

Повышение эффективности принятия решений при оценке углеродного пула лиственных лесов на основе компьютерного моделирования: аддитивные модели фитомассы

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

В последние годы мировая лесная экология переживает невиданный по масштабам информационный всплеск в оценке биологической продуктивности лесов в связи с наблюдаемыми с 1960–1980-х гг. изменениями климата [1], предсказанными ещё в конце XIX века в работах отца глобального потепления Сванте Аррениуса [2]. В связи с проблемой глобальных климатических изменений приобретает особую актуальность менеджмент биосферных функций наших лесов, в частности повышение эффективности принятия решений при оценке фитомассы и углеродного пула лесов с применением современных методов компьютерного моделирования [3]. Для устойчивого управления лесным хозяйством необходимы соответствующие информационные ресурсы [4–6], в число которых входит базовая система моделей динамики лесных ресурсов, традиционно основанная на учёте объёма стволовой древесины, но в настоящее время ориентированная на оценку фитомассы и углеродного пула наших лесов на основе современных АТ-технологий.

В настоящей статье предпринята первая попытка разработки аддитивных аллометрических моделей фитомассы древостоев наиболее распространённой на территории Евразии породы – лиственницы (род *Larix* Mill.). Эти модели послужат основой для составления региональных трансевразийских нормативов для оценки фитомассы лиственных древостоев.

Материал и методы исследования. В последние годы для территории всей Евразии были впервые сформированы и опубликованы базы данных о фитомассе древостоев лесообразующих пород в количестве более 8000 определений на пробных площадях [7]. Из упомянутых баз данных взяты материалы в количестве 384 пробных площадей с определениями фитомассы древостоев лиственницы (т/га). Род *Larix* Mill. представлен восемью викарирующими видами (соответственно *L. decidua* Mill., *L. sukaczewii* N.Dyl., *L. sibirica* L., *L. gmelinii* Rupr., *L. cajanderi* Mayr., *L. olgensis* A.Henry, *L. Principis-Rupprechtii* Mayr., *L. leptolepis* Gord.), распределёнными по двенадцати экорегионам и обозначенными соответственно двенадцатью фиктивными переменными от X_0 до X_{11} (табл. 1).

Распределение пробных площадей, на которых определена фитомасса лиственных древостоев в экорегионах Евразии, показано на рисунке 1.

Согласно структуре дисагрегированной (расчленяемой) (disaggregation model) трёхшаговой аддитивной системы моделей [8, 9], общая фитомасса, оценённая по исходному уравнению, расчленяется на фракции согласно схеме, представленной на рисунке 2. Коэффициенты регрессионных моделей всех трёх шагов оцениваются одновременно, что обеспечивает аддитивность фитомассы всех фракций – общей, промежуточных и исходных [8].

Результаты исследования. Рассчитаны исходные аллометрические модели

$$\ln P_i = a_i + b_i (\ln A) + c_i (\ln A)^2 + d_i (\ln H) + e_i (\ln D) + f_i (\ln N) + \sum g_{ij} X_j, \quad (1)$$

где P_i – масса i -й фракции, т/га;

A – возраст древостоя, лет;

H – средняя высота древостоя, м;

D – средний диаметр стволов, см;

N – густота древостоя, тыс. экз/га;

$a-g$ – регрессионные коэффициенты;

i – индекс фракций фитомассы: общей (t), надземной (a), корней (r), кроны (c), ствола в коре (s), хвои (f), ветвей (b), древесины ствола (w) и коры ствола (bk);

j – индекс (код) в блоке фиктивных переменных, кодирующих экорегионы, от 0 до 11 (табл. 1).

Модель (1) после потенцирования приведена к виду:

$$P_i = a_i A^{b_i} A^{c_i (\ln A)} H^{d_i} D^{e_i} N^{f_i} e^{\sum g_{ij} X_j}. \quad (2)$$

Характеристика уравнений (1), полученная их аппроксимацией по фактическим данным фитомассы, после введения поправок на логарифмическое преобразование по Г.Л. Баскервиллю [10] и последующего потенцирования согласно (2) приведена в таблице 2. Все регрессионные коэффициенты уравнений (2) при численных переменных значимы на уровне вероятности $P_{0,95}$ и выше, и уравнения адекватны исходным данным.

