	4,0	0,045	0,007	11,219	1,806	2,357	0,379	13,955	3200
21	35	7,8	12,1	10,0	9,7	0,025	0,005	17,709	2,740	3,660	0,709	22,078	4475
22	20	5,4	7,3	5,5	2,7	0,008	0,002	3,445	0,733	0,357	0,066	3,868	4475
23	52	8,1	11,1	9,2	3,7	0,025	0,005	10,988	1,598	0,655	0,162	11,805	4425
24	21	5,5	8,3	6,4	6,2	0,009	0,002	4,535	0,766	0,692	0,224	5,451	5025
25	20	6,1	8,3	10	9,5	0,015	0,003	4,498	0,889	1,601	0,102	6,201	5025
26	20	3,3	5,5	5,0	4,5	0,003	0,001	1,291	0,257	0,178	0,103	1,572	4475

Окончание табл. 1
The end of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
27	20	6,9	10,7	7,5	5,3	0,016	0,003	6,603	1,265	1,768	0,406	8,777	5025
28	35	10,9	17,5	11,5	9,2	0,053	0,008	23,237	3,748	3,221	0,651	27,109	4025
29	38	11,6	12,8	11,3	7,9	0,059	0,013	20,369	2,854	3,256	0,490	24,115	3550
30	33	7,2	10,5	10,6	7,4	0,022	0,005	9,963	1,677	1,164	0,102	11,229	3275
31	35	5,8	7,8	7,2	6,9	0,011	0,002	4,334	0,831	1,036	0,124	5,494	3275
32	70	10,1	12,6	13,2	6,6	0,050	0,010	22,262	3,105	1,846	0,246	24,354	2925
33	40	7,9	12,7	10,3	36,2	0,026	0,003	11,276	1,781	4,098	0,318	15,692	3175
34	55	8,4	12,7	9,5	5,7	0,028	0,006	11,890	1,671	4,109	0,631	16,63	3175
35	31	4,9	7,5	8,3	3,3	0,009	0,002	3,731	0,696	0,911	0,172	4,814	3275
36	35	7,3	10,1	9,0	3,6	0,020	0,005	7,613	1,246	1,162	0,243	9,018	3175
37	30	8,3	10,2	10,0	7,0	0,028	0,005	10,297	1,473	2,387	0,453	13,137	3175
38	20	7,6	9,7	10,4	5,2	0,024	0,004	10,055	1,326	1,176	0,228	11,459	3175
39	30	10,0	12,3	9,5	5,7	0,039	0,005	11,442	1,701	4,602	0,651	16,695	2250
40	20	6,7	8,8	8,5	5,1	0,016	0,003	6,800	0,978	1,921	0,287	9,008	3275
41	35	8,9	14,2	9,7	6,8	0,031	0,003	15,568	2,084	4,709	0,487	20,764	2925
42	30	8,2	11,6	9,8	4,9	0,027	0,004	11,656	1,612	3,414	0,617	15,687	3175
43	25	9,7	12,6	10,6	5,3	0,040	0,006	16,399	2,219	2,745	0,597	19,741	2250
44	65	10,7	15,4	12	7,2	0,053	0,008	26,225	3,573	6,373	0,597	33,195	1250
45	35	9,0	13,0	12,5	7,5	0,038	0,007	15,520	3,073	1,713	0,404	17,637	1250
46	30	6,0	10,8	8,8	2,6	0,013	0,001	6,303	1,114	0,866	0,178	7,347	3525
47	40	12,7	19,2	11,4	4,6	0,072	0,012	32,470	4,615	6,879	0,853	40,202	1275
48	35	9,2	14,2	10,9	3,3	0,036	0,007	21,653	3,925	2,372	0,230	24,255	1975
49	50	11,7	16,1	12,1	6,1	0,063	0,011	34,251	5,093	5,499	0,512	40,262	1275
50	16	9,5	13,2	9,0	8,7	0,034	0,002	14,254	1,769	9,259	0,808	24,321	2150
51	15	8,2	11,0	10,1	9,8	0,027	0,003	11,537	1,703	3,125	0,340	15,002	5700
52	31	10,8	14,1	9,2	9,0	0,045	0,005	13,400	1,704	5,579	0,707	19,686	275

* A, D_0, H, Lcr, N – соответственно возраст, диаметр ствола у его основания, высота дерева, длина кроны, густота древостоя.

