

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА БИОМАССЫ НАСАЖДЕНИЙ КЕДРА СИБИРСКОГО НА УРАЛЕ

В. А. Усольцев^{1,3*}, Г. Г. Терехов²

¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

²Ботанический сад УрО РАН

Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

³Уральский государственный экономический университет
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/ Народной Воли, 62/45

*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Аннотация. Биомасса лесных насаждений играет важную роль в процессе связывания атмосферного углерода, однако масштабы поглощения углерода лесами по-прежнему остаются спорными, отчасти из-за неопределенностей в оценке лесной биомассы и содержания в ней углерода. Из основных лесообразующих пород Евразии наименьший объем фактических значений надземной биомассы в существующей базе данных приходится на 5-хвойные сосны (подрод *Haploxylon* Pilg.). Эти данные были в разное время получены для территории Сибири и Дальнего Востока, а для Урала подобные материалы отсутствуют. В предлагаемом исследовании по материалам 22 пробных площадей, заложенных авторами в культурах и естественных древостоях кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в возрасте от 17 до 118 лет, разработана рекурсивная система регрессионных моделей надземной биомассы (т/га) по фракционному составу, описывающая ее зависимость от основных таксационных показателей древостоев, с коэффициентами детерминации от 0,94 до 0,99. На их основе впервые для кедровников Урала получена таблица биологической продуктивности по фракциям надземной биомассы. Сопоставление полученной таблицы с ранее составленными таблицами биопроductивности на основе таблиц хода роста модальных и нормальных кедровников показало наличие существенных расхождений. По-видимому, при оценке биомассы и углерод депонирующей способности кедровников Урала предпочтение следует оказывать предложенным моделям и таблице. Они, в отличие от ранее опубликованных таблиц, дают возможность совмещать их с разными наборами таксационных показателей, получаемых при инструментальной таксации, а также при осуществлении государственного учета кедровников.

Ключевые слова: *Pinus sibirica* Du Tour, уральский регион, регрессионные модели, биомасса древостоев, таблицы биологической продуктивности.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 3, P. 28–36

AGE DYNAMICS OF BIOMASS OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR STANDS IN THE URALS

V. A. Usoltsev^{1,3*}, G. G. Terekhov²

¹Ural State Forest Engineering University

37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

³Ural State University of Economics

62/45, 8 Marta str./ Narodnaya Volya, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Annotation. The biomass of forest stands plays an important role in the process of atmospheric carbon sequestration, however, the extent of carbon uptake by forests remains controversial, partly due to uncertainties in the assessment of forest biomass and its carbon content. Of the main forest-forming species in Eurasia, the five-needled pines (subgenus *Haploxylon* Pilg.) account for the smallest volume of empirical values of aboveground biomass in the existing database. These data were obtained on the territory of Siberia and the Far East, but there are no similar materials for the Urals. In the proposed study, based on the materials of 22 sample plots established in plantations and natural stands of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) aged 17 to 118 years, a recursive system of regression models of aboveground biomass (t per ha) by component composition was developed, describing its dependence on the main taxation indicators of stands with coefficients of determination from 0.94 up to 0.99. Based on them, for the first time, a table of biological productivity by components of aboveground biomass was obtained for *Pinus sibirica* forests in the Urals. A comparison of the obtained table with previously compiled tables of biological productivity based on yield

tables of modal and normal *Pinus sibirica* forests showed their significant discrepancies. Apparently, when assessing the biomass and carbon deposition capacity of *Pinus sibirica* forests in the Urals, a preference should be given to the proposed models and the table. Unlike the previously published tables, the suggested models and the table make their possible to combine with different sets of taxation indicators obtained by instrumental taxation, as well as when carrying out state accounting of *Pinus sibirica* forests.

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour, Ural region, regression models, biomass of stands, tables of biological productivity.

ВВЕДЕНИЕ

Биомасса лесных насаждений играет важную роль в процессе связывания атмосферного углерода. Однако масштабы поглощения углерода лесами по-прежнему остаются спорными, отчасти из-за неопределенностей в оценке лесной биомассы и содержания углерода [25]. Более того, с позиций «теории глобальной экологической устойчивости» утверждается, что изменение климата нельзя остановить с помощью существующих ныне методов [26].