Полученные уравнения (2) модифицированы согласно алгоритму, предложенному китайскими исследователями (табл. 3), и окончательный вид трансконтинентальной аддитивной модели фракционного состава фитомассы лиственных древостоев приведён в таблице 4. Модель действительна в диапазоне фактических данных возраста древостоев, средней высоты, среднего диаметра ствола

1. Схема кодирования региональных массивов фактических данных фитомассы 384 древостоев лиственницы

Регион*	Вид <i>Larix Mill.</i>	Блок фиктивных переменных											Диапазон				Число наблюдений
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	возраста, лет	густоты, тыс. экз/га	среднего диаметра, см	средней высоты, м	
ЗСЕ	<i>L. decidua Mill.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13÷210	0,19÷2,68	10,2÷72,9	4,2÷34,0	13
ЕР	<i>L. sukaczewii N.Dyl.</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10÷240	0,27÷122,5	1,9÷51,6	3,6÷40,0	58
Тст	<i>L. sukaczewii N.Dyl.</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12÷55	0,81÷6,27	5,2÷22,0	4,8÷21,1	13
ЗСс	<i>L. sibirica L.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25÷350	0,46÷10,7	3,5÷32,0	2,8÷31,5	19
ССс	<i>L. gmelinii Rupr.</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	30÷380	0,12÷5,70	3,2÷36,0	2,5÷34,0	50
ССюг	<i>L. sibirica L.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10÷200	0,36÷7,19	6,0÷30,0	8,9÷24,0	17
ЗБ	<i>L. gmelinii Rupr.</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	40÷190	0,11÷4,73	4,0÷28,4	4,0÷25,0	41
ВС	<i>L. cajanderi Mayr.</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	22÷380	0,24÷50,8	3,0÷29,0	5,4÷24,0	53
ДВс	<i>L. cajanderi Mayr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	15÷250	0,20÷52,2	1,1÷54,0	4,0÷26,0	30
ДВюг	<i>L. olgensis A.Henry</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	30÷160	0,37÷12,6	9,7÷29,4	12,0÷28,2	12
Кит	<i>L. gmelinii Rupr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	21÷186	0,21÷9,30	4,7÷37,6	5,9÷30,0	33
	<i>L. Principis-Rupprechtii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					
Яп	<i>L. leptolepis Gord.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9÷53	0,37÷6,74	6,2÷28,6	5,4÷23,6	45

* ЗСЕ – Западная и Средняя Европа, широколиственные леса; ЕР – Европейская часть России; Тст – Тургайская степь; ЗСс – Западная Сибирь, северная тайга; ССс – Средняя Сибирь, северная часть; ССюг – Средняя Сибирь, южная часть; ЗБ – Забайкалье; ВС – Восточная Сибирь, северная тайга; ДВс – Дальний Восток, северная тайга; ДВюг – Приморье; Кит – Северо-Восточный Китай; Яп – Японские острова

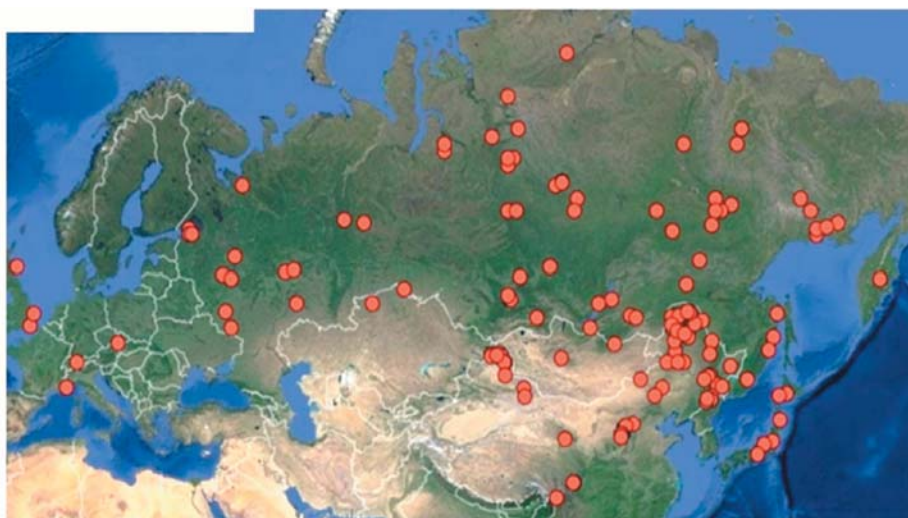


Рис. 1 – Распределение пробных площадей с измерениями фитомассы (т/га) 384 насаждений лиственницы (род *Larix Mill.*) на территории Евразии

