

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2(89). С. 177–188.

Forests of Russia and economy in them. 2024. № 2 (89). P. 177–188.

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.019

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА БИОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ ОЛЬХИ СЕРОЙ В УСЛОВИЯХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Алексей Александрович Карабан¹, Владимир Андреевич Усольцев²,
Сергей Васильевич Третьяков³, Сергей Викторович Коптев⁴,
Андрей Алексеевич Парамонов⁵, Илья Васильевич Цветков⁶,
Александр Владимирович Давыдов⁷, Иван Степанович Цепордей⁸

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

^{1, 3, 4, 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 Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Владимир Андреевич Усольцев,
Usoltsev50@mail.ru

Аннотация. За последние десятилетия концентрация парниковых газов в атмосфере растет беспрецедентными темпами вследствие использования ископаемого топлива и возрастающих темпов сведения лесов. Благодаря своей способности производить большое количество биомассы за короткий промежуток времени ольха серая может рассматриваться как перспективная древесная порода для ведения лесного хозяйства с коротким периодом выращивания в восточных и северных регионах Европы. Ольховые насаждения выполняют почвозащитные, почвоулучшающие, мелиоративные функции, в значительной мере регулируют стоки, предотвращают образование снежных лавин и селевых потоков. Ольха серая обладает рядом существенных лесоводственных преимуществ. Целью наших исследований было получение фактических данных о структуре биомассы ольхи серой, произрастающей в условиях северной тайги Архангельской области, разработка моделей возрастной динамики ее фракций на уровне древостоев и сравнительный анализ полученных результатов с данными о продуктивности ольхи серой в других регионах. По данным перечета деревьев всех пород на 40 пробных площадях по ступеням толщины рассчитаны основные таксационные показатели древостоев в возрасте от 20 до 77 лет, а также запасы биомассы на 1 га с использованием опубликованных аллометрических моделей. Построенные модели таксационных показателей и фракций биомассы, связанные между собой по рекурсивному принципу, адекватны фактическим данным на уровне вероятности $p < 0,001$. Сопоставление средних значений таксационных показателей и биомассы на 1 га сероольшаников северной и южной тайги показало, что при больших значениях среднего диаметра ствола и средней

высоты древостои южной тайги имеют соответственно и большие запасы, чем в северной тайге. Но вследствие специфики структуры массы крон и корней ольшаники южной тайги характеризуются меньшими значениями как надземной, так и общей биомассы. Предложенные модели и таблицы могут быть полезны при оценке углероддепонирующей способности сероольшаников северной и южной тайги.

Ключевые слова: *Alnus incana* (L.) Moench., биомасса древостоев, компоненты биомассы, рекурсивные модели, возрастная динамика биомассы, подзоны северной и южной тайги

Финансирование: публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства. Регистрационный номер темы: 123022800113-9.

Для цитирования: Возрастная динамика биомассы древостоев ольхи серой в условиях Архангельской области / А. А. Карабан, В. А. Усольцев, С. В. Третьяков [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2 (89). С. 177–188.

Original article

AGE DYNAMICS OF BIOMASS OF GRAY ALDER STANDS IN THE CONDITIONS OF THE ARKHANGELSK REGION

Alexey A. Karaban¹, Vladimir A. Usoltsev², Sergey V. Tretyakov³, Sergey V. Koptev⁴,
Andrey A. Paramonov⁵, Ilya V. Tsvetkov⁶, Alexander V. Davydov⁷, Ivan S. Tsepordey⁸

^{1,3-7} Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia

^{1,3,4,6,7} Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

² Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

^{1,8} Botanical Garden, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Vladimir A. Usoltsev,
Usoltsev50@mail.ru

Abstract. Over the past decades, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has been growing at an unprecedented rate due to the use of fossil fuels and the increasing rate of deforestation. Due to its ability to produce a large amount of biomass in a short period of time, gray alder can be considered as a promising tree species for forestry with a short growing period in the eastern and northern regions of Europe. Alder plantations perform soil-protective, soil-improving, reclamation functions, largely regulate runoff, prevent the formation of snow avalanches and mudflows. Gray alder has a number of significant forestry advantages. The purpose of our research was to obtain the data on the biomass structure of gray alder growing in the conditions of the northern taiga of the Arkhangelsk region, to develop models of the age dynamics of its fractions at the level of stands and a comparative analysis of the results obtained with data on the productivity of gray alder in other regions. According to the measurement data of trees of all species on 40 sample plots, the main taxation indicators of stands aged from 20 to 77 years, as well as biomass per 1 ha using published allometric models, were calculated using stem diameter distributions. The models of taxation indicators and biomass fractions, related according to the recursive principle adequate to the actual data at the probability level $p < 0.001$ are designed. A comparison of the average values of taxation indicators and biomass per 1 ha of gray alder stands of the northern and southern taiga showed that with large values of the average stem diameter and average height, stands of the southern taiga have, respectively, large stem volumes relative to the

northern taiga. But due to the specific structure of the crown and root masses, the alders of the southern taiga are characterized by lower values of both aboveground and total biomass. The proposed models and tables can be useful in assessing the carbon-depositing capacity of gray alder in the northern and southern taiga subzones.

