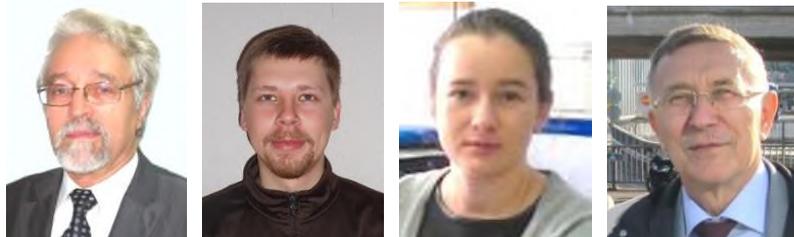


*В.А. Усольцев<sup>1,2</sup>, К.В. Колчин<sup>1</sup>, А.А. Осмирко<sup>1</sup>, В.П. Часовских<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

### ФИТОМАССА ДЕРЕВЬЕВ В ЕЛОВО-ПИХТОВЫХ ЛЕСАХ ЕВРАЗИИ: АДДИТИВНЫЕ МОДЕЛИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ



**Ключевые слова:** елово-пихтовые древостой, биосферная роль лесов, фитомасса деревьев, аллометрические модели, биологическая продуктивность, аддитивные уравнения фитомассы, среднегодовая температура, среднегодовые осадки.

Предпринятая первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы деревьев ели и пихты по трансевразийским гидротермическим градиентам выявила наличие закономерностей двух типов. Первому типу соответствуют седлообразные зависимости от температуры и осадков для фитомассы общей, надземной, стволов и хвои: колоколообразная выпуклая по градиенту осадков ( $PR$ ) с максимумом при 600-700 мм в год и колоколообразная вогнутая с минимальным значением при средней температуре января ( $T$ )  $-10^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что деревья, равновеликие по диаметру и высоте ствола, имеют максимальную фитомассу при среднем (600-700 мм) уровне осадков независимо от температуры и минимальную фитомассу при температуре января, соответствующей примерно среднетаёжной подзоне ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) независимо от уровня осадков. Второму типу соответствуют монотонные зависимости от температуры и осадков для фитомассы корней и ветвей: снижение показателей по мере повышения температуры января независимо от уровня осадков и выпуклая, близкая к колоколообразной, зависимость показателей фитомассы от уровня осадков с максимумом при 700-800 мм независимо от средней температуры января. Для пихты названные закономерности сохраняются, но в абсолютных показателях фитомасса общая, надземная, корней, стволов и ветвей у пихты выше на 11, 9, 18, 14 и 3 % и ниже по массе кроны и хвои соответственно на 2 и 8%. Разработка подобных моделей для основных лесообразующих пород Евразии даст возможность прогнозировать изменения продуктивности лесного покрова Евразии в связи с изменениями климата.

*V.A. Usoltsev, K.V. Kolchin, A.A. Osmirko, V.P. Chasovskikh*

### TREE BIOMASS: ADDITIVE MODELS SENSITIVE TO CLIMATE VARIABLES FOR SPRUCE-FIR FORESTS IN EURASIA

**Key words:** spruce-fir forests, biosphere role of forests, tree biomass, allometric models, biological productivity, additive biomass equations, mean January temperature, mean annual precipitation.

The first attempt to simulate changes in the additive component composition of spruce and fir tree biomass according to trans-Eurasian hydrothermal gradients has revealed the presence of two types of regularities. The first of them corresponds to the saddle-shaped depending

upon temperature and precipitation for the total and aboveground, stems and needles, namely, the bell-shaped and convex one in the gradient of precipitation ( $PR$ ) with a maximum at 600-700 mm per year and the bell-shaped and concave with a minimum value of the mean January temperature ( $T$ )  $-10^{\circ}\text{C}$ . This means that trees, equal in diameter and height of the tree stem, have a maximum biomass at the mean precipitation level (600-700 mm) regardless of temperature and the minimum biomass at the mean January temperature corresponding to approximately the middle taiga subzone ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) regardless of  $PR$  level. The second type corresponds to the monotonic dependence of root and branches biomass upon temperature and precipitation, namely, the indices decrease with increasing mean January temperature, regardless of  $PR$  and convex, close to the bell-shaped, the dependence of biomass from  $PR$  with the maximum at 700-800 mm, regardless of the mean January temperature. For fir trees, these patterns remain, but in absolute values, the fir biomass of total, aboveground, roots, stems and branches are higher by 11, 9, 18, 14 and 3% and lower in relation to crown and needles mass respectively by 2 and 8%. The development of such models for basic forest-forming species grown in Eurasia will give possibility to predict any changes in the biological productivity of forest cover of Eurasia in relation to climate change.

-----  
**Усольцев Владимир Андреевич** - доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный лесовод России, профессор кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН (Екатеринбург). Тел.: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Usoltsev Vladimir Andreyevich** - Doctor of agricultural sciences, professor of the Department of quality management, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg). Phone: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Колчин Кирилл Владимирович** – аспирант 3-го года обучения при Уральском государственном лесотехническом университете (Екатеринбург). Тел.: 8-999-567-20-33, e-mail: kirill\_-92@mail.ru.

**Kolchin Kirill Vladimirovich** - Postgraduate of the Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: 8-999-567-20-33, e-mail: kirill\_-92@mail.ru.

**Осмирко Анна Андреевна** – аспирант 3-го года обучения. Тел.: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Osmirko Anna Andreevna** - third-year postgraduate. Phone: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

**Часовских Виктор Петрович** - доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, член Российской академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, член Российской академии естественных наук, Full Member of European Academy of Natural History, директор Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета (Екатеринбург). Тел. (343)261-46-44; e-mail: u2007u@yandex.ru.

**Chasovskikh Viktor Petrovich** - Doctor of technical sciences, Professor, Full Member of European Academy of Natural History, Director of the Institute of Economics and Management, Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: (343)261-46-44; e-mail: u2007u@yandex.ru.

