

Таксационные нормативы для оценки фитомассы лесов с применением компьютерного моделирования как основа устойчивого ведения лесного хозяйства

В.А. Усольцев, д.с.-х.н., профессор, Уральский ГЛТУ, Ботанический сад УрО РАН; Е.В. Кох, к.с.-х.н., В.П. Часовских, д.т.н., профессор, Уральский ГЛТУ; А.И. Колтунова, д.с.-х.н., профессор, Оренбургский ГАУ

В связи с проблемой глобальных климатических изменений приобретает особую актуальность менеджмент биосферных функций лесов, в

частности повышение эффективности принятия решений при оценке фитомассы и углеродного пула лесов с применением современных таксационных нормативов [1]. Для устойчивого управления лесным хозяйством необходимы соответствующие информационные ресурсы [2–4], в число которых входит базовая система таксационных нормативов по учёту лесных ресурсов, традиционно основанная

на таблицах по учёту объёма стволовой древесины, но которая в настоящее время переходит к оценке фитомассы и углеродного пула лесов России на основе современных АТ-технологий.

Цель работы – построение региональных регрессионных моделей и таблиц для оценки структуры фитомассы деревьев лесобразующих пород Евразии.

Материал и методы исследования. Для разработки региональных регрессионных моделей и таблиц фитомассы лесов Евразии из авторской базы данных в количестве 7,3 тыс. модельных деревьев [5]

использованы материалы 7025 деревьев 11 лесобразующих пород с определениями фитомассы стволов, ветвей, хвои (листвы) и корней (табл. 1).

Экорегions, в которых расположены пробные площади с определениями фитомассы деревьев, закодированы блоковыми фиктивными переменными [6]. Эти фиктивные переменные (*dummy variables*), введённые затем в уравнение фитомассы дерева наряду с диаметром и высотой ствола, характеризуют степень дистанцирования, или отличия величины фитомассы равновеликих деревьев в каждом экорегиионе от исходного (нулевого). Тем

1. Распределение количества модельных деревьев с определениями фитомассы (кг) по видам (родам, под родам) и странам

Род (подрод, вид)	Систематическое название	Страна	Количество модельных деревьев, шт.
Сосна, естественные	подрод <i>Pinus</i> L.	Россия, Казахстан, Великобритания, Китай, Швейцария	2048
Сосна, культуры		Россия, Казахстан, Чехия, Болгария, Япония, Белоруссия, Словакия, Латвия, Ирак	637
Ель	род <i>Picea</i> A.Dietr.	Россия, Германия, Чехия, Болгария, Швейцария, Латвия, Бельгия, Швеция, Италия	1087
Пихта	род <i>Abies</i> Mill.	Россия, Чехия, Япония	180
Лиственница	род <i>Larix</i> Mill.	Россия, Япония, Китай, Чехия, Швейцария, Казахстан, Монголия	522
Кедр	подрод <i>Haploxyylon</i> (Koehe) Pilg.	Россия	170
Берёза	род <i>Betula</i> L.	Россия, Северный Казахстан, Япония, Монголия, Китай, Великобритания, Франция, Бельгия, Финляндия, Азербайджан	1291
Осина и тополя	род <i>Populus</i> L.	Россия, Казахстан, Монголия	513
Липа	род <i>Tilia</i> L.	Россия, Чехия, Болгария	389
Дуб	род <i>Quercus</i> L.	Россия, Болгария, Япония, Чехия, Швейцария, Венгрия	130
Ясень	род <i>Fraxinus</i> L.	Россия, Чехия, Китай	31
Клён	род <i>Acer</i> L.	Россия, Болгария	27
		Итого	7025

2. Схемы кодирования региональных массивов данных о фитомассе деревьев лесобразующих пород Евразии

2.1. Двухвойные сосны (*Pinus sylvestris*, *P. densiflora*, *P. nigra*, *P. tabulaeformis*, *P. taeda*, *P. thunbergii*)