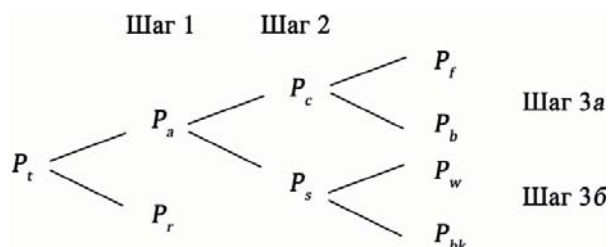


Рис. 2 – Блок-схема дисагрегированной (расчлняемой) трёхшаговой аддитивной модели фитомассы древостоев. Обозначения: $P_p, P_n, P_w, P_c, P_s, P_f, P_b, P_w$ и P_{bk} – соответственно фитомасса дерева: общая, подземная (корней), надземная, кроны (хвои и ветвей), ствола (древесины и коры), хвои, ветвей, древесины ствола и коры ствола, т/га

и густоты древостоев, приведённых в таблице 1, и характеризуется двойной гармонизацией, одна из которых обеспечивает принцип аддитивности фракций фитомассы, а вторая связана с вводом фиктивных переменных, локализирующих модель по экорегионам Евразии.

На следующем этапе исследования выполнено сопоставление адекватности построенной аддитивной модели (табл. 4) и исходных уравнений, показанных в таблице 2. Для корректного сопоставления из исходного массива данных удалены пробные площади с неполной фракционной структурой, т.е. оставлены лишь те записи, в которых имеются в наличии данные как по надземной, так и по подземной фитомассе. По модифицированному

2. Характеристика исходных аллометрических уравнений древостоев лиственницы

Независимые переменные и регрессионные коэффициенты модели										$adjR^2$						
Фракция фитомассы	P_t	0,1178	$A^{-0,0045}$	$H^{0,4126}$	$D^{1,9276}$	$N^{0,8816}$	$e^{-0,5449 \times I}$	$e^{0,4893 \times X2}$	$e^{-0,3895 \times X4}$	$e^{0,5867 \times X5}$	$e^{0,6192 \times X6}$	$e^{-0,4223 \times X9}$	$e^{0,3616 \times X10}$	$e^{-0,2468 \times X11}$	0,929	
		Шаг 1	0,1403	$A^{-0,0615}$	$H^{0,5003}$	$D^{1,8952}$	$N^{0,8307}$	$e^{-0,2220 \times I}$	$e^{0,1519 \times X2}$	$e^{0,0258 \times X3}$	$e^{-0,5183 \times X5}$	$e^{0,2958 \times X6}$	$e^{-0,1512 \times X9}$	$e^{0,0399 \times X10}$	$e^{-0,0457 \times X11}$	0,937
			0,0391	$A^{0,1389}$	$H^{0,4954}$	$D^{1,4246}$	$N^{0,7492}$	$e^{-0,5892 \times I}$	$e^{0,2886 \times X2}$	$e^{0,1678 \times X3}$	$e^{0,7926 \times X4}$	$e^{0,8049 \times X6}$	$e^{0,2912 \times X9}$	$e^{0,4791 \times X10}$	$e^{-0,5403 \times X11}$	0,765
			Шаг 2	0,3620	$A^{-0,3316}$	$H^{0,0678}$	$D^{1,9388}$	$N^{0,7538}$	$e^{-0,0961 \times I}$	$e^{-0,3647 \times X2}$	$e^{-0,4123 \times X3}$	$e^{0,0005 \times X4}$	$e^{0,0393 \times X6}$	$e^{-0,3609 \times X9}$	$e^{-0,3598 \times X10}$	$e^{-0,4764 \times X11}$
		0,0532		$A^{0,0234}$	$H^{0,7736}$	$D^{1,7536}$	$N^{0,8332}$	$e^{-0,3015 \times I}$	$e^{0,3440 \times X2}$	$e^{0,1616 \times X3}$	$e^{0,1067 \times X4}$	$e^{0,3240 \times X6}$	$e^{-0,0708 \times X9}$	$e^{0,1581 \times X10}$	$e^{-0,1073 \times X11}$	0,929
		Шаг 3а		0,1317	$A^{-0,5524}$	$H^{-0,1686}$	$D^{2,0176}$	$N^{0,8425}$	$e^{-0,3427 \times I}$	$e^{0,0103 \times X2}$	$e^{-0,0706 \times X3}$	$e^{0,6045 \times X4}$	$e^{0,6777 \times X6}$	$e^{-0,2398 \times X9}$	$e^{0,2200 \times X10}$	$e^{-0,2458 \times X11}$
			0,2323	$A^{-0,2655}$	$H^{-0,0383}$	$D^{1,9205}$	$N^{0,7200}$	$e^{-0,2118 \times I}$	$e^{-0,4288 \times X2}$	$e^{-0,4760 \times X3}$	$e^{-0,1666 \times X4}$	$e^{-0,1403 \times X6}$	$e^{-0,3827 \times X9}$	$e^{-0,5037 \times X10}$	$e^{-0,5138 \times X11}$	0,804
			Шаг 3б	0,0432	$A^{-0,0843}$	$H^{1,0759}$	$D^{1,5216}$	$N^{0,7924}$	$e^{-0,7106 \times I}$	$e^{0,6344 \times X2}$	$e^{-0,4098 \times X3}$	$e^{0,4705 \times X4}$	$e^{0,9157 \times X6}$	$e^{-0,0387 \times X9}$	$e^{0,5357 \times X10}$	$e^{-0,3935 \times X11}$
		0,0217		$A^{-0,0595}$	$H^{0,8140}$	$D^{1,3568}$	$N^{0,8048}$	$e^{-0,3719 \times I}$	$e^{0,7681 \times X2}$	$e^{0,5487 \times X3}$	$e^{0,5371 \times X4}$	$e^{1,1993 \times X6}$	$e^{-0,4083 \times X9}$	$e^{0,3324 \times X10}$	$e^{-0,2078 \times X11}$	0,865

