

Научная статья

УДК 532.542/.543

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-122-129



МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СОСНЯКОВ ПО ГРУППАМ ВОЗРАСТА СУБЪЕКТОВ ЦФО РФ

Хлюстов Виталий Константинович , д-р с.-х. наук, профессор,
заслуженный лесовод России;

(0000-0001-8323-5750) SPIN4645-0960; vitakhlustov@mail.ru

Ганихин Александр Максимович, аспирант

(0000-0003-0671-1615) SPIN5969-4617; ganikhin.timacad@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Целью исследований явилась разработка модели цифровизации нормативов биологической продуктивности древостоев по данным конверсионных коэффициентов (k_{cp}), усредненным по группам возраста. На современном этапе лесного хозяйства одними из приоритетных направлений исследований являются оценка биологической продуктивности древостоев по отдельным фракциям фитомассы (биомассе стволов, ветвей, коры, хвои (листвы), корней), определение их биоэнергетического потенциала, накопления углерода элементами леса во всем многообразии породной, возрастной и пространственной структуры насаждений. Актуальными признаны исследования климаторегулирующей функции лесов, и прежде всего – оценки поглощения ими углекислого газа и депонирования углерода. Для решения этой задачи в широких масштабах рекомендовано использовать коэффициенты конверсии древесного запаса в фитомассу с учетом широтной полосы местности и групп возраста древостоев. В результате на примере сосняков Центрального федерального округа получена многомерная модель изменения фракций фитомассы по 17 субъектам РФ в зависимости от полноты, доли сосны в составе, средней высоты и возрастной группы древостоев. Полученная модель является функциональной, характеризуемой коэффициентом детерминации $R^2 = 1,0$ и стандартной ошибкой $ES = \pm 0,2\%$, и лишь инструментом цифровизации нормативов биомассы отдельных фракций фитомассы. Однако использование модели нормативов априори не может превышать точности определения средних значений конверсионных коэффициентов, полученных в разрезе групп возраста.


Ключевые слова: моделирование, стандартные запасы, конверсионные коэффициенты фракций фитомассы, продуктивность сосняков

Формат цитирования: Хлюстов В.К., Ганихин А.М. Моделирование биологической продуктивности сосняков по группам возраста субъектов ЦФО РФ // Природообустройство. 2023. № 4. С. 122-129. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-122-129.

© Хлюстов В.К., Ганихин А.М., 2023

Original article

MODELING OF THE BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF PINE FORESTS BY AGE GROUPS OF SUBJECTS OF THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT OF THE RUSSIAN FEDERATION

Khlyustov Vitaly Konstantinovich , doctor of agricultural sciences, professor,
honored forester of Russia;

(0000-0001-8323-5750) SPIN4645-0960; vitakhlustov@mail.ru

Ganikhin Alexander Maximovich, post graduate student

0000-0003-0671-1615) SPIN5969-4617; ganikhin.timacad@mail.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 4, Russia

Annotation. The purpose of the research was to develop a model for the digitalization of the biological productivity standards for forest stands based on conversion coefficients (c_{av}) averaged by age groups. At the present stage of forestry, one of the priority areas of research is the assessment

of the biological productivity of forest stands by individual fractions of phytomass (biomass of trunks, branches, bark, needles (foliage), roots), the determination of their bioenergy potential, the accumulation of carbon by forest elements in all the diversity of species, age and spatial structure of plantations. Studies of the climate-regulating function of forests, and first of all, the assessment of their absorption of carbon dioxide and carbon sequestration, are recognized as relevant. To solve this problem on a large scale, it is recommended to use conversion coefficients of wood stock into phytomass, taking into account the latitudinal strip of the terrain and age groups of stands. As a result, using the example of pine forests of the Central Federal District, a multidimensional model of changes in phytomass fractions in 17 constituent entities of the Russian Federation depending on the completeness, share of pine in the composition, average height and age group of stands was obtained. The resulting model is functional, characterized by a coefficient of determination $R_2 = 1.0$ and a standard error $ES = \pm 0.2\%$, and only a tool for digitalization of biomass standards for individual fractions of phytomass. However, the use of the standard model a priori cannot exceed the accuracy of determining the average values of conversion coefficients obtained in the context of age groups.