-----

Фитомасса лесов является ключевой экосистемной составляющей и важным компонентом глобального углеродного цикла. Она играет основополагающую роль в нашем понимании углеродного обмена между биотой и атмосферой в условиях антропогенного изменения климата (Ni et al., 2001). Разработка моделей фитомассы, чувствительных к

изменению климата, ведется на уровнях как древостоев (Manogaran, 1973; Лит, 1974; DeLucia et al., 2000; Ni et al., 2001; Stegen et al., 2011; Fang et al., 2016), так и модельных деревьев (Forrester et al., 2017; Zeng et al., 2017). Однако исследования стохастических связей продуктивности деревьев и древостоев с гидротермическими показателями, в частности, с температурой и осадками, выполняются в основном, на локальном или региональном уровнях, часто для показателей, обезличенных по возрасту, морфологии древостоев, а также без учета видового состава. Как влияют климатические изменения на продуктивность отдельных древесных видов (родов) в трансконтинентальных градиентах и влияют ли вообще, сегодня неизвестно, поскольку имеющиеся сведения отрывочны и противоречивы.

В настоящем исследовании предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы деревьев в елово-пихтовых древостоях по трансевразийским гидротермическим градиентам. Аддитивность фракционного состава означает, что суммарная фитомасса фракций (стволы, ветви, хвоя, корни), полученная по «фракционным» уравнениям, равняется значению фитомассы, полученной по общему уравнению (Dong et al., 2015). В процессе моделирования использована база данных о фитомассе деревьев лесообразующих пород Евразии (Усольцев, 2016; Usoltsev, 2016).

### Материалы и методы

Из упомянутой базы данных взяты материалы в количестве 1075 модельных деревьев с определениями фитомассы (кг), в том числе 900 ели и 175 пихты. В число 900 деревьев ели вошли пять викарирующих видов рода *Picea* Dietr. (соответственно *P. abies* (L.) Н. Karst., *P. obovata* L., *P. schrenkiana* F. & С.А.Мey., *P. jezoensis* (S. et Z.) Carrière, *P. purpurea* Masters. При этом в базе данных оставлены и не включены в наш анализ 155 деревьев ели из-за отсутствия замеров их высот. В число 175 деревьев пихты вошли шесть викарирующих видов рода *Abies* Mill. (соответственно *A. alba* Mill., *A. sibirica* L., *A. holophylla* Maxim., *A. nephrolepis* Maxim., *A. veitchii* Lindl., *A. firma* S. et Z.).

Распределение пробных площадей, на которых определена фитомасса деревьев ели и пихты в экорегионах Евразии, показано соответственно на рис. 1 и 2.

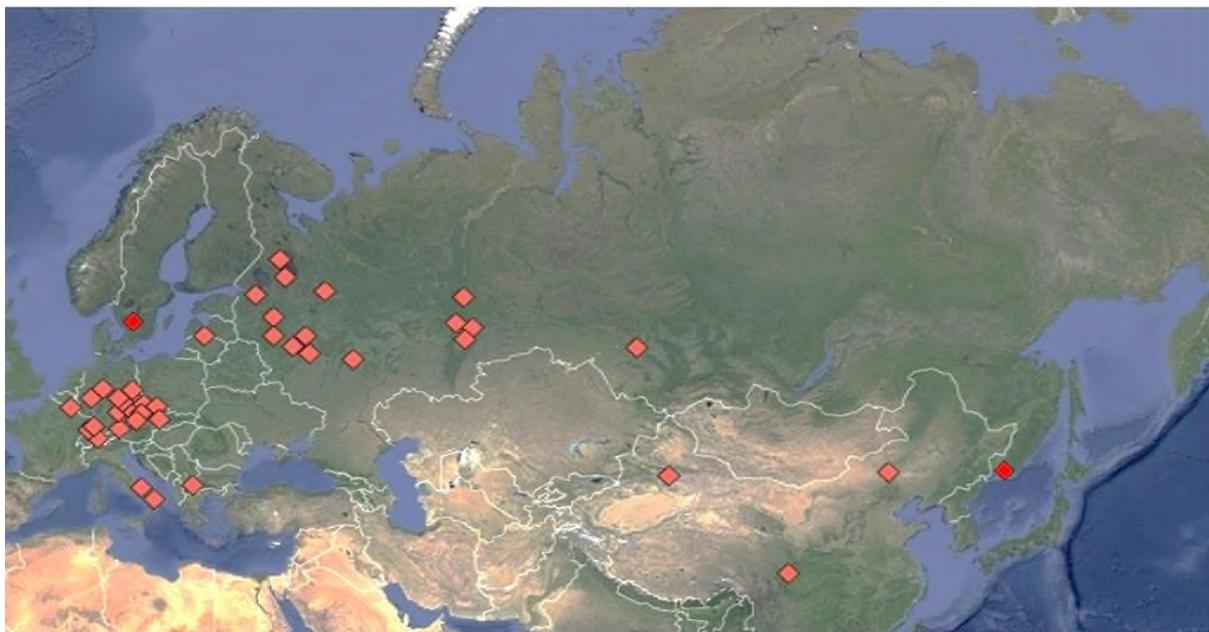


Рис. 1. Распределение пробных площадей с измерениями фитомассы (кг) 900 модельных деревьев ели (род *Picea* Dietr.) на территории Евразии.



Рис. 2. Распределение пробных площадей с измерениями фитомассы (кг) 175 модельных деревьев пихты (род *Abies* Mill.) на территории Евразии.

Каждая пробная площадь, на которой было выполнено определение фитомассы деревьев, позиционирована относительно изолиний среднегодовой температуры января (рис. 3 и 4) и относительно изолиний среднегодовых осадков (рис. 5 и 6), и составлена матрица исходных данных, в которой значения фракций фитомассы и таксационные показатели деревьев соотнесены с соответствующими значениями среднегодовой температуры и осадков, включенная затем в процедуру регрессионного анализа.