3. Структура трёхшаговой аддитивной модели, реализуемой по принципу пропорционального взвешивания [8] (Обозначения здесь и далее на рисунке 1)

Шаг 1	$P_a = \frac{1}{1 + \frac{a_r D^{b_r} H^{c_r}}{a_a D^{b_a} H^{c_a}}} \times P_t$	$P_r = \frac{1}{1 + \frac{a_r D^{b_r} H^{c_r}}{a_a D^{b_a} H^{c_a}}} \times P_t$
Шаг 2	$P_c = \frac{1}{1 + \frac{a_s D^{b_s} H^{c_s}}{a_c D^{b_c} H^{c_c}}} \times P_a$	$P_s = \frac{1}{1 + \frac{a_s D^{b_s} H^{c_s}}{a_c D^{b_c} H^{c_c}}} \times P_a$
Шаг 3а	$P_f = \frac{1}{1 + \frac{a_b D^{b_b} H^{c_b}}{a_f D^{b_f} H^{c_f}}} \times P_c$	$P_b = \frac{1}{1 + \frac{a_b D^{b_b} H^{c_b}}{a_f D^{b_f} H^{c_f}}} \times P_c$
Шаг 3б	$P_w = \frac{1}{1 + \frac{a_{bk} D^{b_{bk}} H^{c_{bk}}}{a_w D^{b_w} H^{c_w}}} \times P_s$	$P_{bk} = \frac{1}{1 + \frac{a_{bk} D^{b_{bk}} H^{c_{bk}}}{a_w D^{b_w} H^{c_w}}} \times P_s$

таким способом массиву исходных данных аппроксимированы уравнения (2), и их окончательный вид дан в таблице 5. Как аддитивная модель, так и независимые уравнения протабулированы по фактическим массообразующим показателям массива фактических данных, и полученные расчётные значения фитомассы сопоставлены с фактическими по показателю $adjR^2$. Результаты сопоставления адекватности двух методов моделирования сведены в таблице 6 и свидетельствуют о том, что показатели адекватности двух систем уравнений близки между собой. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым и аддитивным моделям фитомассы древостоев (рис. 3), показывает отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям.

Построенная аддитивная модель (табл. 4) включает четыре численных независимых переменных. При табулировании её возникает проблема, которая заключается в том, что мы можем задать из четырёх переменных только возраст древостоя, а остальные три переменные могут быть введены в таблицу лишь в виде расчётных величин, полученных системой вспомогательных рекурсивных уравнений. Такие уравнения рассчитаны по исходному массиву фактических данных и показаны в таблице 7.

Результаты последовательного табулирования уравнений в таблицах 7 и 4 представляют довольно громоздкую таблицу, объём которой превышает формат журнальной статьи. Поэтому сравнительный анализ структуры фитомассы лиственничников разных экорегионов ограничим возрастом 100 лет (табл. 8). Согласно таблице 8, наибольшие значения фитомассы (210–450 т/га) соответствуют регионам, прилегающим к Атлантическому и Тихоокеанскому побережьям, а также регионам, расположенным на южном пределе ареала, и наименьшие – северо-таёжным регионам Сибири, где лиственничники произрастают на многолетней мерзлоте.