Keywords: modeling, standard reserves, conversion coefficients of phytomass fractions, productivity of pine forests

Format of citation: Khlyusov V.K., Ganikhin A.M. Modeling of the biological productivity of pine forests by age groups of subjects of the Central Federation District of the Russian Federation // *Prirodobustroystvo*. 2023. № 4. P. 122-129. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-122-129.

Введение. Представители Российского союза промышленников и предпринимателей ставят вопрос о том, чтобы узаконить методику учета поглощения углерода в лесах и других экосистемах в качестве компенсации за промышленные выбросы.

Решение проблемы комплексной оценки углероддепонирующего потенциала лесных насаждений должно базироваться на выявлении закономерностей и на разработке экологических моделей биологической продуктивности (биомассы стволовой древесины, коры, ветвей, хвои/листья, корней) древостоев разного породного состава, возрастной и пространственной структуры (сомкнутости полога и густоты). В результате построения моделей фракций фитомассы для конкретных регионов РФ появляется возможность разработки информационно-справочных систем электронных нормативов для дистанционной (автоматизированной) оценки как массы секвестрированного углерода, так и биоэнергетического потенциала лесов.

Распоряжением Минприроды России от 30 июня 2017 г. № 20-р (ред. от 20 января 2021 г.) «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов» рекомендовано использовать базы данных конверсионных коэффициентов для преобразования таксируемых запасов древесных пород с учетом возрастной группы древостоев в запасы фитомассы стволов, ветвей, корней, хвои/листья [1]. Такая база данных создана на основе информации из многочисленных источников литературы, в том

числе приведенных В.А. Усольцевым [2-4]. По указанию Д.Г. Замолдчикова и др. [5] база сформирована по данным пробных площадей, заложенных на территории России, и включает в себя: географическое положение, почву, таксационные характеристики древостоев, фитомассу всех ярусов растительности, детрит (валеж, лесная подстилка). Конверсионные коэффициенты рассчитаны для всех основных лесобразующих пород с учетом возраста и принадлежности той или иной лесорастительной полосе по отношению:

$$k = Ph/M, \quad (1)$$

где k – конверсионный коэффициент, t/m^3 ; Ph – фракция фитомасса, $t/га$; M – запас древостоя, $m^3/га$.

В указанном соотношении запас наличного древостоя является показателем продуктивности, формируемым по регионам с учетом природно-климатических факторов, оказывающих влияние на образующие запас таксационные показатели: среднюю высоту, относительную полноту и долю участия древесной породы в составе, о чем подробно изложено в работе авторов [6].

Цель исследований: разработка модели цифровизации нормативов биологической продуктивности древостоев по данным конверсионных коэффициентов (k_{cp}), усредненным по группам возраста, представленным в таблице 1 [5].

Для достижения поставленной цели оценена точность определения средней арифметической величины конверсионных коэффициентов для фракций фитомассы в группах возраста трех полос географической широты. Точность

определения к-стволовой находится в диапазоне от $\pm 1,3$ до $\pm 5,7\%$, к-ветвей – от $\pm 3,8$ до $\pm 19,8\%$, к-корней – от $\pm 4,5$ до $\pm 20,4\%$, к-хвои – от $\pm 6,3$ до $\pm 26,3\%$. Показанные значения относительных ошибок определения усредненных конверсионных коэффициентов по группам возраста не позволяют получить точности определения биомассы древостоев в абсолютных величинах, соответствующей запасу древостоев ($\pm 10\%$). Подробно о повышении точности определения конверсионных коэффициентов при построении

многомерных моделей изложено в публикации авторов [7].

Несмотря на указанные недостатки использования усредненных по группам возраста значений k_{cp} , приведем методику получения моделей для цифровизации нормативов абсолютной биологической продуктивности фракций фитомассы на примере 17 субъектов РФ Центрального федерального округа.

