

В.А. Усольцев^{1,2}, К.В. Колчин¹, А.А. Осмирко¹, И.С. Цепордей², В.П. Часовских¹

ФИТОМАССА ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ЕВРАЗИИ: АДДИТИВНАЯ МОДЕЛЬ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ

Ключевые слова: *еловые древостои, биосферная роль лесов, фитомасса древостоев, регрессионные модели, биологическая продуктивность, аддитивные уравнения фитомассы, среднегодовая температура января, среднегодовые осадки.*

Предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы еловых древостоев по трансевразийским гидротермическим градиентам на основе сформированной базы данных о фактической структуре фитомассы 900 еловых древостоев (род *Picea* Dietr.), произрастающих на территории Евразии. Установлено, что фитомасса всех фракций увеличивается при повышении средней температуры января независимо от уровня осадков. В тёплых зональных поясах при повышении уровня осадков фитомасса всех фракций, за исключением массы хвои, увеличивается, а масса хвои при тех же условиях снижается. По мере перехода от тёплых зональных поясов к холодным зависимость фитомассы всех фракций от уровня осадков нивелируется, и при средней температуре января -30°C либо исчезает, либо приобретает слабый отрицательный тренд. При повышении температуры на 1°C в разных экорегионах, характеризующихся разными показателями температуры и осадков, прослеживается общая закономерность снижения, как общей фитомассы, так и всех её фракций, включая корни. При увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах, характеризующихся разными показателями температуры и осадков, в тёплых зональных поясах ($0^{\circ}\text{C}\dots 10^{\circ}\text{C}$) фитомасса общая, надземная, стволов и корней увеличивается, а в холодных ($-20^{\circ}\text{C}\dots -30^{\circ}\text{C}$) снижается. 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, I.S. Tsepordey, V.P. Chasovskikh

FOREST STAND BIOMASS: AN ADDITIVE MODEL SENSITIVE TO TEMPERATURE AND PRECIPITATION VARIABLES FOR *PICEA* SPP. FORESTS IN EURASIA

Key words: *spruce forests, biosphere role of forests, forest biomass, regression models, biological productivity, additive biomass equations, January mean temperature, mean annual precipitation.*

The first attempt of modeling changes in the additive component composition of 900 spruce stands (genus *Picea* sp.) biomass (t/ha), according to the trans-Eurasian hydrothermal gradients of Eurasia using the database compiled on the structure of harvest biomass. It is found that the biomass of all components increases with the increase in the mean January temperature, regardless of precipitation. In warm zonal belts with increasing precipitation the biomass of all components increases, except for the needle mass, but the needle mass decreases under the same conditions. In process of the transition from the warm zone to the cold one, the dependence of all biomass components upon precipitation is leveled, and at the mean January temperature equal to -30°C it is disappeared or becomes weak negative trend. With an increase in temperature by 1°C in different ecoregions, characterized by different values of temperature and precipitation, there is a general pattern of decrease, as the total biomass, and all its components, including roots. With an increase in precipitation by 100 mm in different ecoregions, characterized by different values of temperature and precipitation, in warm zonal belts ($0^{\circ}\text{C}\dots 10^{\circ}\text{C}$)

biomass total, aboveground, stems and roots is increasing, and in cold ones (-20°C...-30°C) is decreasing. The development of such models for the main forest-forming species of Eurasia will make it possible to predict changes in the productivity of the forest cover of Eurasia due to climate change.

Как отмечалось в предыдущей статье настоящего выпуска (Усольцев и др., 2018а), разработка моделей фитомассы, чувствительных к изменению климата, ведется на уровнях как древостоев (Manogaran, 1974; Лит, 1974; DeLucia et al., 2000; Ni et al., 2001; Stegen et al., 2011; Fang et al., 2016; Усольцев и др., 2018), так и модельных деревьев (Forrester et al., 2017; Zeng et al., 2017), но, в основном, на локальном или региональном уровнях, часто без учёта возраста, морфологии древостоев и породного состава. Влияние климатических изменений на фитомассу той или иной древесной породы в аддитивном формате по трансконтинентальным гидротермическим градиентам практически не изучено.