Биомассу древостоя можно оценить на двух уровнях детализации: на уровне отдельных деревьев и на уровне древостоя. Для уровня деревьев наиболее распространенным подходом является использование аллометрических уравнений, позволяющих оценить биомассу деревьев по легко измеряемым показателям, например, по диаметру ствола на высоте груди и в некоторых случаях с добавлением высоты и возраста дерева [21; 22; 23; 31; 34]. Они используются для оценки биомассы древостоя как суммы прогнозируемой биомассы отдельных деревьев [20]. Подобные модели требуют больших затрат времени и средств, но обеспечивают достаточно высокую точность оценки биомассы, особенно на локальном уровне.

При оценке возрастной динамики биомассы на уровне древостоев можно выделить, по крайней мере, два метода. При первом из них оценка биомассы древостоев проводится с использованием моделей их возрастной динамики, построенных непосредственно на основе данных о биомассе, полученных на серии пробных площадей в древостоях разного возраста (forest chronosequence) [1; 2; 7; 9; 33]. В подобных случаях выравнивание эмпирических данных выполнялось в основном лишь по задаваемому возрасту. Поскольку возрастная динамика биомассы определяется кроме возраста другими таксационными показателями, был предложен метод рекурсивной «цепочки» моделей – основной и вспомогательных. Основная модель включала в качестве независимых переменных массообразующие показатели древостоев. Вспомогательные модели представлены зависимостями густоты от возраста, затем – запаса от густоты и возраста, и последняя подставлялась в основную модель, где в качестве независимых переменных участвовали возраст (задаваемый), густота и запас (расчетные) [29]. В качестве разновидности метода представлена последовательность вспомогательных моделей зависимости средней высоты древостоя от возраста, затем – среднего диаметра от возраста и высоты, затем – густоты от возраста, средней высоты и среднего диаметра, и последняя подставлялась в основную модель биомассы, включающую в качестве независимых

переменных выше обозначенные массообразующие показатели [5; 10; 30]. Подобные модели по показателям детерминации адекватны исходным данным, но для оценки их фактической адекватности необходима проверка по независимым выборкам данных, что пока неосуществимо вследствие отсутствия подобных независимых данных.

При втором методе моделирования возрастной динамики биомассы древостоев в качестве зависимой переменной модели иногда используется конверсионно-объемный коэффициент как отношение биомассы той или иной фракции к запасу стволовой древесины [4; 16], а в качестве независимых переменных в модель включаются те же массообразующие показатели, что входят в ранее опубликованные традиционные таблицы хода роста древостоев (ТХР). В этом случае возможны два варианта. В первом из них рассчитывается последовательность вспомогательных и основной модели. Вспомогательные модели в качестве независимых переменных включают массообразующие показатели названных традиционных ТХР, и по ним описываются зависимости запаса, густоты и среднего диаметра от возраста и класса бонитета, которые затем подставляются в основные модели биомассы, включающие в качестве независимых переменных выше названные массообразующие показатели из ТХР [27; 28]. При втором варианте переводной коэффициент биомассы по ее фактическим данным рассчитывается в зависимости от возраста, среднего диаметра, средней густоты и средней высоты [11; 13] или в зависимости от возраста, класса бонитета и относительной полноты [18; 19; 24]. Полученные модели конверсионно-объемных коэффициентов биомассы табулируют непосредственно по массообразующим показателям ТХР и получают таблицы биологической продуктивности древостоев. Модели конверсионно-объемных коэффициентов по показателям детерминации обычно адекватны исходным данным, но фактическая точность таблиц биологической продуктивности должна определяться с учетом ошибок двоякого рода: ошибок моделей для оценки биомассы на пробных площадях и ошибок, имеющих место при составлении ТХР, – что на современном этапе не практикуется.

Цель настоящего исследования – по фактическим данным авторов, полученным на пробных площадях Среднего Урала, разработать модели биомассы древостоев кедра сибирского, или сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), и на их основе составить таблицу биологической продуктивности кедровников Урала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Специфика лесного фонда по кедровникам Урала состоит в том, что кедр в молодом возрасте представлен культурами, а в приспевающем и спелом возрастах абсолютно преобладают естественные древостои. Молодой кедр в естественном состоянии на Урале встречается иногда в составе редин в нагорном и зеленомошном типах леса или в виде незначительной примеси в смешанных мелколиственных молодняках, формирующихся после гарей и вырубок (устное сообщение канд. биол. наук Н. В. Танцырева). Соответственно наши исходные данные представлены древостоями: в культурах в возрасте от 15 до 46 лет (9 пробных площадей) и в естественных древостоях с примесью хвойных и лиственных – в возрасте от 82 до 118 лет (13 пробных площадей) (табл. 1).