Переход к абсолютным значениям фракций фитомассы проведен по значениям

Таблица 1. Усредненные по группам возраста конверсионные коэффициенты (Ph/M) для сосновых древостоев разных широтных зон России ($t/m^3 \pm$ стандартная ошибка)

Table 1. Age-averaged conversion coefficients (Ph/M) for pine stands of different latitudinal zones of Russia ($t/m^3 \pm$ standard error)

Широтная полоса Latitude belt	Группа возраста Age group	Стволы Trunks		Ветви Branches		Корни Roots		Хвоя Needles	
		C_{av}	$\pm mc_{av}$	C_{av}	$\pm mc_{av}$	C_{av}	$\pm mc_{av}$	C_{av}	$\pm mc_{av}$
1	Молодняки / <i>Youngsters</i>	0,469	0,021	0,128	0,022	0,174	0,031	0,167	0,044
	Средне-возрастные / <i>Middle-aged</i>	0,468	0,010	0,052	0,002	0,143	0,009	0,030	0,002
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	0,482	0,016	0,067	0,010	0,155	0,016	0,033	0,005
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe</i>	0,462	0,008	0,057	0,006	0,121	0,008	0,021	0,002
2	Молодняки / <i>Youngsters</i>	0,470	0,027	0,131	0,026	0,108	0,013	0,084	0,014
	Средне-возрастные / <i>Middle-aged</i>	0,455	0,006	0,062	0,006	0,101	0,004	0,028	0,002
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	0,475	0,010	0,054	0,006	0,162	0,033	0,024	0,004
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe</i>	0,478	0,014	0,054	0,005	0,088	0,004	0,027	0,004
3	Молодняки / <i>Youngsters*</i>	0,444	0,008	0,112	0,007	0,190	0,019	0,123	0,012
	Средне-возрастные / <i>Middle-aged*</i>	0,447	0,008	0,066	0,003	0,159	0,014	0,032	0,002
	Приспевающие / <i>Ripening*</i>	0,453	0,010	0,052	0,002	0,128	0,007	0,026	0,002
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe*</i>	0,491	0,011	0,059	0,004	0,137	0,007	0,025	0,002

*Полужирным шрифтом указаны значения конверсионных коэффициентов, относящиеся к соснякам Центрального федерального округа.

*Semi-bold font indicates the values of conversion coefficients related to pine forests of the Central Federal District.

Таблица 2. Точность определения усредненных значений конверсионных коэффициентов фракций фитомассы по группам возраста для сосновых древостоев разных широтных зон России ($\pm P, \% = 100 * m / K_{cp}$)

Table 2. Accuracy of determination of average values of conversion coefficients of phytomass fractions by age groups for pine stands of different latitudinal zones of Russia ($\pm P, \% = 100 * m / C_{av}$)

Широтная полоса Latitude belt	Группа возраста Age group	Стволы Trunks	Ветви Branches	Корни Roots	Хвоя Needles
1	Молодняки / <i>Youngsters</i>	4,5	17,2	17,8	26,3
	Средневозрастные / <i>Middle-aged</i>	2,1	3,8	6,3	6,7
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	3,3	14,9	10,3	15,2
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe</i>	1,7	10,5	6,6	9,5
2	Молодняки / <i>Youngsters</i>	5,7	19,8	12,0	16,7
	Средневозрастные / <i>Middle-aged</i>	1,3	9,7	4,0	7,1
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	2,1	11,1	20,4	16,7
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe</i>	2,9	9,3	4,5	14,8
3	Молодняки / <i>Youngsters</i>	1,8	6,3	10,0	9,8
	Средневозрастные / <i>Middle-aged</i>	1,8	4,5	8,8	6,3
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	2,2	3,8	5,5	7,7
	Спелые и перестойные / <i>Ripe and overripe</i>	2,2	6,8	5,1	8,0

запасов, полученным по стандартным таблицам, действующим в конкретных субъектах РФ, и модели, полученной по методике [8]. После кодирования названия субъектов РФ в матрице бинарных переменных (табл. 3)

была получена модель региональных запасов, соответствующих сомкнутым сосновым древостоям разной средней высоты (2). Линии регрессии запасов по регионам представлены на рисунке 1.