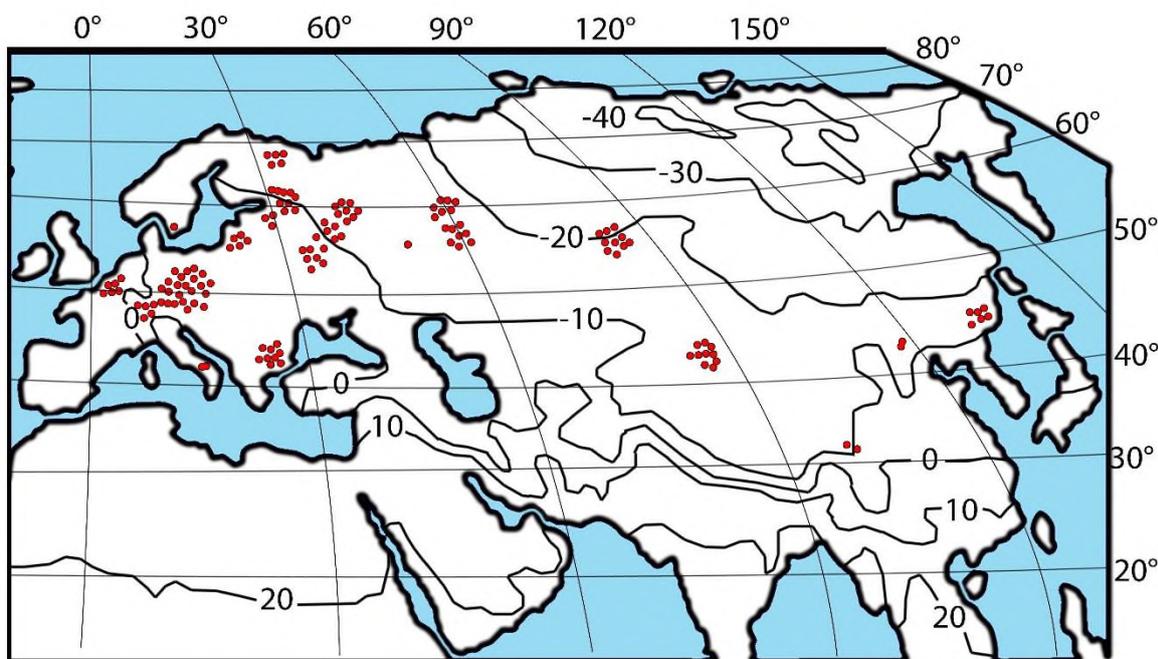


Рис. 3. Распределение экспериментальных данных о фитомассе 900 модельных деревьев ели на карте-схеме среднегодовой температуры января, °С (показана цифрами) (World Weather Maps, 2007).

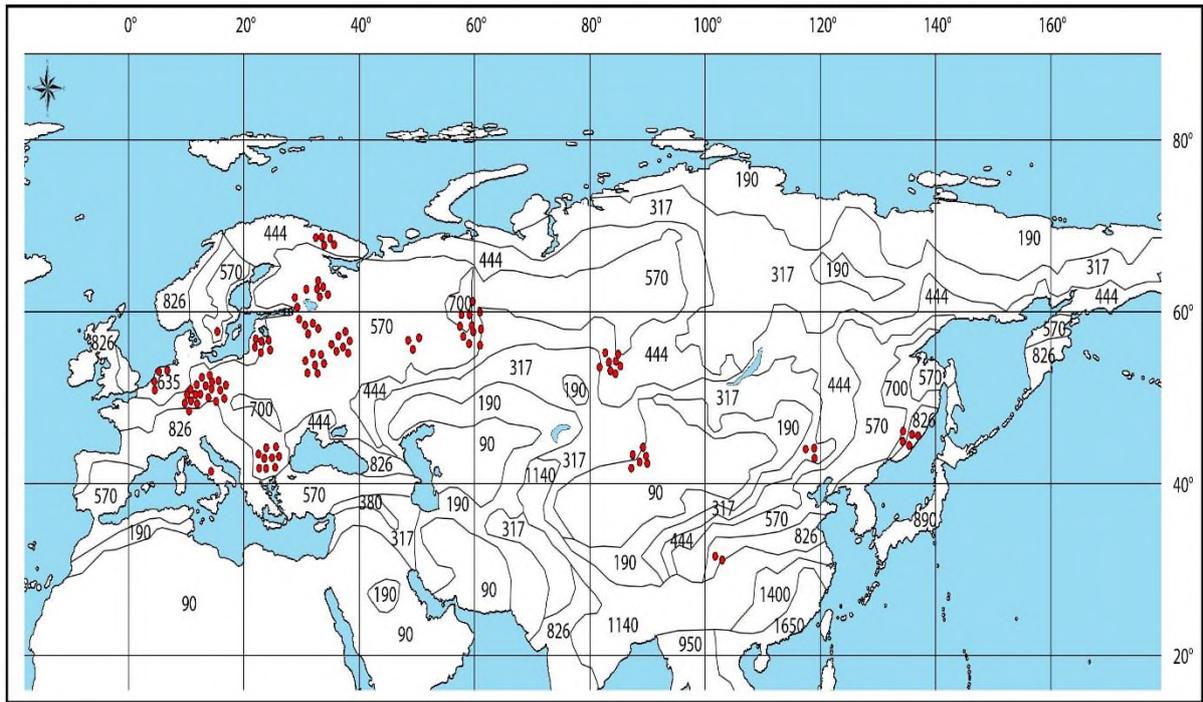


Рис. 4. Распределение экспериментальных данных о фитомассе 900 модельных деревьев ели на карте-схеме среднегодовых осадков, мм (показаны цифрами) (World Weather Maps, 2007).