Показатели фитомассы разных экорегионов различаются не только по абсолютной величине,

4. Трёхшаговая аддитивная модель фракционного состава фитомассы древостоев лиственницы, реализованная по принципу пропорционального взвешивания

$$Pt = 0,1178A^{0,0045} H^{0,4126} D^{1,9276} N^{0,8816} e^{0,5449X1} e^{0,4893X2} e^{0,3044X3} e^{0,3895X4} e^{0,5867X5} e^{0,6192X6} e^{0,4966X7} e^{0,5633X8} e^{0,4223X9} e^{0,3616X10} e^{0,2468X11}$$

Шаг 1	$Pa = \frac{1}{1+0,2791A^{0,2004} H^{0,0050} D^{0,4706} N^{0,0815} e^{0,3672X1} e^{0,1366X2} e^{0,1420X3} e^{0,7618X4} e^{0,1140X5} e^{0,5090X6} e^{0,1317X7} e^{1,2360X8} e^{0,4424X9} e^{0,4392X10} e^{0,5860X11}} \times Pt$
	$Pr = \frac{1}{1+3,5833A^{0,2004} H^{0,0050} D^{0,4706} N^{0,0815} e^{0,3672X1} e^{0,1366X2} e^{0,1420X3} e^{0,7618X4} e^{0,1140X5} e^{0,5090X6} e^{0,1317X7} e^{1,2360X8} e^{0,4424X9} e^{0,4392X10} e^{0,5860X11}} \times Pt$
Шаг 2	$Pc = \frac{1}{1+0,1470A^{0,3551} H^{0,8414} D^{0,1853} N^{0,0794} e^{0,3975X1} e^{0,7087X2} e^{0,5740X3} e^{0,1063X4} e^{0,5214X5} e^{0,2847X6} e^{0,6598X7} e^{0,3629X8} e^{0,2901X9} e^{0,5179X10} e^{0,5836X11}} \times Pa$
	$Ps = \frac{1}{1+6,8026A^{0,3551} H^{0,8414} D^{0,1853} N^{0,0794} e^{0,3975X1} e^{0,7087X2} e^{0,5740X3} e^{0,1063X4} e^{0,5214X5} e^{0,2847X6} e^{0,6598X7} e^{0,3629X8} e^{0,2901X9} e^{0,5179X10} e^{0,5836X11}} \times Pa$
Шаг 3а	$Pf = \frac{1}{1+1,7637A^{0,2869} H^{0,1303} D^{0,0971} N^{0,1225} e^{0,5545X1} e^{0,4390X2} e^{0,4054X3} e^{0,7711X4} e^{0,7641X5} e^{0,8180X6} e^{0,8281X7} e^{0,8673X8} e^{0,1429X9} e^{0,7237X10} e^{0,2681X11}} \times Pc$
	$Pb = \frac{1}{1+0,5670A^{0,2869} H^{0,1303} D^{0,0971} N^{0,1225} e^{0,5545X1} e^{0,4390X2} e^{0,4054X3} e^{0,7711X4} e^{0,7641X5} e^{0,8180X6} e^{0,8281X7} e^{0,8673X8} e^{0,1429X9} e^{0,7237X10} e^{0,2681X11}} \times Pc$
Шаг 3б	$Pw = \frac{1}{1+0,5022A^{0,0249} H^{0,2619} D^{0,1648} N^{0,0124} e^{0,3387X1} e^{0,1337X2} e^{0,1388X3} e^{0,0666X4} e^{0,0811X5} e^{0,2836X6} e^{0,1277X7} e^{0,3733X8} e^{0,3696X9} e^{0,2033X10} e^{0,1837X11}} \times Ps$
	$Pbk = \frac{1}{1+1,9911A^{0,0249} H^{0,2619} D^{0,1648} N^{0,0124} e^{0,3387X1} e^{0,1337X2} e^{0,1388X3} e^{0,0666X4} e^{0,0811X5} e^{0,2836X6} e^{0,1277X7} e^{0,3733X8} e^{0,3696X9} e^{0,2033X10} e^{0,1837X11}} \times Ps$