Таблица 3. Кодирование бинарными переменными стандартных значений запаса по субъектам ЦФО

Table 3. Coding of standard stock values by subjects of the Central Federal District with binary variables

Субъект РФ Subject of RF	Блочные фиктивные переменные / Block dummy variables															
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
Белгородская обл. / Belgorod region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Брянская обл. / Bryansk region	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Владимирская обл. / Vladimir region	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Воронежская обл. / Voronezh region	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ивановская обл. / Ivanovo region	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Калужская обл. / Kaluga region	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Костромская обл. / Kostroma region	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Курская обл. / Kursk region	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Липецкая обл. / Lipetsk region	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Московская обл. / Moscow region	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Орловская обл. / Oryol region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Рязанская обл. / Ryazan region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Смоленская обл. / Smolensk region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Тамбовская обл. / Tambov region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Тверская обл. / Tver region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Тульская обл. / Tula region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ярославская обл. / Yaroslavl region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

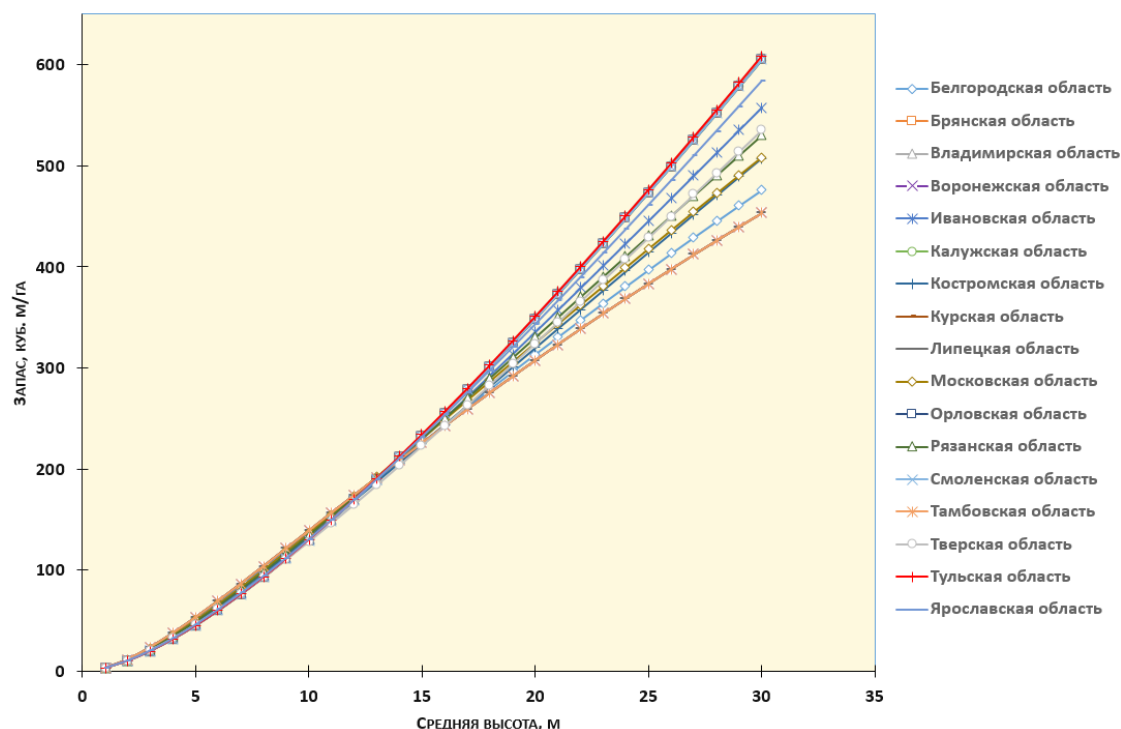


Рис. 1. Графическое представление изменения запаса сомкнутых сосновых древостоев от средней высоты, полученное по модели (2)

Fig. 1. Graphical representation of the change in the stock of closed pine stands from the average height obtained from the model (2)

В результате анализа получена регрессионная модель стандартных запасов вида:

$$M = \exp(1,34852 + 1,83468 \ln H - 0,12268 \ln^2 H + \ln H(-0,22177X_1 - 0,21855X_2 + 0,0X_3 - 0,16308X_4 - 0,22177X_5 - 0,10344X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 - 0,04488X_9 - 0,22177X_{10} - 0,10151X_{11} - 0,22177X_{12} + 0,0X_{13} - 0,13604X_{14} - 0,21855X_{15} - 0,18919X_{16}) + \ln^2 H(0,08595X_1 + 0,08552X_2 + 0,0X_3 + 0,06285X_4 + 0,08595X_5 + 0,03851X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 + 0,01892X_9 + 0,08595X_{10} + 0,04005X_{11} + 0,08595X_{12} + 0,0X_{13} + 0,05020X_{14} + 0,08552X_{15} + 0,07326X_{16}) + \ln^2 H(0,08595X_1 + 0,08552X_2 + 0,0X_3 + 0,06285X_4 + 0,08595X_5 + 0,03851X_6 + 0,0X_7 + 0,0X_8 + 0,01892X_9 + 0,08595X_{10} + 0,04005X_{11} + 0,08595X_{12} + 0,0X_{13} + 0,05020X_{14} + 0,08552X_{15} + 0,07326X_{16})) \quad (2)$$