Регион	Блоковые фиктивные переменные																
	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	X ₁₇
СЕш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРср	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРюж	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРст	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРср	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРст	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСюж	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ССюж	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
АСлс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
КМ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Кит	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ЯПш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.2. Лиственницы (*L. sibirica*, *L. cajanderi*, *L. sukaczewii*, *L. leptolepis*, *L. gmelinii*, *L. olgensis*, *L. decidua*)

Регион	Блочные фиктивные переменные												
	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
СЕш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРюж	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСсев	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ССср	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
АСлс	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ВСсев	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ЗБюж	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВСев	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ДВюж	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
КИТхш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ЯПш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.3. Ели (*Picea abies*, *P. obovata*, *P. schrenkiana*, *P. jezoensis*, *P. purpurea*, *P. koraiensis*)

Регион	Блочные фиктивные переменные						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
СЕш	0	0	0	0	0	0	0
СР	1	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	1	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	1	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	1	0	0	0
ПТ	0	0	0	0	1	0	0
ДВаян*	0	0	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	0	0	1

2.4. Пихты (*Abies sibirica*, *A. alba*, *A. veitchii*, *A. holophylla*, *A. nephrolepis*, *A. firma*)

Регион	Блочные фиктивные переменные				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
СЕш	0	0	0	0	0
УРюж	1	0	0	0	0
АС	0	1	0	0	0
ДВцел*	0	0	1	0	0
ДВбел*	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	1

Примечание: *ДВаян – ель аянская; ДВцел – пихта цельнолистная; ДВбел – пихта белокорая

2.5. Кедры (*Pinus sibirica*, *P. koraiensis*)

Регион	Блочные фиктивные переменные	
	X ₁	X ₂
УРюж	0	0
ЗСлс	1	0
ДВхш	0	1

2.6. Берёзы (*Betula alba*, *B. platyphylla*, *B. fruticosa*, *B. costata*, *B. dahurica*, *B. ermanii*)

Регион	Блочные фиктивные переменные											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
СЕ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СР	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВР	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
УР	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗБ	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ДВСев	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ДВплат	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ДВжелт	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВчёрн	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
КАВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ЯП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.7. Осины и тополя (*Populus tremula*, *P. nigra*, *P. davidiana*)

Регион	Блочные фиктивные переменные								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
СРср	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0	0	0	0
СРлс	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ВРср	0	0	1	0	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ЗСюж	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ССюж	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ЗБюж	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ДВхш	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.8. Липы (*Tilia cordata*, *T. parvifolia*, *T. tomentosa*, *T. amurensis*, *T. mandshurica*)

Регион	Блочные фиктивные переменные					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
СЕш	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0
СРст	0	1	0	0	0	0
ВРюж	0	0	1	0	0	0
УРюж	0	0	0	1	0	0
ДВам*	0	0	0	0	1	0
ДВман*	0	0	0	0	0	1

Примечание: *ДВам – липа амурская, ДВман – липа маньчжурская

2.9. Дубы (*Quercus robur*, *Q. rubra*, *Q. longipes*, *Q. sessiliflora*, *Q. frainetto*, *Q. petraea*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*)

Регион	Блочные фиктивные переменные							
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
СЕчер*	0	0	0	0	0	0	0	0
СЕКрас*	1	0	0	0	0	0	0	0
СЕвар*	0	1	0	0	0	0	0	0
СЕСкал*	0	0	1	0	0	0	0	0
СЕвенг*	0	0	0	1	0	0	0	0
СРхш	0	0	0	0	1	0	0	0
СРст	0	0	0	0	0	1	0	0
ДВхш	0	0	0	0	0	0	1	0
Яп	0	0	0	0	0	0	0	1

2.10. Ясени (*Fraxinus excelsior*, *F. lanceolata*, *F. mandshurica*)

Регион	Блочные фиктивные переменные		
	X ₁	X ₂	X ₃
СЕш	0	0	0
СРлс	1	0	0
ВРст	0	1	0
ДВхш	0	0	1

2.11. Клёны (*Acer platanoides*, *A. campestre*, *A. mandshuricum*, *A. mono*)