В настоящем исследовании предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы еловых древостоев по трансевразийским гидротермическим градиентам. Как уже упоминалось, 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 насаждений лесообразующих пород Евразии (Усольцев, 2010; Usoltsev, 2013).

Материалы и методы

Из упомянутой базы данных взяты материалы в количестве 900 пробных площадей с определениями фитомассы (т/га). Каждая пробная площадь, на которой было выполнено определение фитомассы древостоев, позиционирована относительно изолиний среднегодовой температуры января (рис. 1) и относительно изолиний среднегодовых осадков (рис. 2), и составлена матрица исходных данных, в которой значения фракций фитомассы и таксационные показатели древостоев соотнесены с соответствующими значениями среднегодовой температуры и осадков, включенная затем в процедуру регрессионного анализа.

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. 3 предыдущей статьи настоящего выпуска (Усольцев и др., 2018б).

Результаты и обсуждение

Рассчитаны исходные регрессионные уравнения

$$\ln P_i = a_{0i} + a_{1i}(\ln A) + a_{2i}(\ln M) + a_{3i}(\ln N) + a_{4i}[\ln(Tm+40)] + a_{5i}(\ln PRm) + a_{6i}[\ln(Tm+40)] \cdot (\ln PRm), \quad (1)$$

где P_i – масса i -й фракции, т/га; A – возраст древостоя, лет; M – запас древесины, м³/га; N – густота древостоя, тыс. экз/га; i – индекс фракции фитомассы: общей (t), надземной (a), корней (r), кроны (c), ствола в коре (s), хвои (f), ветвей (b), древесины ствола (w) и коры ствола (bk); Tm – средняя температура января, °C; PRm – среднегодовые осадки, мм.

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.

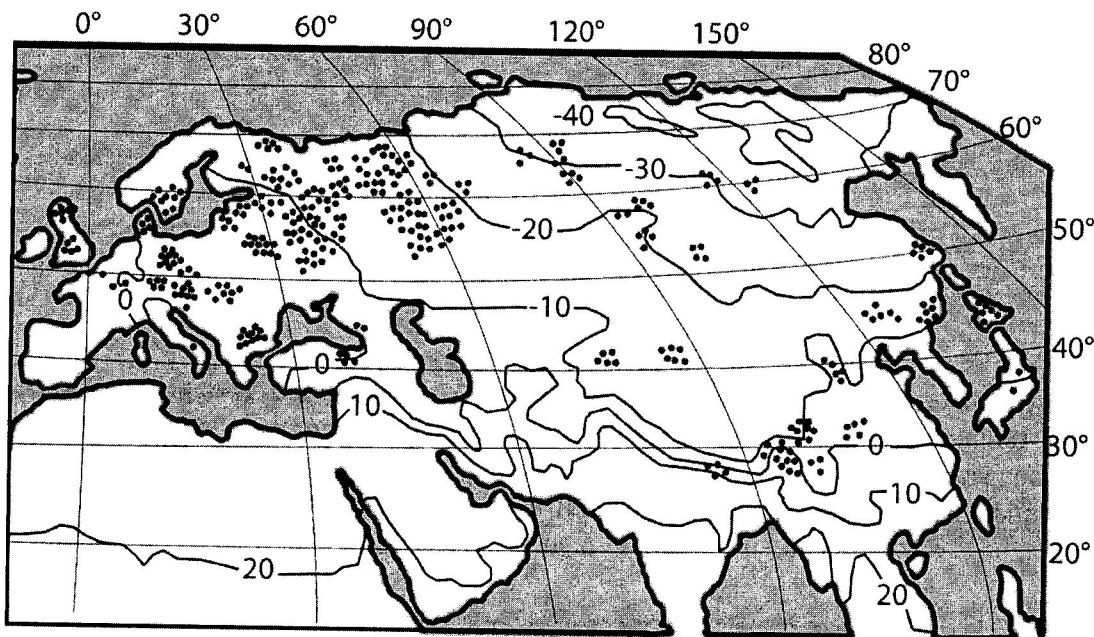


Рис. 1. Распределение 900 пробных площадей с измерениями фитомассы (т/га) еловых древостоев (род *Picea* Dietr.) на карте-схеме среднегодовой температуры января, °С (показана цифрами) (World Weather Maps, 2007).