$$R^2 = 0,999; E = \pm 2,1\%; t > t_{0,05} = 1,96$$

$$T = |9,2; 17,1; 6,1; 5,7; 5,6; 4,05,7; 2,7; 1,2; 5,7; 2,6; 5,7; 3,5; 5,6; 4,9; 6,8; 3,0; 1,5; 6,8; 3,1; 6,8; 3,9; 6,7; 5,8| > t_{0,05} = 1,96$$

$$F = 1399,9 \text{ при } P < 0,05$$

Модель характеризуется высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2 = 0,999$), значимостью численных коэффициентов уравнения ($t > t_{0,05}$) и достоверностью модели по F-критерию Фишера при $P < 0,05$,

незначительной стандартной ошибкой уравнения ($E = \pm 2,1\%$).

На следующем этапе полученные значения запаса перемножались на конверсионные коэффициенты фракций из таблицы 1 для 3 широтной полосы. В результате были получены данные, сведенные в таблицу с входами: 1) субъект РФ; 2) фракция фитомассы; 3) группа возраста; 4) относительная полнота древостоя; 5) доля сосны в составе древостоя; 6) средняя высота древостоя.

Для представления многомерных закономерностей изменений биомассы фракций фитомассы использована модель общего вида:

$$B_{\text{фр}} = \exp(\ln D \ln \Pi \sum_{i=1}^2 \ln^k H(a_k + \sum_{i=1}^n b_{k,i} X_i + \sum_{j=1}^m c_{k,j} Z_j + \sum_{q=1}^p d_{k,q} F_q)), \quad (2)$$

где $B_{\text{фр}}$ – биомасса фракций фитомассы, т/га; D – доля участия древесной породы в общем запасе древостоя; Π – относительная полнота древостоя, ед.; H – средняя высота древостоя, м; X_i – субъекты РФ ЦФО в алфавитном порядке; Z_j – фракции фитомассы (стволы, ветви, корни, хвоя); F_q – группы возраста древостоев (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные).

Для построения модели, учитывающий перечисленные переменные, была сформирована матрица бинарных переменных, фрагмент которой представлен в таблице 4.

Таблица 4. Матрица кодирования субъектов РФ ЦФО, фракций фитомассы, групп возраста для модели биологической продуктивности сосновых древостоев (фрагмент)

Table 4. Coding matrix of the subjects of the Russian Federation of the Central Federal District, phytomass fractions, age groups for the model of biological productivity of pine forests (fragment)

Субъект РФ Subject of RF	Фракция фитомассы Phytomass fraction	Группа возраста Age group	Фиктивные блоковые переменные / Block dummy variables									
			Субъект РФ/ Subject of RF				фракция фитомассы Phytomass fraction			группа возраста Age group		
			X_1	X_2	И т.д.	X_{16}	Z_1	Z_2	Z_3	F_1	F_2	F_3
Белгородская обл./ Belgorod region	Стволы Trunks	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	0	0	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	0	0	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	0	0	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overriped	0	0	И т.д.	0	0	0	0	0	0	1
	Ветви Branches	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	0	1	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	0	1	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	0	1	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overriped	0	0	И т.д.	0	1	0	0	0	0	1
	Корни Roots	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	0	0	1	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	0	0	1	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	0	0	1	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overriped	0	0	И т.д.	0	0	1	0	0	0	1
	Хвоя Needles	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	0	0	0	1	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	0	0	0	1	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	0	0	0	1	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overriped	0	0	И т.д.	0	0	0	1	0	0	1