Keywords: *Alnus incana* (L.) Moench., biomass of stands, components of biomass, recursive models, age dynamics of biomass, northern and southern taiga subzones

Funding: the publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state task of the FBU “SevNIILH” for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency. Registration number of the topic: 123022800113-9.

For citation: Age dynamics of biomass of gray alder stands in the conditions of the Arkhangelsk region / A. A. Karaban, V. A. Usoltsev, S. V. Tretyakov [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2024. №. 2 (89). P. 177–188.

Введение

За последние десятилетия концентрация парниковых газов в атмосфере растет беспрецедентными темпами вследствие использования ископаемого топлива и возрастающих темпов сведения лесов (Tuskan, Walsh, 2001; Лескинен и др., 2020). Более 65 % общего потенциала смягчения последствий изменения климата могут быть достигнуты за счет накопления углерода в лесных экосистемах, а остальные 35 % – за счет замещения ископаемого топлива возобновляемыми ресурсами (Roe et al., 2019; Леса России..., 2020). Благодаря своей способности производить большое количество биомассы за короткий промежуток времени ольха серая может рассматриваться как перспективная древесная порода для ведения лесного хозяйства с коротким периодом выращивания в восточных и северных регионах Европы (Aosaar et al., 2012). Даже в относительно спелом возрасте (29 лет) среднегодовой прирост древостоев ольхи серой на 17 % выше, чем у осины, и на 35 % выше, чем у ольхи черной и у березы (Lohmus et al., 1996), и в лучших условиях произрастания может достигать годичной продукции до 17 т на 1 га (Aosaar et al., 2012). При рубке ольхи серой в возрасте 15–20 лет можно получить вдвое больше древесины с гектара, чем при рубке осины, березы и ольхи черной в соответствующем возрасте, что служит основанием рекомендовать ольху серую в качестве перспективной породы для производства энергетической древесины с оборотом рубки 15–20 лет (Daugavietis et al., 2009).

Ольховые насаждения выполняют почвозащитные, почвоулучшающие, мелиоративные функции, в значительной мере регулируют стоки, предотвращают образование снежных лавин и селевых потоков. Ольха серая обладает рядом существенных лесоводственных преимуществ. Сеянцы серой ольхи выдерживают прямые солнечные лучи и морозы; у них наблюдается лишь небольшое количество вредителей и болезней. После рубки новое поколение ольхи появляется как из корневых отпрысков, так и из поросли, благодаря чему не требуется искусственное лесовосстановление сплошных вырубок.

Ольха является одной из ведущих древесных пород, обладающих способностью к азотфиксации (Судницына, 2009; Романов, 2011), в связи с чем играет существенную роль в развитии растительных сукцессий (Crocker, Dickson, 1957; Hurd, 1971). Благодаря этой особенности она успешно применяется для облесения отвалов и при создании лесных культур (Банаев, 2010).

С учетом фитомелиоративных свойств ольхи серой предполагается, что в условиях потепления климата для ее разведения могут быть пригодны почвы лесотундры. Поглощая азот и углекислый газ из атмосферы, ольха серая постепенно улучшает состояние почв лесотундры и сформирует насаждения, способные дать возможность для последующего произрастания березняков и осинников, а в дальнейшем и ельников (Потенциал..., 2021). Благодаря своей способности к симбиотической азотфиксации ольха серая способна

покрывать значительную часть своей годовой потребности в азоте за счет азота из атмосферы (Aosaar et al., 2012) и при выращивании совместно с другими породами оказывает благотворное влияние на формирование у них микоризы (Gaitnieks et al., 2000).

Цель, методика и объекты исследования

Цель наших исследований – получение фактических данных о структуре биомассы ольхи серой, произрастающей в условиях северной тайги Архангельской области, разработка моделей возрастной динамики ее фракций на уровне древостоев и сравнительный анализ полученных результатов с данными о продуктивности ольхи серой в других регионах.

Сбор полевого материала проводился с июня по сентябрь в 2020 и 2021 гг. на территории лесничеств Архангельской области в Приморском, Красноборском и Каргопольском районах (61,5–64,9° с. ш., 38,9–45,9° в. д.). Подбирались чистые древостои или с примесью (до 30 %) других пород. Было заложено 40 пробных площадей в возрастном диапазоне от 20 до 77 лет. Пробные площади закладывали в соответствии с ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустойчивые».