Регион	Блочные фиктивные переменные			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
СЕш	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0
СРст	0	1	0	0
ДВман**	0	0	1	0
ДВмелк**	0	0	0	1

Примечание: *дубы: СЕчер – черешчатый, СЕКрас – красный, СЕвар – вардимский, СЕСкал – скальный, СЕвенг – венгерский; **клёны: ДВман – маньчжурский, ДВмелк – мелколистный; обозначения регионов на схемах кодирования региональных массивов данных (2–12): СЕш – Средне-Европейская провинция, широколиственные леса; СРср – Скандинавско-Русская провинция, средняя тайга; СРюж – Скандинавско-Русская провинция, южная тайга; СРхш – Скандинавско-Русская провинция, хвойно-широколиственные леса; СРш – Скандинавско-Русская провинция, широколиственные леса; СРст – Скандинавско-Русская провинция, степь; ВРсев – Восток Русской равнины, северная тайга; ВРср – Восток Русской равнины, средняя тайга; ВРюж – Восток Русской равнины, южная тайга; ВРш – Восток Русской равнины, широколиственные леса; ВРст – Восток Русской равнины, степь; УРсев – Уральская провинция, северная тайга; УРср – Уральская провинция, средняя тайга; УРюж – Уральская провинция, южная тайга; ЗСср – Западно-Сибирская равнинная провинция, средняя тайга; ЗСюж – Западно-Сибирская равнинная провинция, южная тайга; ЗСлс – Западно-Сибирская равнинная провинция, лесостепь; ЗСст – Западно-Сибирская равнинная провинция, степь; ССсев – Средне-Сибирская плоскогорная провинция, северная тайга; ССср – то же, средняя тайга; ССюж – то же, южная тайга; ВСср – Восточно-Сибирская горноравнинная провинция, средняя тайга; ЗБср – Забайкальская горная провинция, средняя тайга; ЗБюж – то же, южная тайга; АСюж – Алтае-Саянская горная провинция, южная тайга; АСлс – Алтае-Саянская горная провинция, лесостепь; ЯПхш – Япония, Хонсю, хвойно-широколиственные леса; ПЧсуб – Причерноморская провинция, субтропики

самым экорегионы ранжируются по величине фитомассы равновеликих деревьев.

В таблице 2 приводятся схемы кодирования региональных массивов данных о фитомассе деревьев лесообразующих пород Евразии (2.1.–2.11.).

Уравнения для оценки фитомассы деревьев, включающие в качестве независимых переменных диаметр ствола и высоту дерева, а также один из блоков фиктивных переменных, приведённых выше, имеют общий вид:

$$\ln Pi = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln H)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln D)^2 + a_5(\ln D \cdot \ln H) + Y(a_i X_i), \quad (1)$$

где (здесь и далее): P_i – масса i -й фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг (ствола, ветвей, листвы или хвои, надземная и подземная, соответственно P_{st} , P_{br} , P_f , P_a , P_r).

Поскольку в аллометрической модели константа масштабирования (аллометрическая константа) изменяется по мере увеличения размера дерева [7] и зависимость более корректно описывается функцией Корсуня – Бакмана [8, 9], в аллометрическую модель (1) введены переменные $(\ln H)^2$ и $(\ln D)^2$. Ввиду того, что данных о массе корней существенно меньше, чем о фитомассе надземных фракций, в регрессионное уравнение для корней дополнительно включена в качестве независимой

переменной надземная фитомасса. Тем самым масса корней связывается с надземной фитомассой, но эта связь корректируется влиянием высоты и диаметра ствола:

$$\ln Pr = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln D) + a_3(\ln Pa) + Y(a_i X_i). \quad (2)$$

Поскольку данные фитомассы сосен представлены как из естественных древостоев, так и из культур, в уравнение дополнительно включена бинарная переменная X , кодирующая принадлежность дерева к естественным древостоям ($X=0$) или культурам ($X=1$):

$$\ln Pi = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln H)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln D)^2 + a_5(\ln D \cdot \ln H) + a_6 X + Y(a_i X_i). \quad (3)$$

Ввод бинарной переменной в выражение (3) для сосен обусловлен разной морфологией естественных сосняков и культур, особенно на первых этапах их роста.