И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.	И т.д.
Брянская обл. / Bryansk region	Стволы Trunks	Молодняки Youngsters	1	0	И т.д.	0	0	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	1	0	И т.д.	0	0	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	1	0	И т.д.	0	0	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	1	0	И т.д.	0	0	0	0	0	0	1
	Ветви Branches	Молодняки Youngsters	1	0	И т.д.	0	1	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	1	0	И т.д.	0	1	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	1	0	И т.д.	0	1	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	1	0	И т.д.	0	1	0	0	0	0	1
	Корни Roots	Молодняки Youngsters	1	0	И т.д.	0	0	1	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	1	0	И т.д.	0	0	1	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	1	0	И т.д.	0	0	1	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	1	0	И т.д.	0	0	1	0	0	0	1
	Хвоя Needles	Молодняки Youngsters	1	0	И т.д.	0	0	0	1	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	1	0	И т.д.	0	0	0	1	1	0	0
		Приспевающие Ripening	1	0	И т.д.	0	0	0	1	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	1	0	И т.д.	0	0	0	1	0	0	1
Ярославская обл. / Yaroslavl region	Стволы Trunks	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	1	0	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	1	0	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	1	0	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	0	0	И т.д.	1	0	0	0	0	0	1
	Ветви Branches	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	1	1	0	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	1	1	0	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	1	1	0	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	0	0	И т.д.	1	1	0	0	0	0	1
	Корни Roots	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	1	0	1	0	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	1	0	1	0	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	1	0	1	0	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	0	0	И т.д.	1	0	1	0	0	0	1
	Хвоя Needles	Молодняки Youngsters	0	0	И т.д.	1	0	0	1	0	0	0
		Средневозрастные Middle-aged	0	0	И т.д.	1	0	0	1	1	0	0
		Приспевающие Ripening	0	0	И т.д.	1	0	0	1	0	1	0
		Спелые и перестойные Ripe and overripened	0	0	И т.д.	1	0	0	1	0	0	1

Регрессионный анализ данных, сведенных в таблицу, позволил получить уравнение (3).

$$\begin{aligned}
 B_{\text{фр}} = & \exp(0,29904 - 1,37734Z_1 - 0,84881Z_2 - \\
 & 1,28366Z_3 + 0,00670F_1 + 0,02004F_2 + \\
 & + 0,10063F_3 + 2,00357\ln H - 0,15214\ln^2 H + \\
 & + 0,99999\ln 0,1D + 0,99999\ln \Pi + \ln H(-0,22176X_1 - \\
 & - 0,21857X_2 + 0,05422X_3 - 0,15393X_4 - 0,22176X_5 - \\
 & - 0,08346X_6 + 0,05422X_7 + 0,05422X_8 - 0,04489X_9 - \\
 & - 0,22176X_{10} - 0,08965X_{11} - 0,22176X_{12} + \\
 & + 0,05422X_{13} - 0,14718X_{14} - 0,21857X_{15} - \\
 & - 0,18921X_{16}) + \ln^2 H(0,08594X_1 + 0,08553X_2 - \\
 & - 0,02018X_3 + 0,05899X_4 + 0,08594X_5 + 0,03009X_6 - \\
 & - 0,02018X_7 - 0,02018X_8 + 0,01892X_9 + \\
 & + 0,08594X_{10} + 0,03564X_{11} + 0,08594X_{12} - \\
 & - 0,02018X_{13} + 0,05252X_{14} + 0,08553X_{15} + \\
 & + 0,07326X_{16}) - 0,53554Z_1F_1 - 0,64422Z_1F_2 - \\
 & - 0,75000Z_1F_3 - 0,18481Z_2F_1 - 0,41503Z_2F_2 - \\
 & - 0,52000Z_2F_3 - 1,35310Z_3F_1 - \\
 & - 1,57411Z_3F_2 - 1,69392Z_3F_3)) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 1,0; ES = \pm 0,2\%; t > t_{0,5} = 1,96$$

$T = |838,9; 5693,3; 3508,6; 5306,0; 27,7; 82,8; 415,9; 4020,1; 1011,2; 360,0; 388,0; 382,4; 94,9; 269,3; 388; 146,0; 94,9; 388,0; 382,4; 94,9; 269,3; 388,0; 146,0; 94,9; 78,5; 388,0; 156,8; 388,0; 94,9; 257,5; 382,4; 331,0; 442,3; 440,2; 103,9; 303,6; 442,3; 154,9; 103,9; 97,4; 442,3; 183,4; 442,3; 103,9; 270,3; 440,2; 377,0; 1565,3; 1883,0; 2167,7; 540,2; 1213,1; 1250,0; 3954,9; 4600,9; 4951,0| > t_{0,5} = 1,96.$

Показатель детерминации модели (3) биологической продуктивности древостоев ($R^2 = 1,0$) указывает на функциональное соответствие рассчитанных значений фракций фитомассы через усредненные по группам возраста конверсионные коэффициенты (табл. 2) и запас по модели (1) результатам, полученным по модели.