По данным перечета деревьев всех пород на каждой пробной площади по ступеням толщины рассчитаны основные таксационные показатели древостоев, а также запасы биомассы на 1 га с использованием имеющихся аллометрических моделей для ольхи серой (Биомасса..., 2023) и ивы древовидной (Биомасса..., 2022) Архангельской области. Для остальных пород использованы аллометрические модели, опубликованные для лесов Урала (Усольцев и др., 2022). Полная характеристика полученных данных о фракционном составе биомассы на 40 пробных площадях ольхи серой дана в табл. 1.

При моделировании возрастной динамики биомассы ольхи серой за основу взята методика построения аналогичной модели и таблицы возрастной динамики биомассы ивы в Архангельской области как рекурсивной системы связанных

регрессионных уравнений (Возрастная динамика..., 2023). Названная система имеет общий вид

$$\begin{aligned} \ln D \text{ и } \ln H &= a_0 + a_1 (\ln A) - a_2 (\ln A)^2 \rightarrow \\ \rightarrow \ln N &= a_0 + a_1 (\ln A) - a_2 (\ln A)^2 - a_3 (\ln D) \rightarrow \\ \rightarrow \ln M &= a_0 + a_1 (\ln A) - a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln D) + a_4 (\ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Ps &= a_0 + a_1 (\ln A) - a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln D) + a_4 (\ln N) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Pbk &= a_0 - a_1 (\ln D) + a_2 (\ln Ps) \rightarrow \\ \rightarrow \ln Pb, \ln Pf, \ln Pr, \ln Pa \text{ и } \ln Pt &= \\ &= a_0 + a_1 (\ln A) - a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln D) + a_4 (\ln N). \quad (1) \end{aligned}$$

В предыдущей публикации, посвященной моделированию возрастной динамики биомассы ивняков Архангельской области, возрастной диапазон был небольшим, от 15 до 40 лет, вследствие чего связь анализируемых показателей с возрастом в логарифмированном виде, представленная аллометрической функцией, имела линейный вид. В анализируемом варианте с биомассой ольхи возрастной диапазон существенно шире – от 20 до 77 лет. Поскольку предельный возраст ольхи серой обычно 50–60 лет, то в последние десятилетия рост ольшаников по всем показателям начинает замедляться (Ткаченко и др., 1939). Соответственно, возрастные закономерности анализируемых показателей начинают выходить на плато и зависимости в логарифмированном виде приобретают нелинейный вид. Эта нелинейность описывается путем включения в модели в качестве независимых переменных не только члена $(\ln A)$, но также $(\ln A)^2$, т. е. описывается логарифмированным полиномом второго порядка, или функцией Корсуна – Бакмана (Korsun, 1935; Backman, 1938).

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета системы моделей (1) сведены в табл. 2. Независимые переменные в моделях (1) объясняют от 63,5 до 99,8 % изменчивости соответствующих зависимых переменных (см. табл. 2). О степени адекватности системы моделей (1) можно также судить по соотношению эмпирических и расчетных значений надземной и общей биомассы древостоев, которое показывает достаточно высокую адекватность модели и наличие равномерной остаточной дисперсии (рисунок).

Таблица 1
Table 1

Фактические данные о биомассе древостоев ольхи серой, заложённых на 40 пробных площадях Архангельской области
Empirical data on the biomass of gray alder stands established on 40 sample plots of the Arkhangelsk region