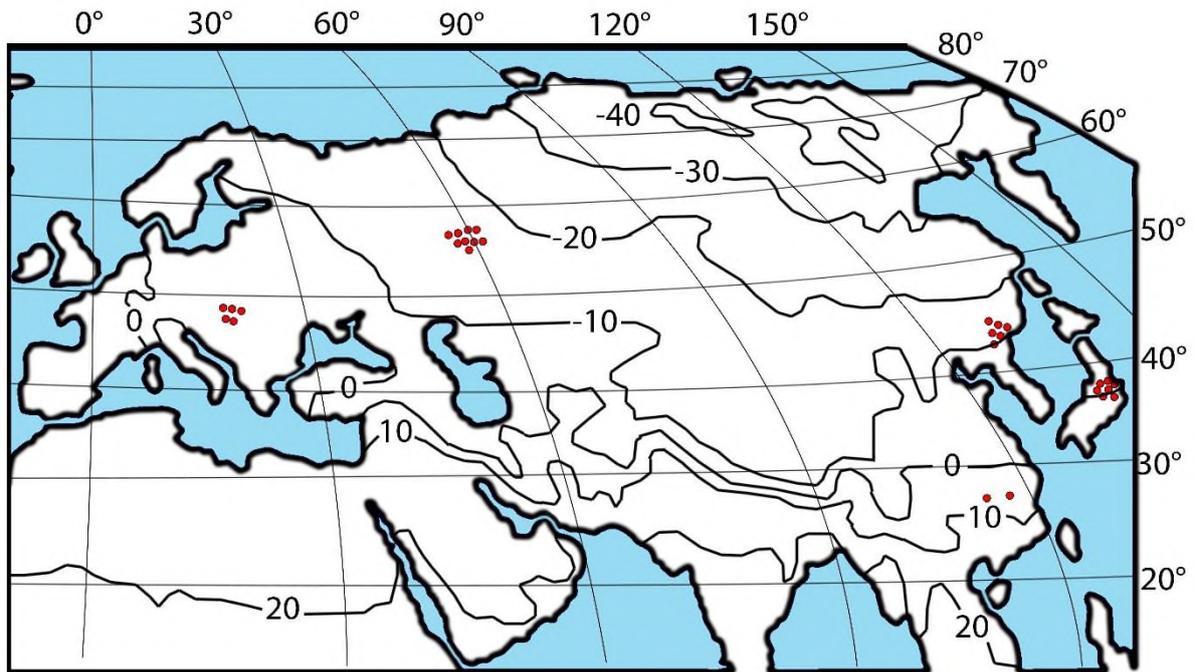


Рис. 5. Распределение экспериментальных данных о фитомассе 175 модельных деревьев пихты на карте-схеме среднегодовой температуры января, °C (показана цифрами) (World Weather Maps, 2007).

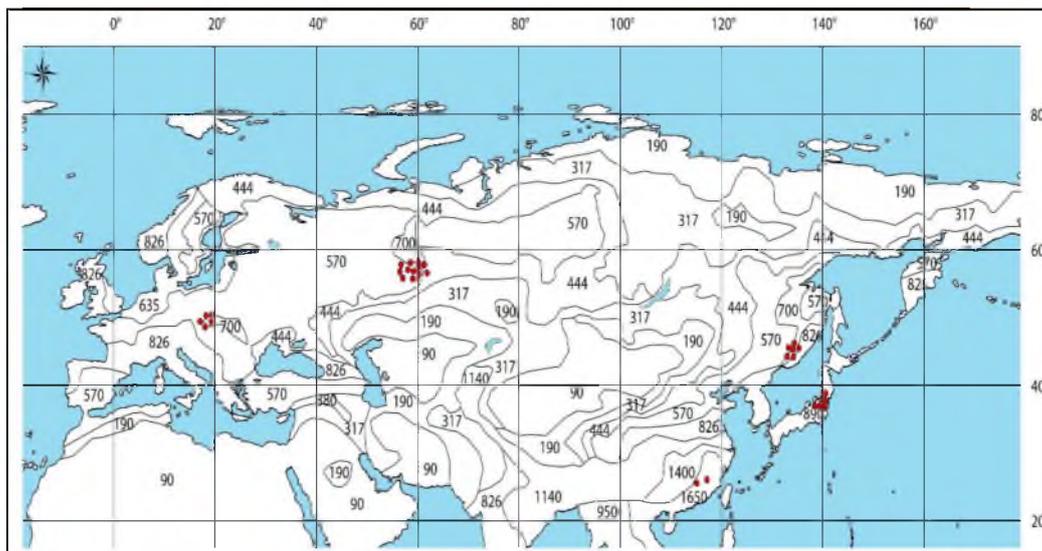


Рис. 6. Распределение экспериментальных данных о фитомассе 175 модельных деревьев пихты на карте-схеме среднегодовых осадков, мм (показаны цифрами) (World Weather Maps, 2007).

Согласно структуре расчленяемой (disaggregation model) трехшаговой аддитивной системы моделей (Tang et al., 2000; Dong et al., 2015), общая фитомасса, оцененная по исходному уравнению, расчленяется на фракции согласно схеме, представленной на рис. 4 предыдущей статьи настоящего выпуска.

Поскольку данные о фитомассе деревьев ели и пихты представлены в разных количествах, и число первых превышает число вторых в 5 раз, отдельный их анализ может привести к некорректным смещениям закономерностей, выявленных для пихты, по отношению к более адекватным (по причине большей представленности по регионам) закономерностям, полученным для ели. Поэтому те и другие объединены в одну общую регрессионную модель, в которой закономерности для ели и пихты согласованы посредством кодирования их бинарной переменной. В результате применения такого приёма закономерности для ели и пихты будут иметь общий характер, но расчетные значения, полученные по модели, будут иметь для них разную величину, и смещения значений для ели по отношению к пихте будут плюсовыми или минусовыми, что выяснится в результате регрессионного анализа.

### Результаты и обсуждение

Рассчитаны исходные регрессионные уравнения

$$\ln P_i = a_{0i} + a_{1i}(\ln D) + a_{2i}(\ln H) + a_{3i}(\ln D)(\ln H) + a_{4i}X + a_{5i}[\ln(T+40)] + a_{6i}[\ln(T+40)]^2 + a_{7i}(\ln PR) + a_{8i}(\ln PR)^2 + a_{9i}[\ln(T+40)] \cdot (\ln PR), \quad (1)$$

где  $P_i$  – фитомасса  $i$ -й фракции, кг;  $D$  и  $H$  – соответственно диаметр на высоте груди, см, и высота дерева, м;  $i$  – 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 ( $bk$ );  $X$  – бинарная переменная, согласовывающая структуру фитомассы деревьев пихты ( $X = 0$ ) и ели ( $X = 1$ );  $T$  – среднегодовая температура января, °C;  $PR$  – среднегодовые осадки, мм.