** Обозначения см. модель (1).

При сопоставлении аллометрических моделей (1), построенных по нашим данным для подзоны северной тайги, с аналогичными моделями, построенными по данным В. В. Смир-

нова (1971) для подзон средней тайги и хвойно-широколиственных лесов (Усольцев и др., 2022), оказалось, что биомасса листвы и ветвей в северной тайге занижается соответственно на 67 и 26 %, а биомасса стволов, напротив, завышается на 12 %. Эти различия между подзонами статистически значимы на уровне $t = 2,5 \dots 8,0 > t_{05} = 1,96$. При расчете модели для надземной биомассы противоположные тренды для масс кроны и ствола взаимно компенсируются, и различие между подзонами по надземной биомассе становится статистически незначимым ($t = 0,75 < t_{05} = 1,96$). Поэтому для Европейской России рассчитана обобщенная модель для надземной биомассы ивы:

Таблица 2
Table 2

Характеристика моделей (1)
Characteristics of models (1)

Зависимая переменная* Dependent variable	Коэффициенты Coefficients		adjR ² **	SE**	n**
	a ₀	a ₁			
ln V _t	-8,5150	2,3346	0,985	0,085	52
ln V _{bk}	-9,4400	1,9193	0,853	0,234	
ln P _s	-2,3671	2,2861	0,891	0,233	
ln P _{bk}	-3,4816	1,9226	0,850	0,236	
ln P _b	-5,0265	2,7220	0,742	0,468	
ln P _f	-5,2760	1,9644	0,633	0,435	
ln P _a	-2,2814	2,3413	0,916	0,207	
ln P _r	-3,7649	2,5004	0,965	0,325	8

* Обозначения см. модель (1).
** adjR² – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения; n – число наблюдений.

$$\ln P_a = -2,2010 + 2,3089 \ln D;$$

$$\text{adj}R^2 = 0,974; \text{SE} = 0,19. \quad (4)$$

Тем самым получает объяснение возможность построения всеобщей модели надземной биомассы для рода *Salix* L., отличающейся высокой точностью при использовании ее в разных регионах и для разных видов *Salix*.

Заключение

Предложенные аллометрические модели для компонентов надземной биомассы деревьев ивы для условий северной тайги Архангельской области характеризуются высокими показателями адекватности исходным данным и могут быть полезны при оценке углероддепонирующей способности ивовых насаждений.

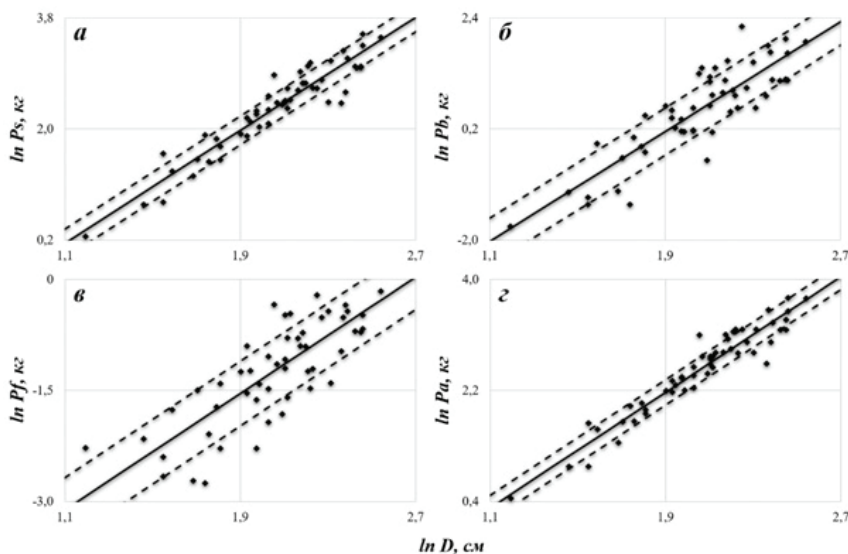


Рис. 2. Графические интерпретации моделей (1) на фоне исходных данных, показанных точками; а, б, в, г – соответственно ствол, ветви, листва, надземная часть