№ ПП	Состав Species composition	A	N	D	H	M	Биомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га Biomass in dry condition, t per ha						
							Ps	Pbk	Pb	Pf	Pa	Pr	Pt
1	9Ол1Ив, ед Б, Чер	20	4675	11,4	14,4	293,4	121,5	18,6	19,6	3,0	142,9	25,2	168,1
2	9Ол1Ив, ед Е	23	2525	12,0	15,3	195,3	82,6	12,2	12,4	2,0	95,7	14,8	110,5
3	7Ол2Ив1Ос, ед Е, Б	24	4825	7,5	11,8	121,9	51,2	8,3	8,4	1,6	60,7	11,7	72,4
4	10Ол, ед С, Б, Ив	25	3625	9,0	9,4	139,8	58,6	9,5	9,0	1,6	68,6	10,4	79,0
5	8Ол2Ив, ед Е, Б, Ос	25	5200	7,3	9,2	121,7	50,5	8,5	8,3	1,6	60,1	11,0	71,1
6	9Ол1Ив, ед Е, Ряб	25	5350	10,7	13,9	311,8	129,4	19,6	20,9	3,4	151,8	25,8	177,6
7	7Ол3Ив	25	8100	6,7	9,1	166,3	68,6	11,0	11,4	1,9	81,3	15,6	96,9
8	8Ол2Ив, ед Е	26	3825	11,6	12,6	269,2	112,8	16,9	17,7	2,9	131,8	22,4	154,1
9	7Ол3Ив	26	6325	6,6	8,6	120,6	50,2	8,3	8,0	1,4	59,3	10,8	70,1
10	10Ол, ед Ив	26	4200	9,1	10,0	161,5	67,0	11,0	10,3	1,8	78,6	11,6	90,2
11	10Ол, ед Б, Ив	27	4825	9,0	13,5	186,1	77,9	12,5	11,7	2,0	90,8	13,3	104,2
12	8Ол2Ив, ед Б	28	4400	7,6	11,1	118,8	49,4	7,8	7,9	1,3	58,0	10,5	68,5
13	10Ол, ед Ив	28	5375	8,3	14,6	176,3	73,6	12,0	11,1	1,9	85,9	12,1	98,0
14	8Ол2Ив, ед Б, Ос	29	5700	8,2	11,7	181,1	75,2	11,9	12,2	2,0	88,7	16,5	105,3
15	9Ол1Ив	29	6975	8,4	12,6	240,2	100,3	15,8	15,4	2,6	117,2	18,3	135,5
16	9Ол1Ив, ед Б	29	4875	9,6	12,9	224,8	94,4	14,4	14,5	2,3	110,0	18,4	128,4
17	10Ол, ед Б, Ив	29	6375	7,2	13,1	148,2	61,3	10,4	9,4	1,7	72,0	10,1	82,1
18	8Ол1Ив1Ос, ед Б	29	5250	9,0	12,5	205,9	87,3	13,8	14,1	2,5	103,2	18,6	121,8
19	9Ол1Ив, ед Б, Ос	30	6175	8,0	12,1	186,7	77,3	12,4	12,3	2,1	91,0	15,3	106,4
20	8Ол2Ив, ед Ос	30	2825	10,8	13,1	177,9	74,1	10,7	12,2	1,7	86,8	16,4	103,3
21	7Ол2Ив1Ос, ед Е, Б	30	3750	11,9	15,3	279,4	121,4	18,4	19,9	3,7	143,3	25,7	168,9
22	7Ол2Ив1Б, ед Е, Ос	30	5075	13,1	16,8	501,9	211,1	30,9	38,5	12,1	257,5	44,5	302,0

Окончание табл. 1
The end of table 1

№ ПП	Состав Species composition	A	N	D	H	M	Биомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га Biomass in dry condition, t per ha						
							Ps	Pbk	Pb	Pf	Pa	Pr	Pt
23	8Ол2Ив	32	5275	10,0	14,4	272,5	112,2	16,8	18,7	2,7	132,2	24,4	156,6
24	7Ол3Ив, ед Б	32	4450	11,0	13,5	287,5	121,6	17,3	20,6	2,9	143,2	30,9	174,2
25	8Ол1Ив1Ос, ед Е, Б	33	2650	14,3	18,5	316,3	150,6	21,9	23,5	4,1	175,6	30,2	205,8
26	9Ол1Ив	34	5075	8,5	12,1	172,9	72,1	11,7	11,1	1,9	84,5	13,2	97,7
27	8Ол1Е1Б, ед С, Ос, Ив, Ряб, Чер	35	3275	15,2	15,3	441,1	186,7	27,0	29,4	6,8	219,2	32,5	251,7
28	9Ол1Е ед Б, Ос, Ив	35	4650	13,8	14,8	505,1	215,1	31,5	34,4	8,3	253,7	37,8	291,4
29	10Ол, ед С, Ив	35	2325	17,4	16,9	453,4	194,6	25,3	28,7	3,6	222,0	36,9	258,9
30	8Ол2Ив, ед С, Е, Ос	36	1925	17,1	18,8	357,2	153,6	20,3	25,1	3,5	178,5	34,0	212,4
31	7Ол3Ив, ед Б	38	4825	11,8	14,5	380,3	155,1	21,3	27,8	3,5	183,5	39,8	223,3
32	10Ол, ед Е, Б, Ос, Ив	38	3725	15,6	20,1	543,0	248,7	35,3	37,7	7,0	288,5	46,3	334,8
33	9Ол1Ив, ед Е	40	3275	13,6	16,0	339,3	143,4	20,8	21,9	3,7	166,5	26,3	192,8
34	7Ол2Ив1Ос, ед Е, Б	40	3225	12,8	15,4	304,8	130,5	19,3	25,0	7,3	160,2	29,4	189,7
35	7Ол1Е1Б1Ив	45	1525	22,0	24,7	517,2	294,0	38,8	48,9	8,5	342,4	64,5	407,0
36	7Ол2Ив1Ос, ед Е	48	1750	21,4	20,6	574,0	250,1	31,4	42,2	6,8	292,6	54,1	346,6
37	9Ол1Е ед Б, Ос	48	3475	16,7	16,6	588,4	255,2	35,4	37,8	6,7	294,2	44,5	338,7
38	7Ол1Б1Ив1Чер, ед Е	50	5225	13,7	15,6	569,8	247,2	34,8	40,7	7,5	290,7	53,6	344,2
39	8Ол2Е, ед Б, Ряб, Чер	51	3875	14,6	17,8	483,1	202,9	29,6	33,6	8,9	241,1	35,7	276,9
40	9Ол1Е, ед С, Ив	77	1750	21,9	23,6	565,6	242,4	30,9	36,8	5,5	278,0	46,2	324,2

Примечание. A – возраст древостоя, лет; D – средний диаметр древостоя, см; H – средняя высота древостоя, м; N – число деревьев на 1 га; Ps – биомасса ствола в коре, т/га; M – запас ствольной древесины в коре, м³/га; P_s, P_{bk}, P_b, P_f, P_r, P_a и P_t – биомасса соответственно ствола в коре, коры ствола, ветвей, листьев, корней, надземная и общая, т/га.