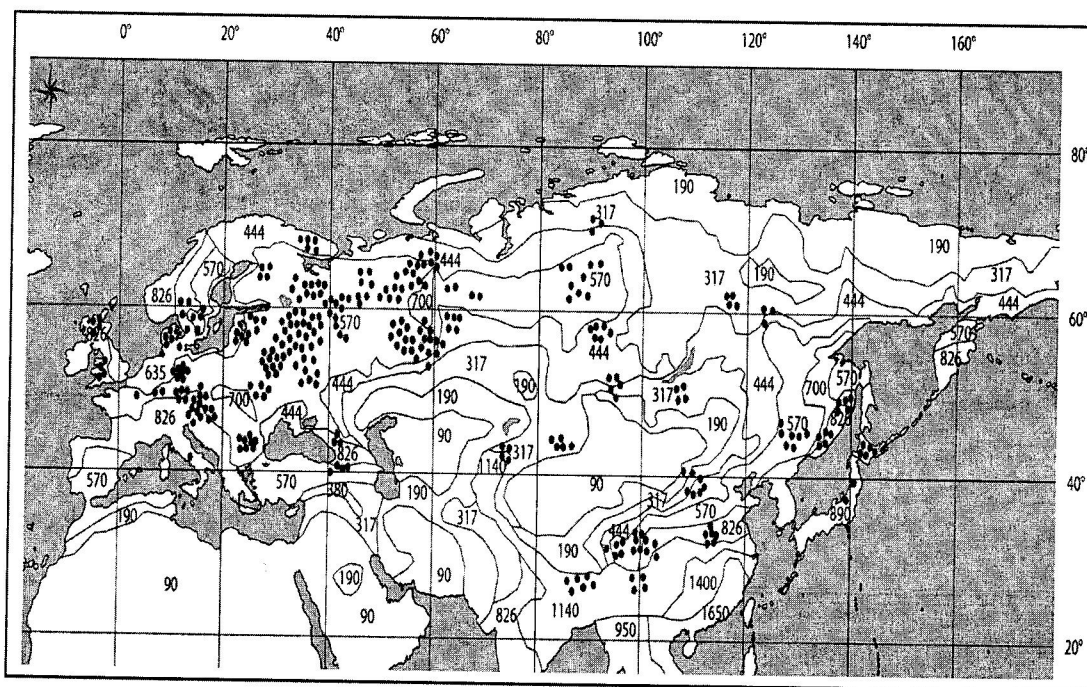


Рис. 2. Распределение 900 пробных площадей с измерениями фитомассы (т/га) еловых древостоев (род *Picea* Dietr.) на карте-схеме среднегодовых осадков, мм (показаны цифрами) (World Weather Maps, 2007): (<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>).

Полученные уравнения приведены к аддитивной форме согласно выше упомянутому алгоритму (Dong et al., 2015), и окончательный вид трансконтинентальной аддитивной модели фракционного состава фитомассы ельников показан в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика исходных регрессионных уравнений (1)

Фракции фитомассы	Регрессионные коэффициенты модели			
	P_t	A	M	N
	1,6868	$A^{-0,0631}$	$M^{0,8917}$	$N^{0,0303}$
Шаг 1				
P_a	1,84E-01	$A^{-0,0528}$	$M^{0,8846}$	$N^{0,0456}$
P_r	7,34E+01	$A^{0,0144}$	$M^{0,8453}$	$N^{0,0528}$
Шаг 2				
P_c	1,37E-05	$A^{-0,2301}$	$M^{0,7464}$	$N^{0,2057}$
P_s	2,98E-01	$A^{0,0435}$	$M^{0,9822}$	$N^{0,0235}$
Шаг 3а				
P_f	1,83E-10	$A^{-0,2702}$	$M^{0,6718}$	$N^{0,2592}$
P_b	1,84E-04	$A^{-0,1596}$	$M^{0,8371}$	$N^{0,2046}$
Шаг 3б				
P_w	7,05E-02	$A^{0,0950}$	$M^{0,9731}$	$N^{-0,0138}$
P_{bk}	3,11E-01	$A^{0,1663}$	$M^{0,7954}$	$N^{0,1152}$