Исходные данные о биомассе культур получены на пробных площадях, заложенных в подзоне южнотатаежных лесов Среднеуральской горной провинции [6] на территории Билимбаевского и Нижнесергинского

лесничеств Свердловской области (56°–57° с. ш., 59°–60° в. д.) (рис. 1).

Биомасса естественных кедровников определена на пробных площадях, заложенных в темнохвойных насаждениях Западно-Сибирской равнинной лесной области (С), Зауральской холмисто-предгорной провинции (VI), среднетаежному округу (б) (200–250 м над ур. м.) [6] на территории Новолялинского лесничества Свердловской области, расположенного на восточном макросклоне Среднего Урала (59° с. ш., 60°–61° в. д.) (рис. 2).

В культурах было взято шесть модельных деревьев на каждой пробной площади в пределах диапазона варьирования диаметра ствола с последующим фракционированием биомассы, сушкой до абсолютно сухого состояния и расчетом биомассы на 1 га согласно методике, изложенной ранее [14]. Методика взятия и обработки модельных деревьев в спелых кедровниках была опубликована ранее [15]. Шишки на модельных деревьях не были учтены ввиду их отсутствия – в культурах по причине молодого возраста, а в спелых древостоях по причине неурожайного года.

Таблица 1

Характеристика исходных данных биомассы и таксационных показателей кедровых древостоев*

№ п/п	Состав	<i>A</i>	<i>N</i> /1000	<i>D</i> _{ср}	<i>H</i> _{ср}	<i>M</i>	<i>P</i> _с	<i>P</i> _в	<i>P</i> _х	<i>P</i> _а
1	10К	17	3,301	4,8	3,4	15,4	6,1	5,5	3,50	16,5
2	10К	17	3,340	5,4	4,1	20,0	6,8	5,2	4,48	18,1
3	10К	23	3,658	5,7	4,7	26,9	9,6	4,0	2,83	17,5
4	10К	24	1,676	6,1	5,2	15,8	5,8	2,4	1,67	11,0
5	10К	24	1,244	5,5	4,9	10,4	3,9	1,6	0,87	7,2
6	10К	25	2,620	6,9	5,8	27,6	13,1	4,9	3,03	23,4
7	10К	25	2,564	9,0	7,1	76,3	18,4	11,5	5,88	39,2
8	10К	27	1,638	5,8	5,7	16,4	6,2	1,8	0,96	10,2
9	10К	46	2,015	13,5	13,1	190	76,6	21,5	6,37	112,8
10	6К2С2Б	82	1,257	18,0	15,8	297	177	24,7	14,0	215,8
11	8К2Б+П	87	0,678	20,0	16,9	243	86,5	9,7	4,63	100,7
12	5К3Б2П	87	1,083	21,6	17,7	478	180	22,2	9,60	211,6
13	8К1П1С	90	1,121	22,2	17,7	430	150	16,7	9,11	175,8
14	7К2П1Б	90	1,258	18,6	19,8	394	139	15,5	7,60	162,4
15	7К2П1Б	93	1,483	19,4	21,3	548	187	21,1	9,75	217,6
16	6К2П1С1Б	99	0,282	42,7	20,2	473	170	19,4	9,41	199,2
17	8К1П1Б	101	1,358	18,5	16,8	506	161	16,7	7,57	185,6
18	7К2П1Б	103	1,045	20,6	21,1	400	141	16,1	8,15	165,0
19	6К2П2Б	103	0,967	22,3	23,3	449	165	19,7	8,77	193,3
20	7К2П1Б	107	1,471	20,4	21,2	567	193	22,6	11,2	226,9
21	6К2П1С1О	109	0,875	24,0	29,6	482	165	19,1	9,94	193,5
22	6К3П1Б	118	0,916	20,3	24,4	313	111	14,5	7,80	132,9

Примечания. * *A* – возраст древостоя, лет; *N* – число деревьев на 1 га; *D*_{ср} – средний диаметр ствола на высоте груди, см; *H*_{ср} – средняя высота древостоя, м; *M* – запас, м³/га; *P*_с, *P*_в, *P*_х, *P*_а – соответственно биомасса ствола в коре, ветвей, хвой и надземная в абсолютно сухом состоянии, т/га.