Результаты исследования. Результаты расчёта уравнений (1) – (3) для лесообразующих пород приведены в таблицах 3 и 4 (4.1.–4.10.). В уравнениях здесь и далее показаны лишь переменные, значимые на уровне вероятности P_{95} и выше. В таблицах R^2 – коэффициент детерминации; SE – стандартная ошибка уравнения.

3. Характеристика уравнений (2) и (3) для естественных насаждений и культур двухвойных сосен Евразии

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-3,6890	2,0545	-0,2963	0,8358	0,0986	0,1911	-
$\ln(Pbr)$, кг	-5,6715	1,6683	-0,6355	1,6969	0,2351	0,1194	-
$\ln(Pf)$, кг	-5,1903	0,7538	-0,6874	2,1059	-0,1218	0,5484	-
$\ln(Pa)$, кг	-3,2080	1,5307	-0,1631	1,2716	0,1799	-0,0429	-
$\ln(Pr)$, кг	-0,8373	-0,1659	-	0,1485	-	-	1,0011
	a_7X	a_8X_1	a_9X_2	$a_{10}X_3$	$a_{11}X_4$	$a_{12}X_5$	$a_{13}X_6$
$\ln(Pst)$, кг	0,0224	0,0918	-0,2966	-0,2293	0,7375	0,0902	0,0913
$\ln(Pbr)$, кг	0,2265	0,3720	0,2449	-0,1857	0,7428	-0,2783	0,3929
$\ln(Pf)$, кг	0,4473	0,7490	0,8306	0,3343	-0,6621	0,3130	0,5400
$\ln(Pa)$, кг	0,0964	0,1657	-0,1222	-0,1529	0,6043	0,0528	0,1363
$\ln(Pr)$, кг	-0,8257	-0,6192	-0,8956	-0,4407	0,1386	-0,9319	-0,5635
	$a_{14}X_7$	$a_{15}X_8$	$a_{16}X_9$	$a_{17}X_{10}$	$a_{18}X_{11}$	$a_{19}X_{12}$	$a_{20}X_{13}$
$\ln(Pst)$, кг	-0,0629	-0,1599	0,1206	-0,2532	-0,1719	-0,3290	-0,1511
$\ln(Pbr)$, кг	0,4724	0,0446	-0,2091	0,0015	-0,1656	-0,2364	0,6164
$\ln(Pf)$, кг	1,0944	0,4177	0,3586	0,4990	0,3100	0,2601	0,3522
$\ln(Pa)$, кг	0,3285	-0,0837	0,1056	-0,1525	-0,1188	-0,2887	0,0872
$\ln(Pr)$, кг	0,1542	-1,3488	-0,8084	-1,0624	-0,1432	-0,7283	0,1338
	$a_{21}X_{14}$	$a_{22}X_{15}$	$a_{23}X_{16}$	$a_{24}X_{17}$	R^2	SE	
$\ln(Pst)$, кг	-0,2509	-0,2765	-0,0892	0,3149	0,991	0,25	
$\ln(Pbr)$, кг	0,5088	-0,3688	0,3093	0,6030	0,957	0,55	
$\ln(Pf)$, кг	0,6664	0,2807	0,5017	0,5204	0,931	0,59	
$\ln(Pa)$, кг	-0,1177	-0,1944	0,0153	0,3969	0,988	0,29	
$\ln(Pr)$, кг	-0,0015	-0,0871	0,1097	0,4118	0,990	0,33	

Для остальных древесных пород выполнен расчёт уравнений (1) и (2), результаты которого даны в таблице 4.