Предложенная модель позволяет провести цифровизацию нормативов оценки влияния на продуктивность фракций фитомассы сосняков в 17 субъектах РФ по группам возраста

в древостоях разной средней высоты, полноты, доли участия сосны в составе. Для наглядности региональные изменения биомассы фракций от средней высоты сомкнутых сосновых древостоев по усредненным значениям конверсионных коэффициентов в группах возраста представлены на рисунке 2.

Оценивая графические изображения региональных взаимосвязей биомассы и средней высоты древостоев, следует указать на существенное расхождение линий регрессий в зависимости от группы возраста. Ранжирование расхождений позволяет оценить влияние возраста на биомассу древостоев. Так, наименьшее влияние возраста отмечается по стволу древесине, второе место

занимает биомасса корней, затем следует биомасса ветвей, а наибольшее расхождение свойственно биомассе хвои древостоев. При этом следует указать на главный недостаток предложенной модели: она априори не может иметь точность выше, чем точность усредненных значений конверсионных коэффициентов фитомассы, указанных в таблице 3.

Таким образом, располагая усредненными значениями конверсионных коэффициентов фракций фитомассы и региональными нормативами стандартных запасов, можно получить модель цифровизации многорегиональных нормативов биологической продуктивности древостоев по другим федеральным округам РФ.