Продолжение таблицы 1

Фракции фитомассы	Регрессионные коэффициенты модели			$adjR^2$	SE
	$(Tm+40)$	$(Tm+40)$	PRm		
P_t	$(Tm+40)^{0,4910}$	$(Tm+40)^{-0,0924} \ln(PRm)$	$PRm^{0,0487}$	0,974	1,25
Шаг 1					
P_a	$(Tm+40)^{0,8254}$	$(Tm+40)^{-0,1201} \ln(PRm)$	$PRm^{0,2744}$	0,974	1,21
P_r	$(Tm+40)^{-0,7995}$	$(Tm+40)^{0,0772} \ln(PRm)$	$PRm^{-0,6934}$	0,913	1,49
Шаг 2					
P_c	$(Tm+40)^{3,9073}$	$(Tm+40)^{-0,6237} \ln(PRm)$	$PRm^{1,8394}$	0,812	1,50
P_s	$(Tm+40)^{0,3354}$	$(Tm+40)^{-0,0491} \ln(PRm)$	$PRm^{0,0240}$	0,986	1,17
Шаг 3а					
P_f	$(Tm+40)^{6,6083}$	$(Tm+40)^{-1,0477} \ln(PRm)$	$PRm^{3,5374}$	0,700	1,63
P_b	$(Tm+40)^{2,8783}$	$(Tm+40)^{-0,4661} \ln(PRm)$	$PRm^{1,2422}$	0,817	1,60
Шаг 3б					
P_w	$(Tm+40)^{0,3654}$	$(Tm+40)^{-0,0489} \ln(PRm)$	$PRm^{0,1941}$	0,989	1,16
P_{bk}	$(Tm+40)^{-0,6774}$	$(Tm+40)^{0,0880} \ln(PRm)$	$PRm^{-0,1867}$	0,934	1,36

Для сравнения показателей адекватности исходных и аддитивных уравнений те и другие протабулированы по фактическим массообразующим показателям базы 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 расчётом по исходным и аддитивным моделям фитомассы древостоев (рис. 3), показывает степень коррелированности названных показателей и отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям.

Проблема табулирования модели (1) заключается в том, что мы можем задать только показатели возраста древостоя, температуры и осадков, а значения запаса и густоты могут быть введены в таблицу в виде расчетных величин, полученных системой вспомогательных рекурсивных уравнений. Такие уравнения имеют общий вид:

$$N = f [A, 1/A, (Tm+40), PRm], \tag{2}$$

$$M = f [1/A, N, (Tm+40), PRm]. \tag{3}$$

Результаты расчета (2) и (3) даны в табл. 4.

Таблица 2

Трехшаговая аддитивная модель фракционного состава фитомассы древостоев ели, реализованная по принципу пропорционального взвешивания