Note. A – is the age of the stand, years; D – is the average diameter of the stand, cm; H – is the average height of the stand, m; N – is the number of trees per 1 ha; M – is the volume stock of stem over bark, m³/ha; P_s, P_{bk}, P_b, P_f, P_r, P_a and P_t – are the biomass of the stem over bark, stem bark, branches, foliage, roots, aboveground and total, t/ha, respectively.

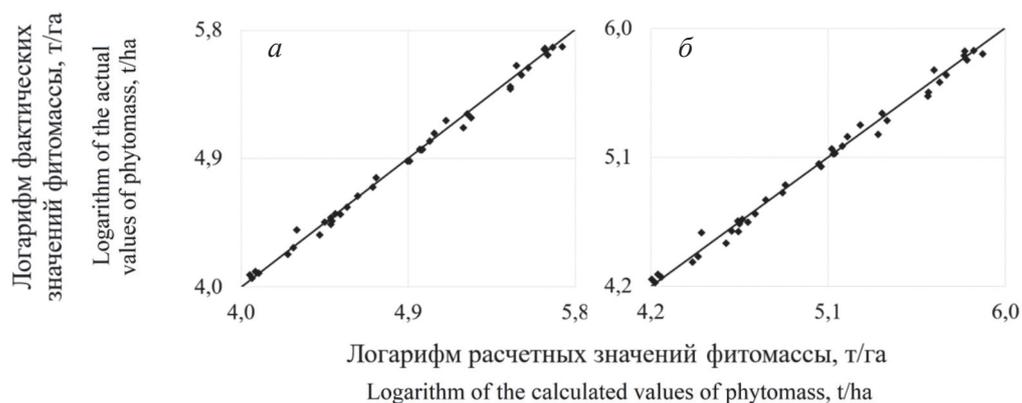
Таблица 2
Table 2

Характеристика рекурсивной системы моделей (1)
Characteristics of recursive models (1)

Зависимая переменная Dependent variable	Коэффициенты Coefficients						adjR ² *	SE*
	a ₀	a ₁ (ln A)	a ₂ (ln A) ²	a ₃ (ln D)	a ₄ (ln N)	a ₅ (ln Ps)		
ln D	-10,1938	5,9708	-0,6710	-	-	-	0,655	0,20
ln H	-7,6106	4,9460	-0,5716	-	-	-	0,635	0,15
ln N	1,0660	5,3192	-0,6760	-1,2525	-	-	0,724	0,21
ln M	-9,8736	0,8269	-0,1074	2,3492	0,9903	-	0,998	0,02
ln Ps	-11,2460	1,1064	-0,1480	2,3984	0,9802	-	0,996	0,03
ln Pbk	-1,3626	-	-	-0,2146	-	0,9960	0,996	0,03
ln Pb	-14,8893	1,9597	-0,2625	2,4108	1,054	-	0,982	0,07
ln Pf	-18,6781	2,4648	-0,3190	2,4701	1,1035	-	0,918	0,16
ln Pr	-13,8026	2,2388	-0,3001	2,2987	0,8730	-	0,930	0,14
ln Pa	-11,8142	1,8235	-0,2432	2,3484	0,9221	-	0,990	0,05
ln Pt	-11,7161	1,8975	-0,2533	2,3408	0,9153	-	0,987	0,06

* adjR² – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения; n – число наблюдений. В свободный член введена поправка на логарифмирование (Baskerville, 1972).

* adjR² – the coefficient of determination adjusted for the number of variables; SE – the standard error of the equation; n – is the number of observations. An amendment to logarithm was introduced into the free term (Baskerville, 1972).



Соотношение фактических и расчетных значений надземной (а) и общей (б) биомассы сероольшаников Архангельской области
The ratio of empirical and calculated values of aboveground (a) and total (b) willow biomass of the Arkhangelsk region

Последовательным табулированием системы моделей (1) (в направлении, показанном стрелками), представленных в табл. 2, мы получили таблицу возрастной динамики таксационных показателей и фракций биомассы ольхи серой в возрастном диапазоне от 20 до 80 лет (табл. 3).