Fig. 2. Graphical interpretations of models (1) against the background of the initial data shown by dots; a, b, c, d – respectively trunk, branches, foliage, aboveground

Список источников

Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования / В. А. Усольцев, В. Ф. Ковязин, И. С. Цепордей, В. П. Часовских, В. А. Азаренок // Изв. СПб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 232. С. 50–78.

Гусев И. И. Моделирование экосистем : учеб. пособие. Архангельск : Изд-во АГТУ, 2002. 112 с.

Жижин С. М., Магасумова А. Г., Оплетаев А. С. Зарастание древесной растительностью сельскохозяйственных угодий в южной подзоне тайги Республики Удмуртия // Вестник Бурят. с.-х. акад. 2021. № 2 (63). С. 84–91.

Мина Н. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М. : Наука, 1976. 291 с.

Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М. : Наука, 1971. 362 с.

Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицин Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 1. С. 4–14.

A review of biomass equations for China's tree species / Y. Luo, X. Wang, Z. Ouyang, F. Lu, L. Feng, J. Tao // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12(1). P. 21–40. <https://doi.org/10.5194/essd-12-21-2020>

Assessment of willow (*Salix* sp.) as a woody heavy metal accumulator : Field survey and in vivo X-ray analyses / E. Harada, A. Hokura, I. Nakai, Y. Terada, K. Baba, K. Yazaki, M. Shiono, N. Mizuno, T. Mizuno // Metallomics. 2011. Vol. 3. P. 1340–1346.

Chojnacky D. C., Heath L. S., Jenkins J. C. Updated generalized biomass equations for North American tree species // Forestry. 2014. Vol. 87. P. 129–151.

Christersson L., Sennerby-Forsse L., Zsuffa L. The role and significance of woody biomass plantations in Swedish agriculture // Forestry Chronicle. 1993. Vol. 69 (6). P. 687–693.

Examining the salt tolerance of willow (*Salix* spp.) bioenergy species for use on saltaffected agricultural lands / R. D. Hangs, J. J. Schoenau, K. C. J. Van Rees, H. Steppuhn. // Can. J. Plant Sci. 2011. Vol. 91. P. 509–517.

Heinsoo K., Sild E., Koppel A. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations // For. Ecol. Manage. 2002. Vol. 170. P. 67–74.

Mitch W. J., Gosselink J. G. Wetlands. 3rd edn. John Wiley & Sons, New York, 2000. 920 p.

Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles / M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworowski, A. Klasa // Biomass Bioenergy. 2008. Vol. 32. P. 1227–1234.

Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field / C. Keller, D. Hammer, A. Kayser, W. Richner, M. Brodbeck, M. Sennhauser // Plant Soil. 2003. Vol. 249. P. 67–81.

Sensitivity of above-ground biomass estimates to height-diameter modelling in mixed-species West African woodlands / R. Valbuena, J. Heiskanen, E. Aynekulu, S. Pitkänen, P. Packalen // PLoS ONE. 2016. Vol. 11(7). Article e0158198.

Zianis D., Mencuccini M. Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp. // Annals of Forest Science. 2003. V. 60. P. 439–448.

References

A review of biomass equations for China's tree species / Y. Luo, X. Wang, Z. Ouyang, F. Lu, L. Feng, J. Tao // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12(1). P. 21–40. <https://doi.org/10.5194/essd-12-21-2020>

Assessment of willow (*Salix* sp.) as a woody heavy metal accumulator : Field survey and in vivo X-ray analyses / E. Harada, A. Hokura, I. Nakai, Y. Terada, K. Baba, K. Yazaki, M. Shiono, N. Mizuno, T. Mizuno // Metallomics. 2011. Vol. 3. P. 1340–1346.

Chojnacky D. C., Heath L. S., Jenkins J. C. Updated generalized biomass equations for North American tree species // *Forestry*. 2014. Vol. 87. P. 129–151.