$Pt = 1,6868 A^{-0,0631} M^{0,8917} N^{0,0303} (Tm+40)^{0,4910} PRm^{0,0487} (Tm+40)^{-0,0924(\ln PRm)}$	
Шаг 1	$Pa = \frac{1}{1+4,00E+02 A^{0,0672} M^{-0,0393} N^{0,0072} (Tm+40)^{-1,6249} PRm^{-0,9679} (Tm+40)^{0,1973(\ln PRm)}} \times Pt$
	$Pr = \frac{1}{1+2,50E-03 A^{-0,0672} M^{0,0393} N^{-0,0072} (Tm+40)^{1,6249} PRm^{0,9679} (Tm+40)^{-0,1973(\ln PRm)}} \times Pt$
Шаг 2	$Pc = \frac{1}{1+2,18E+04 A^{0,2737} M^{0,2358} N^{-0,1822} (Tm+40)^{-3,5683} PRm^{-1,8154} (Tm+40)^{0,5745(\ln PRm)}} \times Pa$
	$P_s = \frac{1}{1+4,59E-05 A^{-0,2737} M^{-0,2358} N^{0,1822} (Tm+40)^{3,5683} PRm^{1,8154} (Tm+40)^{-0,5745(\ln PRm)}} \times Pa$
Шаг 3а	$Pf = \frac{1}{1+1,00E+06 A^{0,1107} M^{0,1653} N^{-0,0546} (Tm+40)^{-3,7300} PRm^{-2,2952} (Tm+40)^{0,5817(\ln PRm)}} \times Pc$
	$Pb = \frac{1}{1+9,96E-07 A^{-0,1107} M^{-0,1653} N^{0,0546} (Tm+40)^{3,7300} PRm^{2,2952} (Tm+40)^{-0,5817(\ln PRm)}} \times Pc$
Шаг 3б	$Pw = \frac{1}{1+4,4055 A^{0,0713} M^{-0,1776} N^{0,1290} (Tm+40)^{-1,0428} PRm^{-0,3808} (Tm+40)^{0,1369(\ln PRm)}} \times P_s$
	$Pbk = \frac{1}{1+2,27E-01 A^{-0,0713} M^{0,1776} N^{-0,1290} (Tm+40)^{1,0428} PRm^{0,3808} (Tm+40)^{-0,1369(\ln PRm)}} \times P_s$

Таблица 3

Сравнение показателей адекватности исходных и аддитивных уравнений фитомассы ельников

Коэффициент детерминации	Фракции фитомассы								
	Pt	Pa	Pr	P_s	Pw	Pbk	Pc	Pb	Pf
Исходные уравнения									
R^2	0,883	0,898	0,595	0,912	0,956	0,533	0,410	0,363	0,249
Аддитивные уравнения									
R^2	0,883	0,899	0,595	0,919	0,947	0,541	0,448	0,443	0,349

Результаты табулирования уравнений в последовательности (2), (3) и (1) представляют довольно громоздкую таблицу. Мы взяли из неё показатели фракционного состава фитомассы ельников для возраста 100 лет и построили графики их зависимости от температуры и осадков (рис. 4).

Судя по графикам, все фракции фитомассы ельников, за некоторым исключением, изменяются по одной общей схеме, но в разных соотношениях. Фитомасса всех фракций увеличивается при повышении средней температуры января от -30°C до $+10^{\circ}\text{C}$ независимо от уровня осадков в разных экорегионах. В тёплых зональных поясах ($Tm = +10^{\circ}\text{C}$) при повышении уровня осадков от 300 до 900 мм фитомасса всех фракций, за исключением массы хвои, увеличивается. Масса хвои при тех же условиях снижается. По мере перехода от тёплых зональных поясов ($Tm = +10^{\circ}\text{C}$) к холодным зависимость фитомассы всех фракций от уровня осадков нивелируется, т.е. становится всё менее выраженной, и при температуре $Tm = -30^{\circ}\text{C}$ либо исчезает, либо приобретает слабый отрицательный тренд. Это согласуется с увеличением относительного радиального прироста, обезличенного по породному составу, в бореальных лесах Канады по мере роста как среднегодовой температуры, так и годовых осадков, но только в теплых зональных поясах и за исключением массы хвои (Miao, Li, 2011).