Поскольку на севере Евразии среднегодовая температура января имеет минусовые значения, соответствующая независимая переменная модифицирована к логарифмируемому виду ( $T+40$ ). Наряду с двумя основными массообразующими показателями дерева

– диаметром  $D$  и высотой  $H$  ствола – в качестве дополнительного предиктора введено произведение переменных  $(\ln D)(\ln H)$ , необходимость которого была показана ранее (Усольцев и др., 2017). Выполнен расчет коэффициентов уравнений (1) по стандартной программе многофакторного регрессионного анализа и получена их характеристика. Уравнения после введения поправок на логарифмическое преобразование по Г.Л. Баскервиллю (Baskerville, 1972) и последующего их потенцирования приведены в табл. 1. Все регрессионные коэффициенты уравнений (1) характеризуются уровнем значимости 0,05 и выше, и уравнения адекватны исходным показателям, представленным в имеющейся базе данных. Полученные уравнения приведены к аддитивной форме согласно выше упомянутому алгоритму (Dong et al., 2015), и окончательный вид трансконтинентальной аддитивной модели фракционного состава фитомассы деревьев ели и пихты показан в табл. 2.

Поскольку было установлено (Cunia, Briggs, 1984; Reed, Green, 1985), что устранение внутренней противоречивости уравнений фитомассы путем обеспечения их аддитивности не обязательно означает повышение точности ее оценок, необходимо выяснить, достаточно ли адекватна полученная аддитивная модель и как ее характеристики соотносятся с показателями адекватности независимых уравнений? Для этого как аддитивная модель (см. табл. 2), так и исходные уравнения (см. табл. 1), протабулированы по фактическим массообразующим показателям массива фактических данных, и полученные расчетные значения фитомассы сопоставлены с фактическими по величине коэффициента детерминации. Результаты сопоставления, показанные в табл. 3, свидетельствуют о том, что показатели адекватности двух систем уравнений близки между собой. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчетом по независимым и аддитивным моделям фитомассы деревьев (рис. 7), показывает степень коррелированности названных показателей и отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям.

Таблица 3  
Сравнение показателей адекватности исходных и аддитивных уравнений фитомассы деревьев ели и пихты

Коэффициент детерминации	Фракции фитомассы								
	$Pt$	$Pa$	$Pr$	$Ps$	$Pw$	$Pbk$	$Pc$	$Pb$	$Pf$
Исходные уравнения									
$R^2$	0,901	0,904	0,712	0,901	0,907	0,920	0,734	0,657	0,541
Аддитивные уравнения									
$R^2$	0,901	0,915	0,741	0,925	0,911	0,927	0,750	0,659	0,570

Вследствие многократно большей трудоемкости измерения высот деревьев по сравнению с диаметром ствола используют специально разработанные уравнения или таблицы, отражающие связь высот деревьев с диаметром ствола. С этой целью рассчитано уравнение

$$H = \exp\{-1,4504 + 0,8052(\ln D) - 0,0966X - 2,7610[\ln(T+40)] + 0,4875[\ln(T+40)]^2 + 2,2787(\ln PR) - 0,2166(\ln PR)^2\}; \text{adj}R^2 = 0,942. \quad (2)$$

Поскольку при табулировании уравнений (1) по задаваемым значениям  $D$ ,  $H$ ,  $X$ ,  $T$  и  $PR$  получаем слишком громоздкую таблицу, искомые графики зависимости фитомассы от температуры  $T$  и осадков  $PR$  строим в виде фрагмента для деревьев ели ( $X = 1$ ) с  $D = 14$  см и  $H = 12$  м (рис. 8).