Рис. 1. Культуры кедра сибирского на пробных площадях в Нижне-Сергинском лесничестве в возрасте 17 (слева) и 46 (справа) лет. Фото В. А. Усольцева



Рис. 2. Места закладки пробных площадей в кедровниках Новолялинского лесничества (отмечены кружками, слева) и 103-летний кедровник состава 7К2П1Б+С+Е с запасом 400 м³/га, III класс бонитета, ягодниковая группа типов леса (пробная площадь № 8, справа). Фото В. А. Усольцева

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании возрастной динамики биомассы кедров сибирского за основу взята методика построения аналогичных моделей и таблиц возрастной динамики биомассы ивы и ольхи серой в Архангельской области как рекурсивной системы связанных регрессионных уравнений [5; 10]. В данном исследовании рекурсивная система моделей имеет общий вид:

$$\begin{aligned} \ln H_{cp} &= a_0 + a_1(\ln A) \rightarrow \\ \rightarrow \ln D_{cp} &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln H_{cp}) \rightarrow \\ \rightarrow \ln(N/1000) &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln D_{cp}) + a_3(\ln H_{cp}) \rightarrow \\ \rightarrow \ln M &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln D_{cp}) + a_3(\ln N/1000) \rightarrow \\ \rightarrow \ln P_s &= a_0 + a_1(\ln A) - a_2(\ln A)^2 + a_3(\ln D_{cp}) + \\ &+ a_4(\ln N/1000); \\ \ln P_b &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln D_{cp}) + a_3(\ln N/1000); \\ \ln P_f &= a_0 + a_1(\ln A) - a_2(\ln A)^2 + a_3(\ln D_{cp}) + \\ &+ a_4(\ln N/1000); \\ \ln P_a &= a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln D_{cp}) + a_3(\ln N/1000). \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку известно, что культуры и естественные древостои могут с возрастом по-разному реагировать на изменение внешних условий [32], на предварительном этапе была предпринята попытка выявить степень достоверности различия системы моделей (1) для культур и естественных кедровников. С этой целью модели (1) были дополнены бинарной переменной [3], кодирующей принадлежность исходных данных к культурам или естественным древостоям. Оказалось, что из восьми анализируемых показателей для шести из них бинарная переменная была статистически не значима на уровне вероятности $p < 0,05$ (от 0,03 до 1,8, что меньше $t_{05} = 2,0$). В результате бинарная переменная была исключена из структуры моделей (1), и дальнейший анализ выполнен по совмещенному массиву исходных данных.

Согласно рекурсивному принципу построения взаимозависимых моделей [17], второе звено системы (1) должно включать зависимость $\ln D_{cp} = a_0 + a_1(\ln A) + a_2(\ln H_{cp})$. Однако вследствие мультиколлинеарности A и H_{cp} вторая независимая переменная оказалась статистически не значимой и была исключена из расчета модели. По аналогичной причине оказались статистически не значимыми переменные A и H_{cp} в третьем звене системы, и рассчитана зависимость $\ln(N/1000) = a_0 - a_2(\ln D_{cp})$. В окончательном виде в системе моделей (1), полученных посредством

многофакторного регрессионного анализа, приведены только коэффициенты регрессии, значимые на уровне вероятности $p < 0,05$ и выше. При этом их свободный член скорректирован на логарифмическое преобразование (табл. 2).

О степени адекватности системы моделей (1) можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений надземной биомассы древостоев (рис. 3).

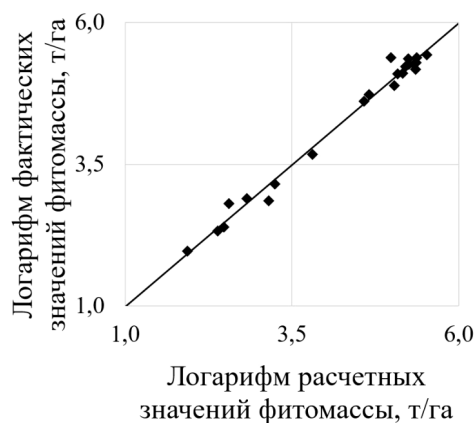


Рис. 3. Соотношение фактических и расчетных значений надземной биомассы кедровников Урала

Путем последовательного табулирования системы моделей (1) в направлении, показанном стрелками, получена таблица биологической продуктивности кедровников Урала (табл. 3).

Ранее по материалам базы данных о биомассе 135 пробных площадей, заложенных в древостоях кедров сибирского и корейского (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) [12], были рассчитаны регрессионные модели конверсионно-объемных коэффициентов для фракций биомассы для подрода 5-хвойных кедров в целом. Для Урала фактические данные на тот период отсутствовали, и модели были рассчитаны по исходным данным названных двух видов кедров, полученным на территории Сибири и Дальнего Востока. Независимые переменные моделей включали основные таксационные показатели древостоев пробных площадей. Модели были дифференцированы по экорегионам Урала, Сибири и Дальнего Востока, и их коэффициенты детерминации для различных фракций биомассы варьировали в диапазоне от 0,91 до 0,99 [13].