4. Характеристика уравнений (1) и (2) для лесобразующих пород Евразии (кроме сосен)

4.1. Лиственницы

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-1,8110	-0,6893	0,6115	2,1250	0,1641	-0,4934	-	
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5380	-1,1466	-1,5002	1,2242	-1,1965	3,0528	-	
$\ln(Pf)$, кг	-3,5492	1,1774	-1,9580	0,2320	-1,0580	3,0405	-	
$\ln(Pa)$, кг	-0,9083	-0,9365	0,2978	1,9939	-0,0703	0,0959	-	
$\ln(Pr)$, кг	-1,8010	-0,1132	-	0,6267	-	-	0,6769	
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$	
$\ln(Pst)$, кг	-0,0513	-0,4015	-0,2352	-0,0838	-0,0086	-0,0736	0,0127	
$\ln(Pbr)$, кг	0,1231	0,6671	-0,4311	-0,7047	-0,4368	-0,2504	-0,0412	
$\ln(Pf)$, кг	0,5680	1,0806	0,4948	-0,1657	0,2153	0,7951	0,4399	
$\ln(Pa)$, кг	-0,0417	-0,1957	-0,2308	-0,1593	-0,0551	-0,0302	0,0860	
$\ln(Pr)$, кг	-1,4084	-0,1514	-0,5138	-0,5060	0,0112	-0,0734	0,1976	
	$a_{14}X_8$	$a_{15}X_9$	$a_{16}X_{10}$	$a_{17}X_{11}$	$a_{18}X_{12}$	$a_{19}X_{13}$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,2044	-0,0738	-0,0054	-0,1319	-0,3556	-0,0803	0,992	0,18
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5444	-0,4648	-0,2909	-0,6420	-0,5336	-0,4936	0,908	0,53
$\ln(Pf)$, кг	0,3065	0,2795	0,1629	-0,2173	0,9563	-0,1630	0,903	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1263	-0,0870	-0,0242	-0,1993	-0,3449	-0,1420	0,991	0,17
$\ln(Pr)$, кг	0,3491	0,3252	1,3740	0,6654	0,6617	0,4690	0,949	0,46

4.2. Ели

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	a_7X_1
$\ln(Pst)$, кг	-1,5825	-	1,0777	1,1507	0,8585	-1,6076	-	-0,1219
$\ln(Pbr)$, кг	-2,3973	-	0,3456	1,0454	0,6754	-0,8323	-	0,2325
$\ln(Pf)$, кг	-1,9283	0,2959	-0,3642	0,6811	0,1711	0,3436	-	0,0120
$\ln(Pa)$, кг	-0,5079	-0,6070	1,1167	1,4008	0,8830	-1,6516	-	-0,0978
$\ln(Pr)$, кг	-2,0089	-0,0768	-	0,1360	-	-	1,0408	0,3916
	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,1888	-0,2055	-0,1167	0,2171	0,2039	0,5795	0,992	0,21
$\ln(Pbr)$, кг	0,4092	0,4631	0,1368	0,3460	0,2147	0,9232	0,877	0,60
$\ln(Pf)$, кг	-0,2548	0,2872	-0,4459	0,2841	-0,6338	0,3645	0,910	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1386	-0,0183	-0,2262	0,2052	0,0608	0,4979	0,986	0,24
$\ln(Pr)$, кг	0,5315	0,3865	0,8125	0,3064	0,3673	0,2822	0,972	0,40

4.3. Пихты

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,8766	2,0012	0,9513	0,3330	1,2636	-2,1284	–
$\ln(Pbr)$, кг	-3,0409	1,5502	1,3283	0,8008	2,0928	-3,5482	–
$\ln(Pf)$, кг	-2,6597	0,9569	–	0,5874	0,7777	-0,7485	–
$\ln(Pa)$, кг	-1,7903	1,7037	0,8611	0,3671	1,2970	-2,0844	–
$\ln(Pr)$, кг	-2,0653	-0,7469	–	1,1233	–	–	0,8153
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,1357	-0,8893	-0,0019	-0,1708	0,0643	0,995	0,19
$\ln(Pbr)$, кг	-0,2718	-2,2767	-0,0599	-0,2367	-0,6273	0,968	0,42
$\ln(Pf)$, кг	0,0956	-1,2137	-0,1671	0,0068	-0,0129	0,954	0,43
$\ln(Pa)$, кг	-0,1399	-1,1991	-0,0496	-0,1629	-0,0623	0,992	0,22
$\ln(Pr)$, кг	0,1233	-0,1524	0,2489	0,1907	0,3053	0,987	0,27