Таблица 1

Характеристика исходных регрессионных уравнений деревьев ели и пихты

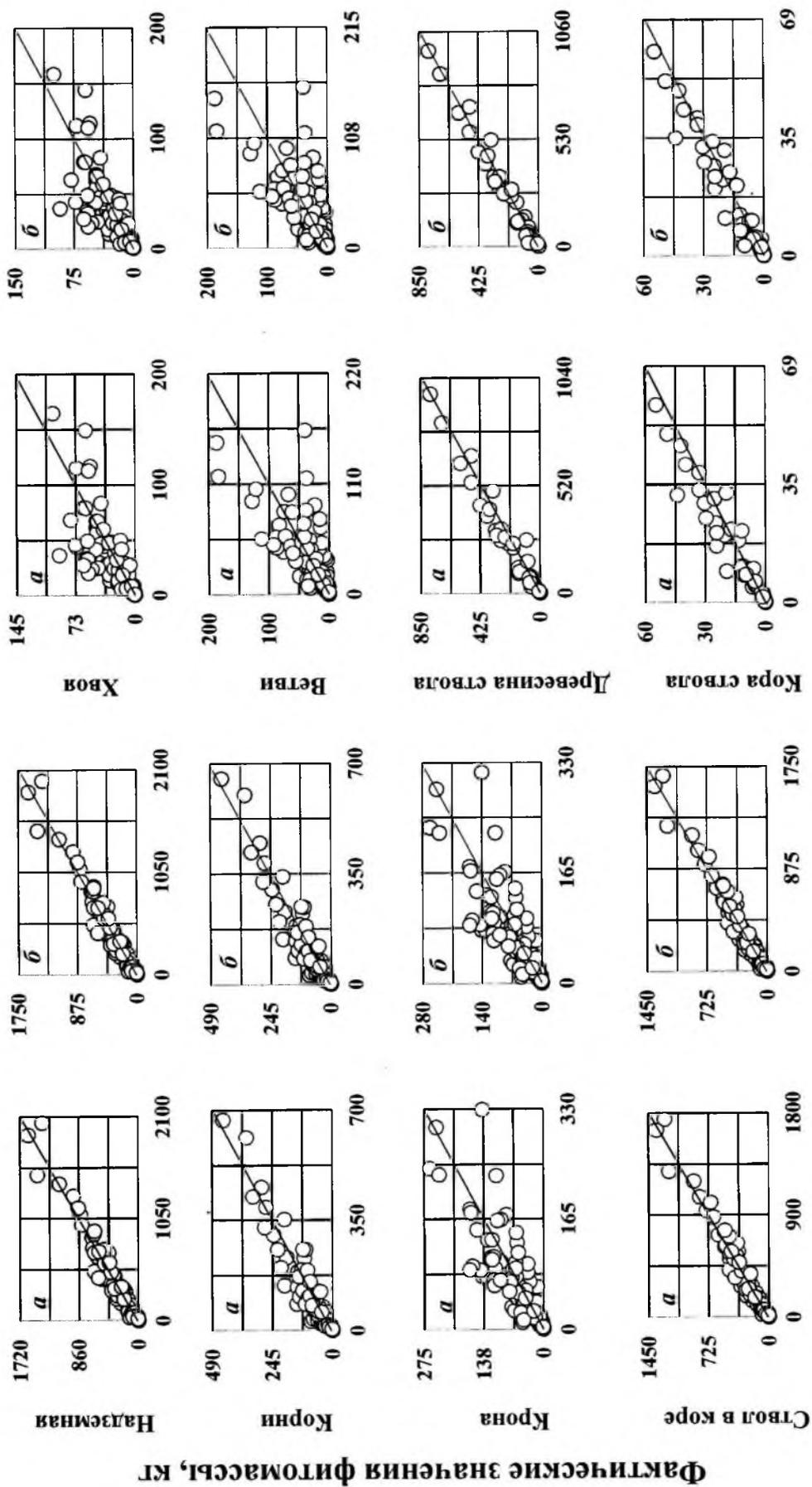
Регрессионные коэффициенты модели										adjR <sup>2</sup> *	
Фракция фито-массы	D	H	D	H	X	(T+40)	(T+40) <sup>2</sup>	ln(T+40)	PR		
P <sub>l</sub>	0,005318	1,1143	-0,2270	0,3425(lnH)	X <sup>-0,1060</sup>	-15,9416	(T+40) <sup>2</sup>	2,2932 ln(T+40)	PR <sup>10,0658</sup>	PR <sup>-0,7777(lnPR)</sup>	0,984
Шаг 1											
P <sub>a</sub>	180231,98	1,0581	-0,3372	0,3558(lnH)	X <sup>-0,0321</sup>	-1,9387	(T+40) <sup>0,3021</sup>	ln(T+40)	PR <sup>-2,9021</sup>	PR <sup>0,2256(lnPR)</sup>	0,984
P <sub>r</sub>	0,0000004741	1,2389	-0,8235	0,4675(lnH)	X <sup>-0,1110</sup>	4,8500	(T+40) <sup>-0,8862</sup>	ln(T+40)	PR <sup>1,4097</sup>	PR <sup>-0,0560(lnPR)</sup>	0,963
Шаг 2											
P <sub>c</sub>	8,3020	1,6652	-1,2326	0,2928(lnH)	X <sup>0,0479</sup>	-3,0640	(T+40) <sup>0,3874</sup>	ln(T+40)	PR <sup>0,9780</sup>	PR <sup>-0,0741(lnPR)</sup>	0,922
P <sub>s</sub>	252205,6	0,8804	0,1989	0,3378(lnH)	X <sup>-0,1104</sup>	2,3819	(T+40) <sup>-0,3001</sup>	ln(T+40)	PR <sup>-5,7330</sup>	PR <sup>0,4453(lnPR)</sup>	0,989
Шаг 3а											
P <sub>l</sub>	0,001343	1,7150	-1,3924	0,2965(lnH)	X <sup>0,1000</sup>	-8,9461	(T+40) <sup>1,2938</sup>	ln(T+40)	PR <sup>7,0262</sup>	PR <sup>-0,5885(lnPR)</sup>	0,902
P <sub>b</sub>	57664,67	1,6117	-1,0873	0,2925(lnH)	X <sup>-0,0151</sup>	5,6020	(T+40) <sup>-0,9527</sup>	ln(T+40)	PR <sup>-7,0296</sup>	PR <sup>0,6022(lnPR)</sup>	0,877
Шаг 3б											
P <sub>w</sub>	0,000008271	1,0120	-0,0529	0,3630(lnH)	X <sup>-0,0985</sup>	16,8871	(T+40) <sup>-2,4350</sup>	ln(T+40)	PR <sup>-5,9252</sup>	PR <sup>0,4654(lnPR)</sup>	0,986
P <sub>bk</sub>	0,00000000004148	0,8141	-0,0125	0,3306(lnH)	X <sup>-0,3392</sup>	44,2900	(T+40) <sup>-6,6261</sup>	ln(T+40)	PR <sup>-16,9892</sup>	PR <sup>1,3727(lnPR)</sup>	0,976

\* adjR<sup>2</sup> – коэффициент детерминации, скорректированный на число наблюдений.