Одной из задач исследования было сравнение полученных результатов с данными из других ре-

гионов. Насколько нам известно, единственные пригодные для такого сравнения данные биомассы ольхи серой опубликованы для условий южной тайги в возрасте древостоев от 3 до 50 лет в количестве 23 пробных площадей (Гульбе, 1986, 1988; Гульбе и др., 2008). Это древостои естественного происхождения, возникшие в основном на залежи, чистые или с примесью (до 10–20 %)

других пород. Средний возраст 16 лет, т. е. вдвое меньше среднего возраста сероольшаников в северной тайге. Для сопоставления биомассы сероольшаников двух подзон необходимо привести их к сопоставимому виду и сравнивать при условии равенства средних возрастов. С этой целью применен расчет модели (1) как для северной, так и для южной тайги с введением в модель (1) бинарной переменной X , равной 0 для древостоев северной тайги и 1 для древостоев южной

тайги. Коэффициенты детерминации «сводных» моделей оказались практически такими же, как в модели (1) для сероольшаников северной тайги (см. табл. 2). Путем последовательного табулирования полученных моделей по задаваемому возрасту при $X=0$ и $X=1$ получили таблицы возрастной динамики таксационных показателей и биомассы сероольшаников для двух подзон. Результаты их сравнения при одном и том же возрасте (принят 40 лет) приведены в табл. 4.

Таблица 3
Table 3

Возрастная динамика биомассы древостоев ольхи серой Архангельской области
Age dynamics of gray alder stands biomass in the Arkhangelsk region

A, лет A, years	D, см D, sm	H, м H, m	N, экз./га N, trees/ha	M, м³/га M, m³/ha	Биомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га* Biomass in dry condition, t per ha*						
					Ps	Pbk	Pb	Pf	Pa	Pr	Pt
20	5,3	8,0	6911	75,3	30,4	5,4	7,2	0,8	38,4	5,9	44,2
30	10,5	13,5	4411	252,6	106,8	16,2	25,9	3,0	135,7	21,6	157,3
40	14,9	17,4	3315	440,4	189,6	26,6	45,7	5,4	240,7	38,8	279,5
50	18,1	19,9	2706	569,9	246,6	33,2	58,5	7,1	312,2	50,3	362,5
60	20,2	21,3	2320	628,7	271,7	35,7	63,1	7,7	342,4	54,8	397,3
70	21,4	21,9	2055	631,3	271,4	35,2	61,5	7,5	340,5	54,0	394,5
80	21,9	21,9	1862	597,6	255,1	32,9	56,4	6,9	318,3	50,0	368,3

* Значение надземной биомассы P_a получено сложением расчетных значений биомассы ствола в коре, ветвей и листвы, а значение общей биомассы P_t – сложением значений P_a и P_r .

* The value of the aboveground biomass of P_a is obtained by adding the calculated values of the biomass of the stem over the bark, branches and foliage, and the value of the total biomass of P_t is obtained by adding the values of P_a and P_r .

Таблица 4
Table 4

Различия показателей между южной и северной тайгой
The difference in indicators between the southern and northern taiga

D, см D, cm	H, м H, m	N, экз./га N, trees/ha	M, м³/га M, m³/ha	Биомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га Biomass in dry condition, t per ha							
				Ps	Pbk	Pb	Pf	Pa	Pr	Pt	
Северная тайга (данные авторов) Northern taiga (authors' data)											
13,8	16,2	3211	363,4	155,5	22,0	24,5	4,1	183,2	30,9	213,4	
Южная тайга (Гульбе, 1986, 1988; Гульбе и др., 2008) Southern taiga (Gulbe, 1986, 1988; Gulbe et al., 2008)											
16,7	18,5	2004	403,9	157,1	14,5	16,5	3,7	176,6	18,6	211,9	
Различия показателей между южной и северной тайгой The difference in indicators between the southern and northern taiga											
2,9	2,3	-1207	40,5	1,6	-7,5	-8,0	-0,4	-6,6	-12,3	-1,5	
Достоверность различия (t) между данными двух подзон The validity of the difference (t) between the data of the two subzones											
2,4	2,0	2,3	2,5	1,0	12,2	7,3	1,1	0,4	4,6	0,3	

Согласно табл. 4 в возрасте 40 лет сероольшаники южной тайги имеют средние диаметры ствола, средние высоты и запасы большие, а густоты, напротив, меньшие по сравнению с таковыми древостоев северной тайги, и эти различия статистически достоверны. Меньшие биомассы ветвей и листвы в южной тайге обусловили и меньшие значения надземной биомассы, а меньшие значения биомассы корней обусловили и меньшую общую биомассу древостоев в южной тайге. Таким образом, при больших значениях среднего диаметра ствола и средней высоты древостои южной тайги имеют соответственно и большие запасы, чем в северной тайге. Но вследствие специфики структуры массы крон и корней ольшаники южной тайги характеризуются меньшими значениями как надземной, так и общей биомассы. Правда, на статистически значимом уровне это не подтверждается.