Таблица 2
Характеристика рекурсивной системы моделей (1)

Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты					adjR ² *	SE*
	a ₀	a ₁ (lnA)	a ₂ (lnA) ²	a ₃ (lnD _{cp})	a ₄ ln(N/1000)		
ln H _{cp}	-1,3381	0,9536	—	—	—	0,966	0,13
ln D _{cp}	-0,8241	0,8562	—	—	—	0,905	0,20
ln (N/1000)	2,2927	—	—	-0,7316	—	0,639	0,35
ln M	-3,9977	0,6978	—	2,2309	1,0534	0,993	0,12
ln P _s	-8,9040	2,9422	-0,2746	2,0272	1,0016	0,990	0,14
ln P _b	-2,8141	-0,4049	—	2,4657	1,1965	0,948	0,20
ln P _f	5,6336	-5,0163	0,5896	2,3289	1,1334	0,938	0,19
ln P _a	-3,1563	0,3457	—	2,2047	1,0672	0,984	0,15

Примечание. * adjR² – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения.

Таблица 3

Возрастная динамика надземной биомассы древостоев кедров сибирского на Урале

A, лет	H _{ср} , м	D _{ср} , см	N/1000, экз/га	M, м ³ /га	Биомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га*			
					P _s	P _b	P _f	P _a
20	4,6	5,7	2,771	21,1	7,4	4,4	3,0	14,8
30	6,7	8,1	2,149	46,5	18,6	6,5	3,1	28,2
40	8,8	10,3	1,795	81,5	34,1	8,6	3,5	46,2
50	10,9	12,5	1,561	125,8	52,9	10,6	4,1	67,7
60	13,0	14,6	1,392	179,5	74,2	12,6	4,9	91,7
70	15,1	16,7	1,264	242,3	97,3	14,6	5,9	117,9
80	17,1	18,7	1,163	314,3	121,8	16,6	7,1	145,5
90	19,2	20,7	1,080	395,4	147,2	18,6	8,5	174,3
100	21,2	22,6	1,011	485,5	173,3	20,6	10,1	204,0
110	23,2	24,5	0,952	584,5	199,9	22,5	11,9	234,4
120	25,2	26,4	0,902	692,5	226,7	24,5	14,0	265,2

Примечание. * Значение надземной биомассы *Pa* получено сложением расчетных значений биомассы ствола в коре, ветвей и листвы.

Региональные модели для Урала были совмещены с ТХР нормальных и модальных кедровников путем табулирования их по таксационным показателям соответствующих ТХР, и результаты полученных совмещенных таблиц хода роста по биомассе кедровников были опубликованы в сборнике таблиц биологической продуктивности лесобразующих пород Северной Евразии [13]. Представляет интерес сравнение данных таблиц биологической продуктивности нормальных и модальных кедровников Урала с данными табл. 3.

ТХР нормальных кедровников были составлены для водораздельного северо- и среднетаежного среднегорного высотного пояса Урала (500–700 м над ур. м.) Е. П. Смолоноговым и П. Ф. Трусковым (цит. по: [8]). Их показатели средней высоты и густоты были существенно ниже соответствующих показателей табл. 3. В итоге запас стволовой древесины в таблицах биологической продуктивности, совмещенных с ТХР нормальных кедровников, оказался ниже по отношению к запасам табл. 3 в 4–10 раз в диапазоне возраста от 40 до 120 лет, а надземная биомасса в том же возрастном диапазоне – ниже в 2–5 раз.

ТХР модальных кедровников были составлены для долгомошно-мелкотравного типа леса равнинного средне- и южнотаяжного Урала Е. П. Смолоноговым с соавторами (цит. по: [8]). Запас в таблице биологической продуктивности, совмещенной с названной ТХР, оказался в возрасте 20 лет выше на 30 %, а в возрасте 120 лет – ниже в 3,3 раза по отношению к соответствующим показателям табл. 3. Соответственно надземная биомасса в возрасте 20 лет оказалась выше в 1,8 раза, а в возрасте 120 лет – ниже в 2 раза по отношению к соответствующим показателям табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по материалам 9 пробных площадей, заложенных в культурах кедров сибирского в возрасте от 17 до 46 лет и 13 пробных площадей, заложенных в естественных кедровниках в возрасте от 82 до 118 лет, разработана рекурсивная система регрессионных моделей надземной биомассы (т/га) по фракционному составу, описывающих ее зависимость от

основных таксационных показателей древостоев. Моделирование с применением бинарной переменной, кодирующей принадлежность данных к культурам или естественным древостоям, показало отсутствие статистической значимости бинарной переменной на уровне вероятности $p < 0,05$ (от 0,03 до 1,8, что меньше $t_{05} = 2,0$). Дальнейший регрессионный анализ, выполненный по совмещенному массиву исходных данных, показал, что таксационные показатели, включенные в модели качестве независимых переменных, объясняют изменчивость фракций надземной биомассы на уровне от 94 до 99 %.