Таблица 2

Искомая трехшаговая аддитивная модель фитомассы деревьев ели и пихты

Шаг 1	$P_t = \frac{-5,2366 D^{1,1143} H^{-0,2270} D^{0,3425} (\ln H)_x^{-0,1060} (T+40)^{-15,9416} (T+40)^{2,2933} (\ln(T+40))^{PR} 10,0658 PR^{-0,7777} (\ln PR) \times Pt}{1+2,5256 D^{0,1386} H^{-0,6546} D^{0,1414} (\ln H)_x^{0,0352} (T+40)^{23,0515} (T+40)^{-3,5348} (\ln(T+40))^{PR} -10,0058 PR^{-0,8370} (\ln PR) \times Pt}$
Шаг 2	$P_r = \frac{1+0,3960 D^{-0,1386} H^{0,6546} D^{-0,1414} (\ln H)_x^{-0,0352} (T+40)^{-23,0515} (T+40)^{3,5348} (\ln(T+40))^{PR} 10,0058 PR^{-0,8370} (\ln PR) \times Pt}{1+(-10,7212) D^{-0,6478} H^{0,9320} D^{0,1058} (\ln H)_x^{0,1283} (T+40)^{32,1034} (T+40)^{-4,6175} (\ln(T+40))^{PR} -7,6546 PR^{0,6805} (\ln PR) \times Pa}$
Шаг 3а	$P_s = \frac{1+(-0,0933) D^{0,6478} H^{-0,9320} D^{-0,1058} (\ln H)_x^{-0,1283} (T+40)^{-32,1034} (T+40)^{4,6175} (\ln(T+40))^{PR} 7,6546 PR^{-0,6805} (\ln PR) \times Pa}{1+1,6645 D^{-0,2376} H^{0,7228} D^{-0,0752} (\ln H)_x^{-0,4069} (T+40)^{20,3213} (T+40)^{-2,9842} (\ln(T+40))^{PR} -10,0819 PR^{0,7905} (\ln PR) \times Pc}$
Шаг 3б	$P_b = \frac{1+0,6008 D^{0,2376} H^{-0,7228} D^{0,0752} (\ln H)_x^{0,4069} (T+40)^{-20,3213} (T+40)^{2,9842} (\ln(T+40))^{PR} 10,0819 PR^{-0,7905} (\ln PR) \times Pc}{1+(-0,4836) D^{-0,0400} H^{0,3080} D^{-0,0239} (\ln H)_x^{-4,2484} (T+40)^{62,9568} (T+40)^{-9,3360} (\ln(T+40))^{PR} 28,5918 PR^{-2,2390} (\ln PR) \times Ps}$
	$P_{bk} = \frac{1+(-2,0677) D^{0,0400} H^{-0,3080} D^{0,0239} (\ln H)_x^{4,2484} (T+40)^{-62,9568} (T+40)^{9,3360} (\ln(T+40))^{PR} 28,5918 PR^{-2,2390} (\ln PR) \times Ps}{1+(-2,0677) D^{0,0400} H^{-0,3080} D^{0,0239} (\ln H)_x^{4,2484} (T+40)^{-62,9568} (T+40)^{9,3360} (\ln(T+40))^{PR} 28,5918 PR^{-2,2390} (\ln PR) \times Ps}$



**Расчетные значения фитомассы, кг**

Рис. 7. Степень сходства полей распределения эмпирических данных по отношению к расчетным, показывающая фактическое отсутствие различий результатов, полученных по исходным (а) и искомым (б) уравнениям фитомассы деревьев ели и пихты.