Christersson L., Sennerby-Forsse L., Zsuffa L. The role and significance of woody biomass plantations in Swedish agriculture // *Forestry Chronicle*. 1993. Vol. 69 (6). P. 687–693.

Examining the salt tolerance of willow (*Salix* spp.) bioenergy species for use on saltaffected agricultural lands / R. D. Hangs, J. J. Schoenau, K. C. J. Van Rees, H. Steppuhn. // *Can. J. Plant Sci.* 2011. Vol. 91. P. 509–517.

Foliage Biomass of the forests of Eurasia: correction of empirical modeling methods / V. A. Usoltsev, V. F. Kovyazin, I. S. Tsepordey, V. P. Chasovskikh, V. A. Azarenok // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2020. Issue. 232. P. 50–78

Gusev I. I. *Ecosystem modeling* : textbook. Arkhangelsk : Publishing House of AGTU, 2002. 112 p.

Heinsoo K., Sild E., Koppel A. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations // *For. Ecol. Manage.* 2002. Vol. 170. P. 67–74.

Mina N. V., Klevezal G. A. *Animal growth*. Moscow : Nauka, 1976. 291 p.

Mitch W. J., Gosselink J. G. *Wetlands*. 3rd edn. John Wiley & Sons, New York, 2000. 920 p.

Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles / M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworowski, A. Klasa // *Biomass Bioenergy*. 2008. Vol. 32. P. 1227–1234.

Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field / C. Keller, D. Hammer, A. Kayser, W. Richner, M. Brodbeck, M. Sennhauser // *Plant Soil*. 2003. Vol. 249. P. 67–81.

Sensitivity of above-ground biomass estimates to height-diameter modelling in mixed-species West African woodlands / R. Valbuena, J. Heiskanen, E. Aynekulu, S. Pitkänen, P. Packalen // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11 (7). Article e0158198.

Smirnov V. V. *Organic mass in some forest phytocenoses of the European part of the USSR*. Moscow : Nauka, 1971. 362 p.

Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Noritsin D. V. Allometric models of single-tree biomass for forest-forming species of the Urals // *Forests of Russia and economy in them*. 2022. № 1. P. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001

Zhizhin S. M., Magasumova A. G., Opletaev A. S. Overgrowth of woody vegetation of agricultural lands in the southern taiga subzone of the Republic of Udmurtia // *Bulletin of the Buryat Agricultural Academy*. 2021. Issue 2 (63). P. 84–91.

Zianis D., Mencuccini M. Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp. // *Annals of Forest Science*. 2003. Vol. 60. P. 439–448.

Информация об авторах

А. А. Парамонов – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник,

a.paramonov@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>;

В. А. Усольцев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор,

Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>;

С. В. Третьяков – доктор сельскохозяйственных наук, профессор,

s.v.tretyakov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>;

С. В. Коптев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор,

s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>;

А. А. Карабан – лаборант-исследователь, аспирант,

karaban@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>;

И. В. Цветков – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник,
i.tsvetkov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>;

А. В. Давыдов – лаборант-исследователь, магистрант,
davydov.a@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>;

И. С. Цепордей – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник,
ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>.

Information about the authors

A. A. Paramonov – candidate of agricultural sciences, researcher,
a.paramonov@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>;

V. A. Usoltsev – doctor of agricultural sciences, professor,
Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>;

S. V. Tretyakov – doctor of agricultural sciences, professor,
s.v.tretyakov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>;

S. V. Koptev – doctor of agricultural sciences, professor,
s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>;

A. A. Karaban – laboratory researcher, post-graduate student,
karaban@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>;

I. V. Tsvetkov – candidate of agricultural sciences, associate professor, senior researcher,
i.tsvetkov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>;

A. V. Davydov – laboratory researcher, Master's student,
davydov.a@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>;

I. S. Tsepordey – candidate of agricultural sciences, researcher,
ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>.

Статья поступила в редакцию 25.11.2022; принята к публикации 07.12.2022.

The article was submitted 25.11.2022; accepted for publication 07.12.2022.