4.4. Кедр

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,7649	1,8622	-0,3999	0,3351	–	0,4846	–
$\ln(Pbr)$, кг	-3,7675	1,9299	-0,3734	0,7687	–	0,2017	–
$\ln(Pf)$, кг	-3,3510	1,2725	-0,2592	0,9429	–	0,1084	–
$\ln(Pa)$, кг	-1,9274	1,5808	-0,3348	0,6276	–	0,3481	–
$\ln(Pr)$, кг	0,4333	-1,2002	–	–	–	–	1,2556
	a_7X_1	a_8X_2	R^2	SE			
$\ln(Pst)$, кг	0,2503	0,3252	0,991	0,30			
$\ln(Pbr)$, кг	0,3078	0,3985	0,955	0,63			
$\ln(Pf)$, кг	0,7505	0,5062	0,940	0,55			
$\ln(Pa)$, кг	0,2829	0,2968	0,986	0,33			
$\ln(Pr)$, кг	-1,3898	0,0887	0,996	0,17			

4.5. Берёзы

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,8338	1,2639	-0,2003	0,9009	-0,0670	0,4320	–
$\ln(Pbr)$, кг	-2,4735	0,4290	-0,9885	0,3627	-0,5885	1,9908	–
$\ln(Pf)$, кг	-2,9630	0,0458	-1,1086	0,2154	-0,8435	2,3199	–
$\ln(Pa)$, кг	-2,4085	0,8589	-0,1019	1,0826	-0,0231	0,3463	–
$\ln(Pr)$, кг	-1,0749	-0,5953	–	0,9772	–	–	0,7501
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$
$\ln(Pst)$, кг	-0,1490	-0,2636	-0,1654	-0,1473	0,0906	-0,2369	0,1191
$\ln(Pbr)$, кг	-0,4457	-0,6821	-0,7716	-0,3831	-0,2403	0,3094	-0,1075
$\ln(Pf)$, кг	0,4098	0,4104	0,0348	0,5098	0,4632	0,9726	0,1971
$\ln(Pa)$, кг	-0,1566	-0,2446	-0,2700	-0,2237	0,0796	-0,0774	0,0623
$\ln(Pr)$, кг	-0,3712	-0,4212	-0,4883	-0,2095	-0,1441	-0,8753	-0,6396
	$a_{14}X_8$	$a_{15}X_9$	$a_{16}X_{10}$	$a_{17}X_{11}$	$a_{18}X_{12}$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,0654	0,0491	-0,1143	-0,1435	-0,0309	0,993	0,16
$\ln(Pbr)$, кг	0,4078	-0,3307	-0,1423	-0,1111	-0,3056	0,944	0,48
$\ln(Pf)$, кг	0,5117	-0,3736	0,3486	0,0672	-0,2596	0,913	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1042	-0,0296	0,0058	-0,1110	-0,0828	0,980	0,28
$\ln(Pr)$, кг	-0,1746	-0,3000	-0,2279	-0,2299	0,0678	0,983	0,28