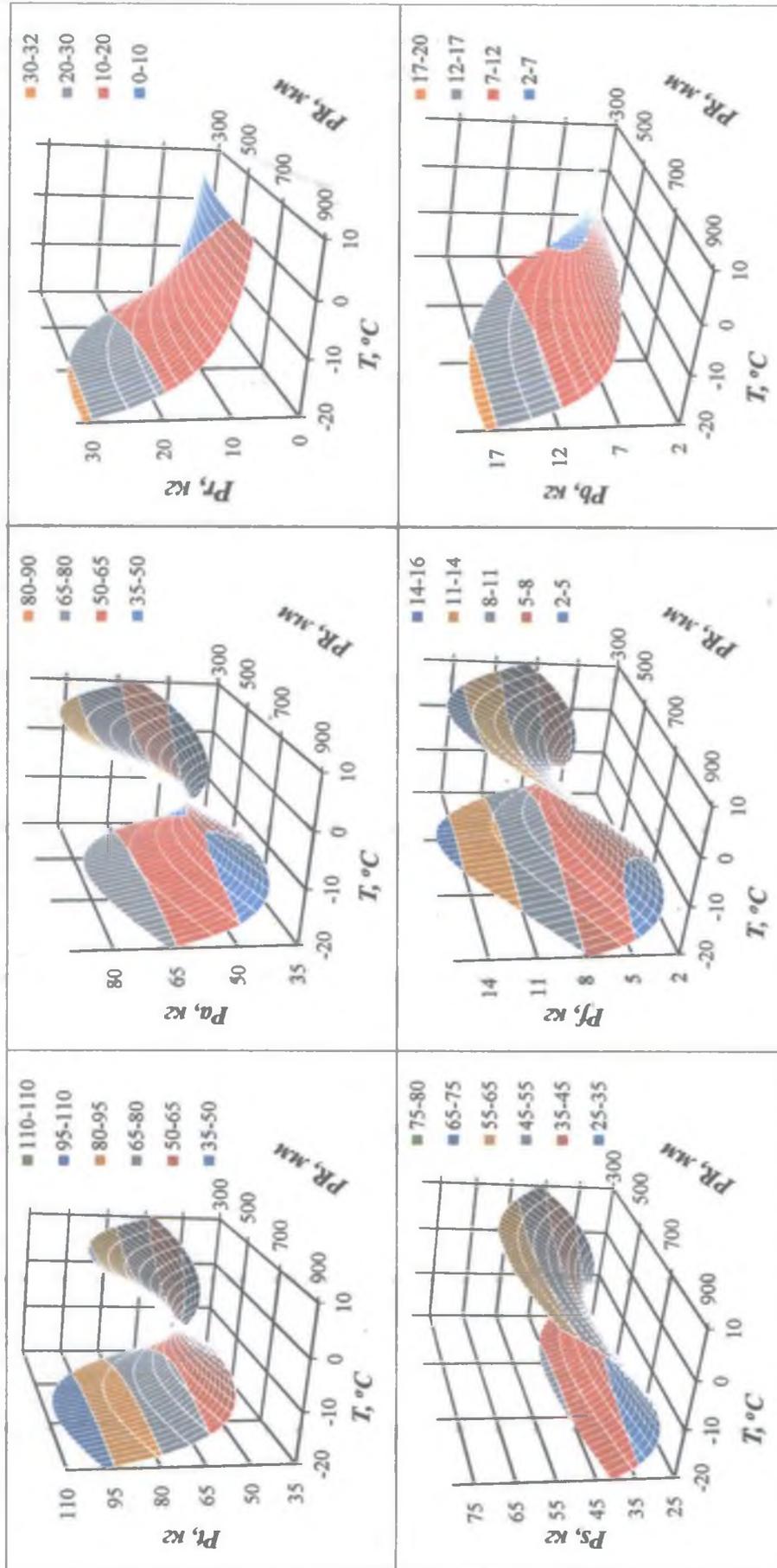


Рис. 8. Зависимость фитомассы деревьев ели от среднегодовой температуры января ( $T$ ) и осадков ( $PR$ ). Обозначения:  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  – соответственно фитомасса общая, стволов, надземная, хвои, корневая и ветвей, кг.

Полученные в трехмерном пространстве поверхности по своей конфигурации для разных фракций различны. Можно выделить конфигурации двух типов. Первому типу соответствуют седлообразные зависимости от температуры и осадков для фитомассы общей, надземной, стволов и хвои: колоколообразная выпуклая по градиенту осадков с максимумом при  $PR=600-700$  мм и колоколообразная вогнутая с минимальным значением при  $T=-10^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что деревья, равновеликие по диаметру и высоте ствола, имеют максимальную фитомассу при среднем (600-700 мм) уровне осадков независимо от температуры и минимальную фитомассу при температуре января, соответствующей примерно среднетаёжной подзоне ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) независимо от уровня осадков.

Второму типу соответствуют монотонные зависимости от температуры и осадков для фитомассы корней и ветвей: снижение показателей по мере повышения температуры января независимо от уровня осадков и выпуклая, близкая к колоколообразной, зависимость показателей фитомассы от уровня осадков с максимумом при 700-800 мм независимо от средней температуры января.

Для пихты названные закономерности сохраняются, но в абсолютных показателях фитомасса общая, надземная, корней, стволов и ветвей у пихты выше на 11, 9, 18, 14 и 3 % и ниже по массе кроны и хвои соответственно на 2 и 8%.

Полученные аддитивные модели фитомассы деревьев ели и пихты дают возможность установить количественные изменения в структуре их фитомассы в связи с климатическими изменениями, в частности, среднегодовой температуры января и среднегодовых осадков.

#### Заключение

Таким образом, предпринятая первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы деревьев ели и пихты по трансевразийским гидротермическим градиентам выявила наличие закономерностей двух типов. Первому типу соответствуют седлообразные зависимости от температуры и осадков для фитомассы общей, надземной, стволов и хвои: колоколообразная выпуклая по градиенту осадков с максимумом при  $PR=600-700$  мм и колоколообразная вогнутая с минимальным значением при  $T=-10^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что деревья, равновеликие по диаметру и высоте ствола, имеют максимальную фитомассу при среднем (600-700 мм) уровне осадков независимо от температуры и минимальную фитомассу при температуре января, соответствующей примерно среднетаёжной подзоне ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) независимо от уровня осадков.

Второму типу соответствуют монотонные зависимости от температуры и осадков для фитомассы корней и ветвей: снижение показателей по мере повышения температуры января независимо от уровня осадков и выпуклая, близкая к колоколообразной, зависимость показателей фитомассы от уровня осадков с максимумом при 700-800 мм независимо от средней температуры января.

Для пихты названные закономерности сохраняются, но в абсолютных показателях фитомасса общая, надземная, корней, стволов и ветвей у пихты выше на 11, 9, 18, 14 и 3 % и ниже по массе кроны и хвои соответственно на 2 и 8%.

Разработка подобных моделей для основных лесообразующих пород Евразии даст возможность прогнозировать изменения продуктивности лесного покрова Евразии в связи с изменениями климата.

#### Список использованной литературы

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. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>

Усольцев В.А., Колчин К.В., Воронов М.П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea L.*) // Эко-потенциал. 2017. № 1. С. 22-39.

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49-53.

Cunia T., Briggs R.D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 376-384.

Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations // Forest Science. 2015. Vol. 61. No. 1. P. 35-45.

DeLucia E.H., Maherali H., Carey E.V. Climate-driven changes in biomass allocation in pines // Global Change Biology. 2000. Vol. 6 (5). P. 587-593. (DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00338.x).

Fang O., Yang Wang Y., Shao X. The effect of climate on the net primary productivity (NPP) of *Pinus koraiensis* in the Changbai Mountains over the past 50 years // Trees. 2016. Vol. 30. P. 281-294. DOI 10.1007/s00468-015-1300-6.

Forrester D.I., Tachauer I.H.H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G.W. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 396. P. 160-175.

Manogaran C. Climatic limitations of the potential for tree growth in southern forests // Forestry Abstracts. 1974. Vol. 35. No. 11. P. 642.

Ni J., Zhang X.-S., Scurlock J.M.O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests // Annals of Forest Science. 2001. Vol. 58. P. 351-384 (www.edpsciences.org).

Reed D.D., Green E.J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models // Canadian Journal of Forest Research. 1985. Vol. 15. P. 1184-1187.

Stegen J.C., Swenson N.G., Enquist B.J., White E.P., Phillips O.L., Jorgensen P.M., Weiser M.D., Mendoza A.M., Vargas P.N. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // Global Ecology and Biogeography. 2011. Vol. 20 (5). P. 744-754 (<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x>).

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).

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University. 2016. ISBN 978-5-94984-600-1 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>).

World Weather Maps, 2007. URL: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather/> (дата обращения: 15.06.2018).

Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China // European Journal of Forest Research. 2017. Vol. 136. No. 2. P. 233-249 (<https://doi.org/10.1007/s10342-017-1024-9>).

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

**Рецензент статьи:** доктор сельскохозяйственных наук, профессор С.В. Залесов.