Путем последовательного табулирования системы моделей биомассы для кедровников Урала впервые по собственным данным авторов получена таблица биологической продуктивности по фракциям надземной биомассы. Сопоставление полученных таблиц с ранее составленными таблицами биопроductивности на основе ТХР модальных и нормальных кедровников показало наличие существенных расхождений. Повидимому, при оценке биомассы и углерод депонирующей способности кедровников Урала предпочтение следует оказывать предложенным моделям и таблицам, которые, в отличие от ранее опубликованных таблиц, дают возможность совмещать их с разными наборами таксационных показателей, получаемых при инструментальной таксации, а также при осуществлении государственного учета кедровников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Боханова Н. С. Эскиз таблиц биологической продуктивности пойменных дубрав // Вопросы таксации и лесоустройства. М. : ЦБНТИ, 1971. С. 8–10.
2. Габделхаков А. К. Фитомасса липняков лесостепи Башкирского Предуралья : автореф. дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук : Айдар Кавилович Габделхаков, 06.03.02. Йошкар-Ола, 1997. 24 с.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М. : Статистика, 1973. 392 с.
4. Замолотчиков Д. Г., Уткин А. И., Коровин Г. Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.

5. Карабан А. А., Усольцев В. А., Третьяков С. В. и др. Возрастная динамика биомассы древостоев ольхи серой в условиях Архангельской области // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2. С. 177–178. DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.019.
6. Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск : УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.
7. Красиков И. И. Динамика надземной фитомассы лиственных древостоев Южной Эвенкии // Лиственница и ее комплексная переработка : межвуз. сб. науч. тр. Красноярск : СибТИ, 1987. С. 23–27.
8. Лесотаксационный справочник для лесов Урала. М. : Госкомлес СССР, 1991. 483 с.
9. Макаренко А. А., Маленко А. А. Структура фитомассы молодняков сосны ленточных боров Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1984. № 6. С. 79–82.
10. 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. DOI 10.51318/FRET.2022.27.41.002.
11. Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 541 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).
12. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2001. 708 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).
13. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2002. 762 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).
14. Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург : УрО РАН, 2007. 636 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>).
15. Количественная и квалиметрическая составляющие биологической продуктивности кедровников Урала / В. А. Усольцев, И. С. Лазарев, В. В. Крудышев, Н. В. Сенчило // Сборник научных трудов ученых и специалистов факультета экономики и управления УГЛУ. Вып. 3. Екатеринбург : УГЛУ, 2012. С. 261–270.
16. Использование регрессионной модели при анализе конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии // Лесной вестник / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей, А. А. Карабан и др. // Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165.
17. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М. : Статистика, 1977. 200 с.
18. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильссон и др. М. : МПР РФ, 2006. 803 с.
19. Щепаченко Д. Г., Швиденко А. З., Шалаев В. С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственных лесов Северо-Востока России. М. : МГУЛ, 2008. 296 с.
20. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives / M. Balboa-Murias, R. Rodríguez Soalleiro, A. Merino et al. // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 237. P. 29–38.
21. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate / D. I. Forrester, I. H. H. Tachauer, P. Annighoefer et al. // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 396. P. 160–175.
22. Picard N., Saint-André L., Henry M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations from field measurement to prediction. FAO, Rome, 2012. 215 p.
23. Saldarriaga J. G., West D. C., Tharp M. L. et al. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela // Journal of Ecology. 1988. Vol. 76, No. 4. P. 938–958.
24. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A. et al. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // Forests. 2018. Vol. 9. Article 312.
25. Sileshi G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 329. P. 237–254.
26. Somogyi Z. Theory of global environmental sustainability. University of Sopron, Forest Research Institute, Hungary, 2024. 52 p. <https://scientia.hu/honnantudod/theory-of-global-environmental-sustainability/>.
27. Usoltsev V. A. Principles and methods of compiling stand bioproductivity tables // Soviet Forest Sciences. 1988. No. 2. P. 23–32. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).
28. Usoltsev V. A., Hoffmann C. W. A preliminary crown biomass table for even-aged *Picea abies* stands in Switzerland // Forestry. 1997. Vol. 70. No. 2. P. 103–112.
29. Augmentative modeling: A pattern for *Populus* spp. stand biomass in the Eurasia under the influence of climate change / V. A. Usoltsev, S. O. R. Shobairi, I. S. Tsepordey et al. // Journal of Climatology & Weather Forecasting. 2020a. Vol. 8, No. 3. Article 259. DOI: 10.35248/2332-2594.2020.8.259.
30. Usoltsev V. A., Shobairi O., Chasovskikh V. P. Additive allometric model of *Quercus* spp. stand biomass for Eurasia // Ecological Questions. 2020b. Vol. 31 (2). P. 39–46. DOI: 10.12775/EQ.2020.012.
31. Additive model of above-ground biomass of larch single-trees related to age, DBH and height, sensitive to temperature and precipitation in Eurasia / V. A. Usoltsev, S. O. R. Shobairi, I. S. Tsepordey et al. // Journal of Applied Sciences & Environmental Management. 2020c. Vol. 24 (10). P. 1759–1766. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v24i10.8>.
32. Are there differences in the response of natural stand and plantation biomass to changes in temperature and precipitation? A case for two-needled pines in Eurasia / V. A. Usoltsev, O. Shobairi, I. S. Tsepordey et al. // Journal of Resources and Ecology. 2020d. Vol. 11, No. 4. P. 331–341. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2020.04.001.
33. Usoltsev V. A., Vanclay J. K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry