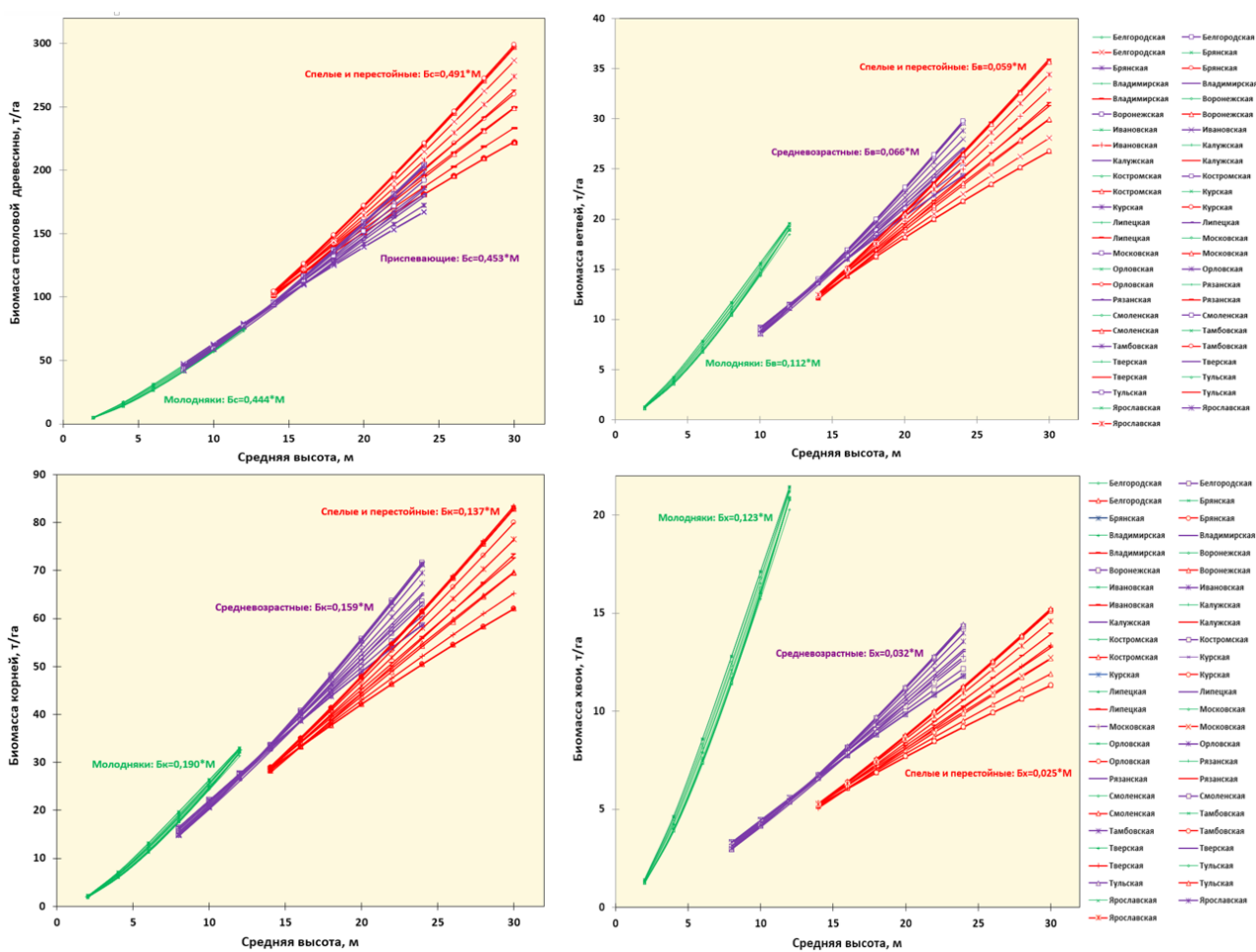


Рис. 2. Изменение продуктивности фракций фитомассы от средней высоты в разрезе усредненных по группам возраста значений конверсионных коэффициентов 17 субъектов РФ ЦФО

Fig. 2. Change in the productivity of phytomass fractions from the average height in the context of the values of conversion coefficients averaged by age groups in 17 subjects of the Russian Federation, the Central Federal District

Список использованных источников

1. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов: Распоряжение Минприроды России от 30 июня 2017 г. № 20-р (ред. от 20 января 2021 г.).

References

1. On approval of methodological guidelines for quantitative determination of the volume of absorption of greenhouse gases: Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 No. 20-r (as amended)

URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r/>.

2. **Усольцев В.А.** Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.

3. **Усольцев В.А.** Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее применение. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

4. **Усольцев В.А.** Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 568 с.

5. **Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В.** Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесостроительство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119-127.

6. **Хлюстов В.К., Васенёв И.И., Ганихин А.М.** Влияние климатических показателей на продуктивность сосновых древостоев // Природообустройство. 2022. № 5. С. 28-38.

7. Моделирование конверсионных коэффициентов фракций фитомассы для определения биологической продуктивности древостоев // Природообустройство. 2023. № 3. С. 105-115. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-105-115>.

8. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Критерии авторства

Хлюстов В.К., Ганихин А.М. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Хлюстов В.К., Ганихин А.М. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 05.04.2023

Одобрена после рецензирования 10.06.2023

Принята к публикации 15.06.2023

on January 20, 2021). URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r/>.

2. **Usoltsev V.A.** Phytomass of Forests of Northern Eurasia: Database and Geography: Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001. 706 с. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география: Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.

3. **Usoltsev V.A.** Biological productivity of the forests of Northern Eurasia: methods, database and its application: Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p.

4. **Usoltsev V.A.** Phytomass and primary production of Eurasian forests. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 568 p.

5. **Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V.** Coefficients of conversion of plantation reserves into phytomass of the main forest-forming species of Russia. 2003. Issue 1 (32). P. 119-127.

6. **Khlyustov V.K., Vasenev I.I., Ganikhin A.M.** Influence of climatic indicators on the productivity of pine forest stands. 2022. № 5. P. 28-38.

7. **Khlyustov V.K., Ganikhin A.M.** Modeling of conversion coefficients of phytomass fractions to determine the biological productivity of forest stands. 2023. № 3. P. 105-115. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-105-115>.

8. **Dreiper N., Smith G.** Applied regression analysis. M.; Statistics, 1973. 392 p.

Criteria of authorship

Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. carried out practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. have the copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Contribution of authors

All authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

The article was received at the editorial office: 05.04.2023 after peer review

Approved after peer review: 10.06.2023

Accepted for publication: 15.06.2023