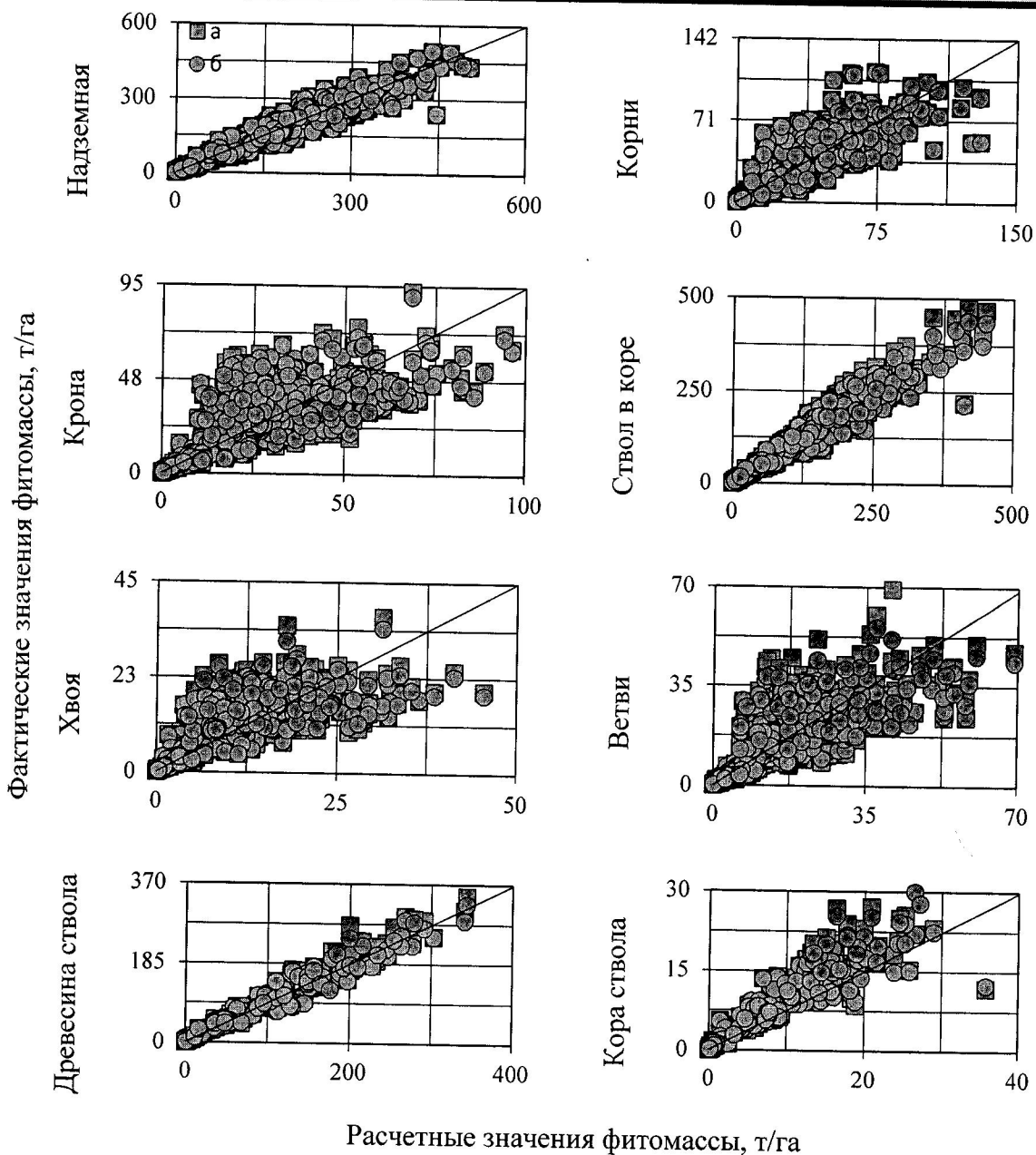


Рис. 3. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчетом по исходным (а) и аддитивным (б) моделям фитомассы еловых древостоев.