steppe in Kazakhstan // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 10. P. 305–312.

34. Patterns of biomass and carbon distribution across a chronosequence of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forests / J. Zhao, F. Kang, L. Wang et al. // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9 (4). Article e94966.

REFERENCES

1. Bohanova N. S. Eskiz tablic biologicheskoy produktivnosti pojmyennyh dubrav // *Voprosy taksatsii i lesoustroystva*. M. : CBNTI, 1971. S. 8–10.

2. Gabdelhakov A. K. Fitomassa lipnyakov lesostepi Bashkirskogo Predural'ya : avtoreferat dis. ... kandidata sel'skohozyajstvennyh nauk : Ajdar Kavilovich Gabdelhakov, 06.03.02. Joshkar-Ola, 1997. 24 s.

3. Drejper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz. M. : Statistika, 1973. 392 s.

4. Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Korovin G. N. Opredelenie zapasov ugleroda po zavisimym ot vozrasta nasazhdenij konversionno-ob"emnym koefitsientam // *Lesovedenie*. 1998. № 3. S. 84–93.

5. Vozrastnaya dinamika biomassy drevostoev ol'hi seroj v usloviyah Arhangel'skoj oblasti / A. A. Karaban, V. A. Usol'cev, S. V. Tret'yakov i dr. // *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih*. 2024. № 2. S. 177–178. DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.019.

6. Kolesnikov B. P., Zubareva R. S., Smolonogov E. P. Lesorastitel'nye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoj oblasti. Sverdlovsk : UNC AN SSSR, 1973. 176 s.

7. Krasikov I. I. Dinamika nadzemnoj fitomassy listvennichnyh drevostoev Yuzhnoj Evenkii // *Listvennica i ee kompleksnaya pererabotka : mezhvuz. sb. nauchn. trudov*. Krasnoyarsk : SibTI, 1987. S. 23–27.

8. Lesotaksacionnyj spravochnik dlya lesov Urala. M. : Goskomles SSSR, 1991. 483 s.

9. Makarenko A. A., Malenko A. A. Struktura fitomassy molodnyakov sosny lentochnyh borov Kazahstana // *Vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki Kazahstana*. 1984. № 6. S. 79–82.

10. Vozrastnaya dinamika biomassy ivnyakov Arhangel'skoj oblasti / A. A. Paramonov, V. A. Usol'cev, S. V. Tret'yakov i dr. // *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih*. 2023. № 1. S. 19–29. DOI 10.51318/FRET.2022.27.41.002.

11. Usol'cev V. A. Formirovanie bankov dannyh o fitomasse lesov. Ekaterinburg : UrO RAN, 1998. 541 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3224>).

12. Usol'cev V. A. Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: baza dannyh i geografiya. Ekaterinburg : Izd-vo UrO RAN, 2001. 708 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).

13. Usol'cev V. A. Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: normativy i elementy geografii. Ekaterinburg : Izd-vo UrO RAN, 2002. 762 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).