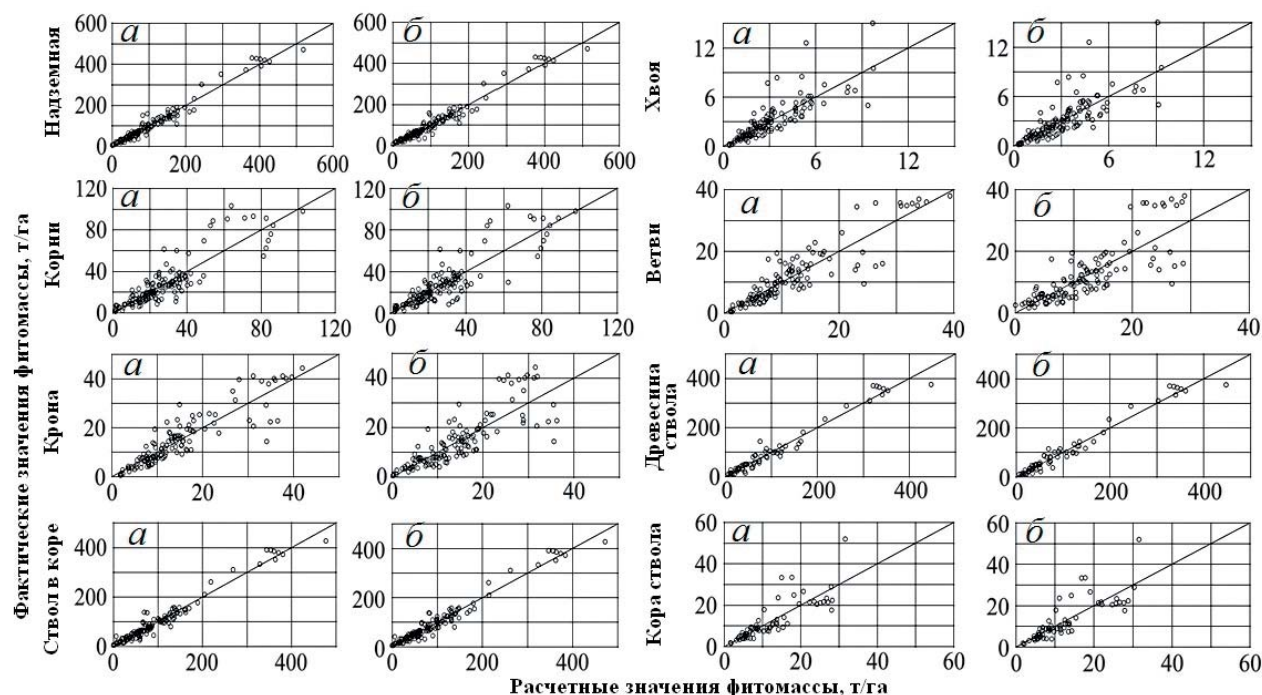


Рис. 3 – Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым (а) и аддитивным (б) моделям фитомассы древостоев лиственницы

но и по соотношениям массы разных фракций; например, доля хвои в надземной фитомассе максимальная (5,0–7,3%) в северной тайге Средней Сибири и Дальнего Востока, в лиственничниках на многолетней мерзлоте и минимальная (1,4–1,9%) – в лиственничниках максимальной продуктивности с общим запасом фитомассы (210–450 т/га).

Выводы. Впервые на уникальной по объёму базе фактических данных о фитомассе древостоев рода *Larix* разработана трансевразийская

аддитивная модель фитомассы лиственницы и тем самым решена совмещённая проблема аддитивности и всеобщности моделей. Аддитивная модель фитомассы древостоев гармонизирована по двум уровням, один из которых обеспечивает принцип аддитивности фракций фитомассы, а второй связан с вводом «фиктивных» переменных, локализирующих модель по экорегионам Евразии. Полученная модель демонстрирует различия фитомассы древостоев не только по абсолютным её

5. Характеристика «приведённых» независимых аллометрических уравнений древостоев лиственницы