Таблица 4
Характеристика рекурсивной системы вспомогательных уравнений для массообразующих показателей еловых древостоев

Массообразующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели				
	$\ln N$	-6,9760	-1,1359 $\ln A$	-9,0578 (1/A)	-
$\ln M$	26,6476	0,4128 $\ln N$	-55,2965 (1/A)	-0,0821 $(\ln N)(\ln A)$	-6,4361 $\ln(Tm+40)$

Продолжение таблицы 4

Массообразующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели		$adjR$	SE
	$\ln N$	2,4072 $\ln PRm$		
$\ln M$	-4,2439 $\ln PRm$	1,3318 $[\ln(Tm+40)] \ln(PRm)$	0,779	0,64

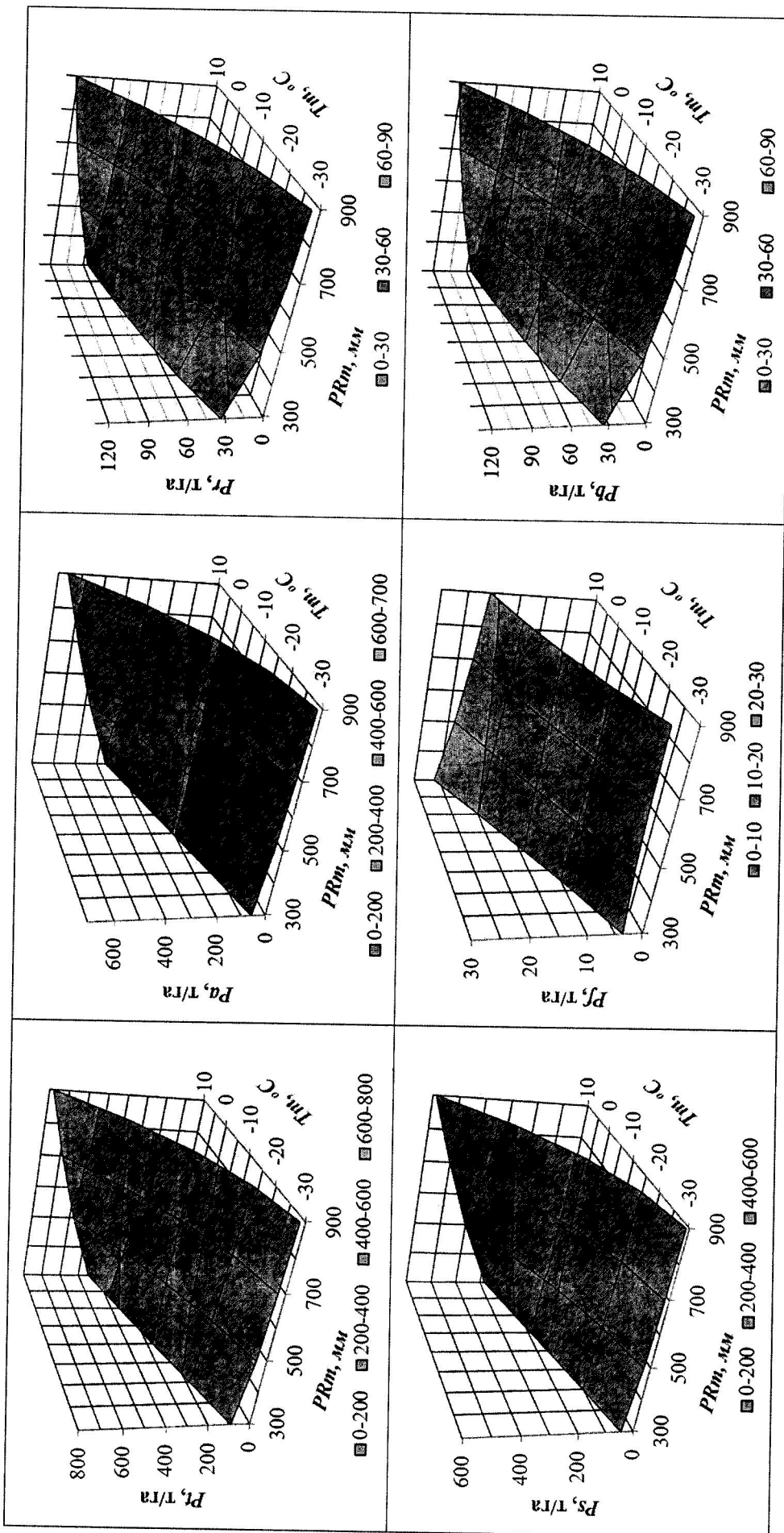


Рис. 4. Зависимость фитомассы ельников Евразии от среднегодовой температуры января (T_m) и осадков (PR_m). Обозначения: P_t , P_s , P_a , P_f , P_r и P_b – соответственно фитомасса общая, стволов, надземная, хвои, корневой и ветвей, т/га.