14. Usol'cev V. A. Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoj Evrazii: metody, baza dannyh i ee prilozheniya. Ekaterinburg : UrO RAN, 2007. 636 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>).

15. Kolichestvennaya i kvalimetricheskaya sostavlyayushchie biologicheskoy produktivnosti kedrovnikov Urala / V. A. Usol'cev, I. S. Lazarev, V. V. Krudyshev,

N. V. Senchilo // *Cbornik nauchnyh trudov uchenykh i specialistov fakul'teta ekonomiki i upravleniya UGLTU*. Vyp. 3. Ekaterinburg : UGLTU, 2012. S. 261–270.

16. Ispol'zovanie regressionnoj modeli pri analize konversi-onno-ob"emnyh koefitsientov fitomassy ol'hi v geograficheskikh gradientah Evrazii / V. A. Usol'cev, I. S. Cepordej, A. A. Karaban i dr. // *Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin*, 2024. T. 28. № 2. S. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165.

17. Chetyrkin E. M. Statisticheskie metody prognozirovaniya. M. : Statistika, 1977. 200 s.

18. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii (normativno-spravochnye materialy) / A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepashchenko, S. Nil'sson i dr. M. : MPR RF, 2006. 803 s.

19. Shchepashchenko D. G., Shvidenko A. Z., Shalaev V. S. Biologicheskaya produktivnost' i byudzhety ugleroda listvennichnyh lesov Severo-Vostoka Rossii. M. : MGUL, 2008. 296 s.

20. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives / M. Balboa-Murias, R. Rodríguez Soalleiro, A. Merino et al. // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 237. P. 29–38.

21. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate / D. I. Forrester, I. H. H. Tachauer, P. Annighoefer et al. // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175.

22. Picard N., Saint-André L., Henry M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations from field measurement to prediction. FAO, Rome, 2012. 215 r.

23. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela / J. G. Saldarriaga, D. C. West, M. L. Tharp et al. // *Journal of Ecology*. 1988. Vol. 76. No. 4. P. 938–958.

24. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests / D. Schepaschenko, E. Moltchanova, A. Shvidenko et al. // *Forests*. 2018. Vol. 9. Article 312.

25. Sileshi G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 329. P. 237–254.

26. Somogyi Z. Theory of global environmental sustainability. University of Sopron, Forest Research Institute, Hungary, 2024. 52 p. <https://scientia.hu/honnan tudod/theory-of-global-environmental-sustainability/>.

27. Usoltsev V. A. Principles and methods of compiling stand bioproductivity tables // *Soviet Forest Sciences*. 1988. No. 2. P. 23–32. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).

28. Usoltsev V. A., Hoffmann C. W. A preliminary crown biomass table for even-aged *Picea abies* stands in Switzerland // *Forestry*. 1997. Vol. 70. No. 2. P. 103–112.

29. Augmentative modeling: A pattern for *Populus* spp. stand biomass in the Eurasia under the influence of climate change / V. A. Usoltsev, S. O. R. Shobairi, I. S. Tsepordej et al. // *Journal of Climatology & Weather*

Forecasting. 2020a. Vol. 8. No. 3. Article 259. Doi: 10.35248/2332-2594.2020.8.259.

30. Usoltsev V. A., Shobairi O., Chasovskikh V. P. Additive allometric model of *Quercus* spp. stand biomass for Eurasia // *Ecological Questions*. 2020b. Vol. 31 (2). P. 39–46. DOI: 10.12775/EQ.2020.012.

31. Usoltsev V. A., Shobairi S. O. R., Tsepordey I. S. et al. Additive model of above-ground biomass of larch single-trees related to age, DBH and height, sensitive to temperature and precipitation in Eurasia // *Journal of Applied Sciences & Environmental Management*. 2020s. Vol. 24 (10). P. 1759–1766. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v24i10.8>.

32. Usoltsev V. A., Shobairi O., Tsepordey I. S. et al. Are there differences in the response of natural stand and

plantation biomass to changes in temperature and precipitation? A case for two-needled pines in Eurasia // *Journal of Resources and Ecology*. 2020d. Vol. 11, No. 4. P. 331–341. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2020.04.001.

33. Usoltsev V. A., Vanclay J. K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 10. P. 305–312.

34. Zhao J., Kang F., Wang L. et al. Patterns of biomass and carbon distribution across a chronosequence of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forests // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9 (4). Article e94966.

© Усольцев В. А., Терехов Г. Г., 2025

Поступила в редакцию 09.01.2025
Принята к печати 20.05.2025