Фракция фитомассы		Регрессионные коэффициенты модели														
P_t	0,1178	$A^{-0,0045}$	$H^{0,4126}$	$D^{1,9276}$	$N^{0,8816}$	$e^{0,5449X1}$	$e^{0,4893 X2}$	$e^{0,3044 X3}$	$e^{-0,3895 X4}$	$e^{0,5867 X5}$	$e^{0,6192 X6}$	$e^{0,4966 X7}$	$e^{0,5633 X8}$	$e^{0,4223 X9}$	$e^{0,3616 X10}$	$e^{0,2468 X11}$
P_a	0,0757	$A^{-0,0492}$	$H^{0,4535}$	$D^{2,0332}$	$N^{0,9117}$	$e^{0,5466 X1}$	$e^{0,4213 X2}$	$e^{0,3744 X3}$	$e^{0,1716 X4}$	$e^{0,6023 X5}$	$e^{0,4402 X6}$	$e^{0,5745 X7}$	$e^{0,3411 X8}$	$e^{0,4569 X9}$	$e^{0,3528 X10}$	$e^{0,2034 X11}$
P_r	0,0391	$A^{0,1389}$	$H^{0,4954}$	$D^{1,4246}$	$N^{0,7492}$	$e^{-0,5892 X1}$	$e^{0,2886 X2}$	$e^{0,1678 X3}$	$e^{0,7926 X4}$	$e^{0,6324 X5}$	$e^{0,8049 X6}$	$e^{0,3876 X7}$	$e^{0,9782 X8}$	$e^{0,2912 X9}$	$e^{0,4791 X10}$	$e^{0,5403 X11}$
P_c	0,1331	$A^{-0,2764}$	$H^{-0,0875}$	$D^{1,9877}$	$N^{0,7660}$	$e^{-0,8054 X1}$	$e^{0,2260 X2}$	$e^{0,4462 X3}$	$e^{-0,3673 X4}$	$e^{0,3624 X5}$	$e^{0,4652 X6}$	$e^{0,3334 X7}$	$e^{0,5287 X8}$	$e^{-0,0584 X9}$	$e^{0,3173 X10}$	$e^{0,1162 X11}$
P_3	0,0392	$A^{-0,0104}$	$H^{0,8086}$	$D^{1,7957}$	$N^{0,8930}$	$e^{-0,5083 X1}$	$e^{0,5503 X2}$	$e^{0,3955 X3}$	$e^{-0,3852 X4}$	$e^{0,6948 X5}$	$e^{0,4551 X6}$	$e^{0,6744 X7}$	$e^{0,3366 X8}$	$e^{0,4773 X9}$	$e^{0,3873 X10}$	$e^{0,3094 X11}$
P_f	0,0688	$A^{-0,4916}$	$H^{-0,2355}$	$D^{2,0358}$	$N^{0,8899}$	$e^{1,0055 X1}$	$e^{0,3484 X2}$	$e^{0,6702 X3}$	$e^{0,9501 X4}$	$e^{0,6501 X5}$	$e^{1,0035 X6}$	$e^{0,7977 X7}$	$e^{0,9110 X8}$	$e^{-0,3078 X9}$	$e^{0,7013 X10}$	$e^{0,1395 X11}$
P_b	0,0719	$A^{-0,2033}$	$H^{-0,0024}$	$D^{1,9407}$	$N^{0,7338}$	$e^{-0,7667 X1}$	$e^{0,2628 X2}$	$e^{0,4350 X3}$	$e^{0,2447 X4}$	$e^{0,3355 X5}$	$e^{0,3620 X6}$	$e^{0,2520 X7}$	$e^{-0,4468 X8}$	$e^{-0,0486 X9}$	$e^{0,2370 X10}$	$e^{0,1645 X11}$
P_w	0,0432	$A^{-0,0843}$	$H^{1,0759}$	$D^{1,5216}$	$N^{0,7924}$	$e^{-0,7106 X1}$	$e^{0,6344 X2}$	$e^{0,4098 X3}$	$e^{0,4705 X4}$	$e^{0,9685 X5}$	$e^{0,9157 X6}$	$e^{0,6740 X7}$	$e^{0,6655 X8}$	$e^{-0,0387 X9}$	$e^{0,5357 X10}$	$e^{0,3935 X11}$
P_{bk}	0,0217	$A^{-0,0595}$	$H^{0,8140}$	$D^{1,3568}$	$N^{0,8048}$	$e^{-0,3719 X1}$	$e^{0,7681 X2}$	$e^{0,5487 X3}$	$e^{-0,5371 X4}$	$e^{1,0496 X5}$	$e^{1,1993 X6}$	$e^{0,8018 X7}$	$e^{0,2922 X8}$	$e^{-0,4083 X9}$	$e^{0,3324 X10}$	$e^{0,2078 X11}$

6. Сравнение показателей адекватности независимых и аддитивных уравнений фитомассы лиственничных древостоев, рассчитанных с их регионализацией путём введения фиктивных переменных

Показатели	Фракции фитомассы										
	P_t	P_a	P_r	P_s	P_w	P_{bk}	P_c	P_b	P_f		
Независимые уравнения											
R^2	0,950	0,958	0,768	0,958	0,959	0,677	0,793	0,808	0,672		
Аддитивные уравнения											
R^2	0,950	0,952	0,770	0,955	0,957	0,664	0,685	0,671	0,599		

7. Характеристика рекурсивной системы вспомогательных уравнений для массообразующих показателей