4.6. Осины и тополя

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,0058	-0,3269	0,4003	1,8013	0,1436	-0,2618	–
$\ln(Pbr)$, кг	-3,2301	0,3180	-1,0601	1,5883	-0,3806	1,4701	–
$\ln(Pf)$, кг	-1,5465	-1,6591	-0,8395	1,9750	-0,7833	1,8430	–
$\ln(Pa)$, кг	-0,8703	-1,4816	0,6450	2,4799	0,1888	-0,5062	–
$\ln(Pr)$, кг	-0,6357	-0,3145	–	–	–	–	0,9808
	$a_7 X_1$	$a_8 X_2$	$a_9 X_3$	$a_{10} X_4$	$a_{11} X_5$	$a_{12} X_6$	$a_{13} X_7$
$\ln(Pst)$, кг	-0,1591	0,0050	-0,1837	-0,0857	-0,2120	-0,1249	-0,1281
$\ln(Pbr)$, кг	0,0603	0,2632	0,0370	-0,1278	-0,1447	0,0286	0,0687
$\ln(Pf)$, кг	-0,0567	0,1302	-0,1218	-0,2438	-0,4550	-0,3153	0,1742
$\ln(Pa)$, кг	-0,1349	0,0492	-0,1329	-0,0722	-0,2253	-0,0957	-0,0953
$\ln(Pr)$, кг	-0,1254	0,5937	0,0046	0,0560	0,4688	0,1287	-1,2185
	$a_{14} X_8$	$a_{15} X_9$	R^2	SE			
$\ln(Pst)$, кг	-0,1374	-0,0993	0,994	0,14			
$\ln(Pbr)$, кг	0,0166	0,3797	0,955	0,42			
$\ln(Pf)$, кг	-0,3493	-0,1037	0,919	0,44			
$\ln(Pa)$, кг	-0,1211	-0,0299	0,993	0,16			
$\ln(Pr)$, кг	-0,0216	0,0543	0,973	0,40			

4.7. Липы

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-3,6924	1,0153	–	1,6708	–	0,0600	–	
$\ln(Pbr)$, кг	2,1265	-2,2223	–	0,3297	–	0,7552	–	
$\ln(Pf)$, кг	-3,5304	-0,7370	–	2,2408	–	0,0588	–	
$\ln(Pa)$, кг	-1,9163	0,3934	–	1,3247	–	0,2093	–	
$\ln(Pr)$, кг	0,7954	-1,6087	–	–	–	–	1,3616	
	$a_7 X_1$	$a_8 X_2$	$a_9 X_3$	$a_{10} X_4$	$a_{11} X_5$	$a_{12} X_6$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,0744	0,0702	-0,0044	-0,0676	0,2329	0,1557	0,983	0,18
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5395	-0,3468	-1,4490	-0,6786	-0,1081	-0,2312	0,800	0,57
$\ln(Pf)$, кг	-0,6188	-0,7256	1,0274	-0,8997	0,1322	-0,4851	0,796	0,57
$\ln(Pa)$, кг	-0,1859	-0,2365	-0,1280	-0,1743	0,3402	0,0744	0,977	0,20
$\ln(Pr)$, кг	1,0767	1,0533	1,6137	0,8808	1,2553	0,7352	0,986	0,32

4.8 Дубы

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$	$a_5 X_1$	$a_6 X_2$	
$\ln(Pst)$, кг	-2,1989	0,4291	1,7015	0,1037	–	0,1100	-0,2097	
$\ln(Pbr)$, кг	-2,6746	-1,3204	2,9567	0,1076	–	0,4258	0,0509	
$\ln(Pf)$, кг	-2,7996	-1,5672	3,0163	-0,0589	–	0,7051	0,0911	
$\ln(Pa)$, кг	-1,6047	0,0383	1,9695	0,0994	–	0,1551	-0,1898	
$\ln(Pr)$, кг	2,0114	-1,4417	–	–	1,1303	0,1771	-0,3587	
	$a_7 X_3$	$a_8 X_4$	$a_9 X_5$	$a_{10} X_6$	$a_{11} X_7$	$a_{12} X_8$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,0347	0,1158	-0,2472	0,0811	0,2089	-0,1174	0,997	0,14
$\ln(Pbr)$, кг	0,4220	0,0425	0,0911	0,1426	-1,9308	0,3072	0,972	0,41
$\ln(Pf)$, кг	0,2639	0,1731	-0,0706	0,2468	2,8010	0,4540	0,971	0,36
$\ln(Pa)$, кг	0,0863	0,0725	-0,2285	0,0597	0,3442	-0,0141	0,997	0,15
$\ln(Pr)$, кг	-0,5365	-0,4618	-0,4919	0,3770	0,0616	-0,5804	0,977	0,30