Заключение

Таким образом, по данным перечета деревьев по полному породному составу и ступеням толщины на 40 пробных площадях в возрастном

диапазоне от 20 до 77 лет с использованием аллометрических моделей подеревной биомассы ольшаников составлена таблица возрастной динамики таксационных показателей и фракционного состава биомассы ольхи серой подзоны северной тайги в диапазоне возрастов от 20 до 80 лет. Построенные модели таксационных показателей и фракций биомассы, связанные между собой по рекурсивному принципу, объясняют от 63,5 до 99,8 % изменчивости соответствующих зависимых переменных. Сравнение полученных результатов с таковыми сероольшаников южной тайги показало, что при больших значениях среднего диаметра ствола и средней высоты древостои южной тайги имеют соответственно и большие запасы, чем в северной тайге. Но вследствие специфики структуры массы крон и корней ольшаники южной тайги характеризуются меньшими значениями как надземной, так и общей биомассы. Предложенные модели и таблицы могут быть полезны при оценке углероддепонирующей способности сероольшаников северной и южной тайги.

Список источников

- Банаев Е. В. Род *Alnus* Mill. (*Betulaceae*) в Азиатской России: популяционная структура видов и сохранение генофонда : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.02.01 / Банаев Евгений Викторович. Томск : ТГУ, 2010. 32 с.
- Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области / А. А. Парамонов, В. А. Усольцев, С. В. Третьяков [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 4. С. 10–19.
- Биомасса деревьев ольхи серой и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области / А. А. Карaban, В. А. Усольцев, С. В. Третьяков [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3 (86). С. 51–64. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.006
- Возрастная динамика биомассы ивняков Архангельской области / А. А. Парамонов, В. А. Усольцев, С. В. Третьяков [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 1. С. 19–29.
- Гульбе Я. И. Биологическая продуктивность и вертикально-фракционная структура сероольшаников неморально-кисличной группы типов // Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах. М. : Наука, 1986. С. 51–76.
- Гульбе Я. И. Фракционная структура фитомассы и годичной продукции древостоев и деревьев серой ольхи // Анализ продукционной структуры древостоев. М. : Наука, 1988. С. 85–103.
- Гульбе А. Я., Гульбе Я. И., Гульбе Т. А. Надземная фитомасса и годичная продукция древостоев ольхи серой на брошенной пашне в подзоне южной тайги (Ярославская область) // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск : БГИТА, 2008. Вып. 21. С. 25–29.
- Леса России и изменение климата / П. Лескинен, М. Линднер, П. Й. Веркерк [и др.] (ред.) // Что нам может сказать наука. Европейский институт леса. 2020. № 11. 140 с.

- Потенциал фитомелиоративных свойств сероольшаников сухопутной территории Арктики для лесоразведения в лесотундре / А. В. Давыдов, С. В. Третьяков, С. В. Контев [и др.] // Интенсификация использования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока : матер. Всерос. науч. конф. / отв. ред. А. Ю. Алексеенко. Хабаровск : ДальНИИЛХ, 2021. С. 120–125.
- Романов Г. Г. Симбиотическая азотфиксация ольхи серой в условиях средней подзоны тайги // ИВУЗ. Лесной журнал. 2011. № 3. С. 39–44.
- Судницына Т. Н. Влияние ольхи серой на азотное питание, освещенность и рост ели европейской в культурах // Лесоведение. 2009. № 1. С. 18–24.
- Ткаченко М. Е., Асосков А. И., Синев В. Н. Общее лесоводство. Л. : Гослестехиздат, 1939. 746 с.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицин Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14.
- Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review // Biomass and Bioenergy. 2012. Vol. 45. P. 11–26.
- Backman G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's) // Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen. 1938. № 138. P. 37–58.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.
- Contribution of the land sector to a 1,5°C world / S. Roe, C. Streck, M. Obersteiner [et al.] // Nature Climate Change. 2019. Vol. 9. P. 817–828.
- Crocker R. L., Dickson B. A. Soil development on the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall glaciers, southeastern Alaska // Journal of Ecology. 1957. Vol. 45. P. 169–185.
- Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J. Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia // Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009. P. 229–234.
- Development of Norway spruce mycorrhiza in mixed Norway spruce and grey alder stands infected by *Heterobasidion annosum* / T. Gaitnieks, I. Liepa, B. Rokjānis [et al.] // Forest. Stud. (Tartu). 2000. Vol. 34. P. 44–51.
- Hurd R. M. Annual tree-litter production by successional forest stands, Juneau, Alaska // Ecology. 1971. Vol. 52. P. 881–884.
- Korsun F. Život normalniho porosru ve vzorcich // Lesnická práce. 1935. Vol. 14. P. 289–300.
- Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia / K. Lohmus, U. Mander, H. Tullus [et al.] // Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996. P. 95–105.
- Tuskan G. A., Walsh M. E. Short-rotation woody crop systems, atmospheric carbon dioxide and carbon management : A U.S. case study // The Forestry Chronicle. 2001. Vol. 77. № 2. P. 259–264.