Массо-образующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели														$adjR^2$	SE^*															
	$\ln H$	0,9617	0,4808	$\ln A$	—	—	-0,0342	X1	-0,0294	X2	-0,6824	X3	-0,9385	X4			-0,3890	X5	-0,3641	X6	-0,8561	X7	-0,8834	X8	0,0088	X9	-0,2439	X10	-0,0957	X11	50,214
$\ln D$	-0,1481	0,2529	$\ln A$	—	—	-0,3687	X1	-0,1247	X2	-0,5305	X3	-0,6245	X4	-0,4684	X5	-0,4754	X6	-0,6799	X7	-0,6115	X8	-0,4823	X9	-0,4697	X10	-0,1420	X11	88,668	0,21		
$\ln N$	3,8383	-0,3753	$\ln A$	1,2774	$\ln H$	-2,0894	$\ln D$	0,4003	X1	0,5361	X2	-0,0170	X3	0,0163	X4	0,2376	X5	-0,3495	X6	0,1233	X7	0,1519	X8	0,5846	X9	-0,1540	X10	0,0706	X11	69,117	0,64

8. Фрагменты аддитивной таблицы фитомассы древостоев лиственницы в возрасте 100 лет (т абсолютно сухой массы на 1 га) по экорегионам

Эко-регион	Вид	H, м	D, см	N, тыс. экз/га	Фитомасса, т/га								
					P _l	P _a	P _c	P _f	P _b	P _r	P _s	P _w	P _{bk}
ЗСЕ	<i>L. decidua</i>	25,7	42,0	0,3	181,0	159,8	25,7	2,8	23,0	21,2	134,1	118,9	15,2
ЕР	<i>L. sukaczewii</i>	24,8	28,2	0,9	407,4	336,7	34,0	6,5	27,5	70,7	302,7	275,3	27,4
Тст	<i>L. sukaczewii</i>	24,9	36,2	0,6	447,0	387,7	31,5	5,4	26,1	59,3	356,2	309,1	47,1
ЗСс	<i>L. sibirica</i>	13,0	14,0	1,1	77,0	62,6	7,7	1,3	6,4	14,4	54,9	45,2	9,7
ССс	<i>L. gmelinii</i>	10,1	10,3	1,5	56,7	38,3	7,8	1,9	5,9	18,4	30,5	24,9	5,6
ССюг	<i>L. sibirica</i>	17,4	19,0	1,1	206,1	172,7	18,8	4,3	14,5	33,4	153,9	130,7	23,3
ЗБ	<i>L. gmelinii</i>	17,9	19,3	0,6	132,0	101,6	14,0	3,2	10,8	30,4	87,7	72,2	15,5
ВС	<i>L. cajanderi</i>	10,9	10,4	1,8	78,8	63,1	7,5	1,9	5,6	15,8	55,6	45,0	10,5
ДВс	<i>L. cajanderi</i>	10,6	10,9	1,6	83,2	47,7	13,4	3,5	9,9	35,5	34,3	30,0	4,3
ДВюг	<i>L. olgensis</i>	25,9	26,4	1,2	450,5	367,4	38,1	5,3	32,8	83,1	329,3	300,2	29,1
Кит	<i>L. gmelinii</i>	20,1	21,2	0,7	147,0	116,4	12,0	2,6	9,4	30,6	104,4	92,7	11,7
Яп	<i>L. leptolepis</i>	23,3	33,6	0,4	208,8	166,2	16,2	2,3	13,9	42,6	150,0	134,7	15,3

значениям для стволов, хвои, ветвей и корней, но и по их соотношениям, т.е. по структуре фитомассы. Предложенная модель и соответствующая таблица для оценки фитомассы лиственничников дают возможность определения их фитомассы в различных экорегионах Евразии по данным измерительной таксации.

Литература

1. Будыко М.И. Глобальная экология. М.: «Мысль», 1977. 328 с.
2. Arrhenius Svante. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // Philosophical Magazine. 1896. Vol. 41. P. 237–276.
3. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 384 с. ISBN 978-5-94984-600-1 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5634>).
4. Устойчивое управление лесным хозяйством: научные основы и концепции / Алексеев А.С., Келломяки С., Любимов А.В. [и др.]. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 222 с.
5. Правовременение и управление в лесном секторе России: взгляд гражданского общества / В. Тепляков, К. Сан-Лоран, К. Пахорукова, Н. Шматов (ред.). М.: Программа МСОП, 2005. 120 с.
6. 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.
7. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
8. Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations. Forest Science. 2015b. Vol. 61. No. 1. Page 35–45.
9. Tang S., Zhang H., Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model. Scientia Silvae Sinica. 2000. Vol. 36. P. 19 – 27 (in Chinese with English abstract).
10. Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.