4.9. Ясени

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная				
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,6643	0,8022	1,4275	0,1256	–
$\ln(Pbr)$, кг	3,8194	-3,8566	-0,0741	1,1830	–
$\ln(Pf)$, кг	2,1187	-3,7204	1,1360	0,6942	–
$\ln(Pa)$, кг	-1,2531	0,1088	1,1752	0,2913	–
$\ln(Pr)$, кг	1,0392	-0,6809	–	–	0,9205
	$a_5 X_1$	$a_6 X_2$	$a_7 X_3$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,3338	-0,0077	0,0398	0,999	0,11
$\ln(Pbr)$, кг	-0,7094	-0,4986	0,8560	0,950	0,66
$\ln(Pf)$, кг	0,2364	-0,2848	0,9014	0,905	0,63
$\ln(Pa)$, кг	-0,2454	0,0384	0,2933	0,998	0,11
$\ln(Pr)$, кг	-0,5179	-0,7452	-0,5045	0,997	0,14

4.10. Клёны

Зависимая переменная	Константа и независимая переменная					
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-3,2086	0,9689	1,8050	0,0242	–	
$\ln(Pbr)$, кг	-3,4762	-1,1194	4,0409	-0,2313	–	
$\ln(Pf)$, кг	-2,7701	-1,6265	3,4130	-0,2345	–	
$\ln(Pa)$, кг	-2,4851	0,83	2,1317	0,0042	–	
	a_5X_1	a_6X_2	a_7X_3	a_8X_4	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,3043	-0,0688	-0,2091	-0,0464	0,996	0,15
$\ln(Pbr)$, кг	0,3102	0,1242	0,1879	0,2357	0,976	0,40
$\ln(Pf)$, кг	1,4171	0,8259	0,7150	0,5552	0,976	0,25
$\ln(Pa)$, кг	-0,1393	0,0077	0,0049	0,0283	0,997	0,13

Вывод. Сформированная база данных о фитомассе деревьев лесообразующих пород Евразии дала возможность впервые разработать региональные регрессионные модели для оценки структуры фитомассы деревьев лесообразующих древесных пород Евразии по диаметру ствола и высоте дерева. Предложенная серия подеревных региональных моделей позволяет оценивать фитомассу на 1 га лесопокрытой площади по данным измерений диаметра и высоты дерева. Результаты исследования могут быть использованы в менеджменте биосферных функций лесов, при осуществлении мероприятий по стабилизации климата, а также при валидации результатов имитационных экспериментов по оценке углероддепонирующей способности лесов.

Литература

1. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 384 с.
2. Алексеев А.С. Устойчивое управление лесным хозяйством: научные основы и концепции / А.С. Алексеев, С. Келломяки, А.В. Любимов, Х. Паюя, В.М. Паянский-Гвоздев, А.П. Петров, О. Саастамойнен, А.В. Селиховкин, С.Н. Сеннов, В.А. Соловьев, С.В. Тетюхин. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 222 с.
3. Правоприменение и управление в лесном секторе России: взгляд гражданского общества / В. Тепляков, К. Сан-Лоран, К. Пахорукова, Н. Шматков. М.: Программа МСОП, 2005. 120 с.
4. Teplyakov V., Saint-Laurent C., Pakhorukova K., Shmatkov N. (eds.). The Beginning of the ENA FLEG Process in Russia: Civil Society Insights. Moscow: IUCN, 2005. 116 p.
5. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 336 с.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
7. Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // New Phytologist. 2015. Vol. 208. Issue 3. P. 736-749 (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.13571/epdf>).
8. Korsun F. Zivot normalniho porostu ve vzrochich // Lesn. Práce. 1935. Vol. 14. S. 335–342.
9. Backman G. Drei Wachstumfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's.) // Wilhelm Roux'Arch. Entwicklungsmechanik der Organismen. 1938. No 138. S. 37–58.