References

- Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review // Biomass and Bioenergy. 2012. Vol. 45. P. 11–26.
- Backman G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's) // Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen. 1938. № 138. P. 37–58.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.

- Biomass of gray alder trees and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region / *A. A. Karaban, V. A. Usoltsev, S. V. Tretyakov* [et al.] // *Forests of Russia and the economy in them*. 2023. № 3. № 3 (86). P. 51–64. DOI : 10.51318/FRET.2023.3.86.006. (In Russ.)
- Contribution of the land sector to a 1,5°C world / *S. Roe, C. Streck, M. Obersteiner* [et al.] // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 817–828.
- Crocker R. L., Dickson B. A.* Soil development on the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall glaciers, southeastern Alaska // *Journal of Ecology*. 1957. Vol. 45. P. 169–185.
- Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J.* Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia // *Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development*. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009. P. 229–234.
- Development of Norway spruce mycorrhiza in mixed Norway spruce and grey alder stands infected by *Heterobasidion annosum* / *T. Gaitnieks, I. Liepa, B. Rokjānis* [et al.] // *Forest. Stud. (Tartu)*. 2000. Vol. 34. P. 44–51.
- Gulbe A. Ya., Gulbe Ya. I., Gulbe T. A.* Aboveground biomass and annual production of stands of gray alder on abandoned arable land in the subzone of the southern taiga (Yaroslavl region) // *Actual problems of the forest complex*. Issue 21. Bryansk : BGITA, 2008. P. 25–29. (In Russ.)
- Gulbe Ya. I.* Biological productivity and the vertical-fractional structure of gray alder in the nemoralno-acidic group of types // *Vertical-fractional distribution of biomass in forests*. M. : Nauka, 1986. P. 51–76. (In Russ.)
- Gulbe Ya. I.* Structure of biomass components and annual production of stands and trees of gray alder // *Analysis of the production structure of stands*. M. : Nauka, 1988. P. 85–103. (In Russ.)
- Forests of Russia and climate change* / *P. Leskinen, M. Lindner, P. J. Verkerk* [et al.] (eds.) // *What science can tell us*. European Forest Institute, 2020. № 11. 140 p.
- Hurd R. M.* Annual tree-litter production by successional forest stands, Juneau, Alaska // *Ecology*. 1971. Vol. 52. P. 881–884.
- Korsun F.* Zivot normalniho porosru ve vzorcich // *Lesnická práce*. 1935. Vol. 14. P. 289–300.
- Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia / *K. Lohmus, U. Mander, H. Tullus* [et al.] // *Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment*. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996. P. 95–105.
- Romanov G. G.* Symbiotic nitrogen fixation of gray alder in the conditions of the middle taiga subzone // *IVUZ. Lesnoj Zhurnal*. 2011. № 3. P. 39–44. (In Russ.)
- Sudnitsyna T. N.* Influence of gray alder on nitrogen nutrition, illumination and growth of European spruce in plantations // *Lesovedenie (Forest science)*. 2009. № 1. P. 18–24. (In Russ.)
- The potential of phytomeliorative properties of gray alder of the Arctic land area for afforestation in the forest tundra / *A. V. Davydov, S. V. Tretyakov, S. V. Koptev* [et al.] // *Intensification of the use and reproduction of forests of Siberia and the Far East: materials of the All-Russian Scientific Conference* / ed. by A. Y. Alekseenko. Khabarovsk : Publishing House of the FBU “Dalniilh”, 2021. P. 120–125.
- Tkachenko M. E., Asoskov A. I., Sinev V. N.* General forestry. Leningrad : Goslestehizdat, 1939. 746 p.
- Tuskan G. A., Walsh M. E.* Short-rotation woody crop systems, atmospheric carbon dioxide and carbon management : A U.S. case study // *The Forestry Chronicle*. 2001. Vol. 77. № 2. P. 259–264.
- Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Noritsin D. V.* Allometric models of tree biomass of forest-forming species of the Urals // *Forests of Russia and the economy in them*. 2022. № 1. P. 4–14. (In Russ.)
- Willow tree biomass and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region / *A. A. Paramonov, V. A. Usoltsev, S. V. Tretyakov* [et al.] // *Forests of Russia and economy in them*. 2022. № 4. P. 10–19. (In Russ.)

Информация об авторах

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

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

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. Парамонов – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник,

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

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. Karaban – laboratory researcher, post-graduate student,

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

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. Paramonov – Candidate of Agricultural Sciences, researcher,

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

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 28.05.2023; принята к публикации 28.07.2023.

The article was submitted 28.05.2023; accepted for publication 28.07.2023.