Полученные аддитивные модели фитомассы ельников дают возможность установить количественные изменения в структуре их фитомассы в связи с климатическими изменениями, в частности, среднегодовой температуры января и среднегодовых осадков. Процентное изменение структуры фитомассы связано с соотношением названных двух климатических показателей. Для центральной части европейской России, характеризующейся среднегодовой температурой января -10°C и среднегодовыми осадками 500 мм, повышение температуры на 1°C при неизменном уровне осадков вызывает в ельниках в возрасте 100 лет увеличение фитомассы всех фракций: общей, надземной, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 5,1; 5,4; 3,8; 5,8; 3,3 и 4,1 %. Для того же региона в ельниках того же возраста повышение осадков на 100 мм при неизменной среднегодовой температуре января вызывает снижение фитомассы общей, подземной и ветвей соответственно на 0,4; 4,7 и 4,3 % и повышение фитомассы надземной, стволов и хвои соответственно на 0,8; 1,6 и 0,4 %. Таким образом, повышение температуры января на 1°C независимо от уровня осадков вызывает в 100-летнем ельнике европейской России увеличение фитомассы всех фракций примерно на 5 %, а на повышение осадков на 100 мм при неизменных температурах января фракции фитомассы реагируют с противоположным знаком, в частности, общая фитомасса снижается, а надземная возрастает. Противоположные тенденции обнаруживаются даже в пределах древесного полога: масса ветвей снижается, а масса хвои несколько возрастает.

Необходимо отметить, что названные закономерности имеют гипотетический характер: они отражают длительные приспособительные реакции древостоев к региональным климатическим особенностям и не учитывают быстрых темпов нынешних экологических изменений, которые налагают серьезные ограничения на способность лесов адаптироваться к новым климатическим условиям (Alcamo et al., 2007).

На **рис. 5** показано изменение фитомассы 100-летних древостоев ели (Δ , %) при повышении температуры на 1°C в разных экорегионах, характеризующихся разными соотношениями температуры и осадков. При этом предполагается, что изменение климата не влияет на осадки, которые изменяются только территориально (по регионам), а температура в результате предполагаемого изменения климата повышается на 1°C при разных территориальных (зональных) уровнях температур, обозначаемых как $-40\Delta...0\Delta$. **Рис. 5** демонстрирует общую закономерность снижения, как общей фитомассы, так и всех её фракций, включая корни, при повышении температуры на 1°C во всех температурных зонах Евразии и во всех регионах, различающихся по уровню осадков.

На **рис. 6** показано изменение фитомассы ельников (Δ , %) при увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах. При этом предполагается, что температура января изменяется только территориально, а осадки в результате предполагаемого изменения климата повышаются на 100 мм при разных территориальных уровнях осадков, обозначаемых как $200\Delta...900\Delta$. В тёплых зональных поясах ($0^{\circ}\text{C}...10^{\circ}\text{C}$) фитомасса общая, надземная, стволов и корней при увеличении осадков на 100 мм увеличивается, а в холодных ($-20^{\circ}\text{C}...-30^{\circ}\text{C}$) снижается. Фракции фитомассы кроны реагируют на изменение осадков неоднозначно. Масса хвои в холодных поясах ($-10^{\circ}\text{C}...-30^{\circ}\text{C}$) увеличивается независимо от региональных уровней нынешних осадков, а в тёплых поясах ($0^{\circ}\text{C}...10^{\circ}\text{C}$) снижается. Масса ветвей при повышении уровня осадков на 100 мм снижается во всех экорегионах при их нынешних уровнях температур и осадков.

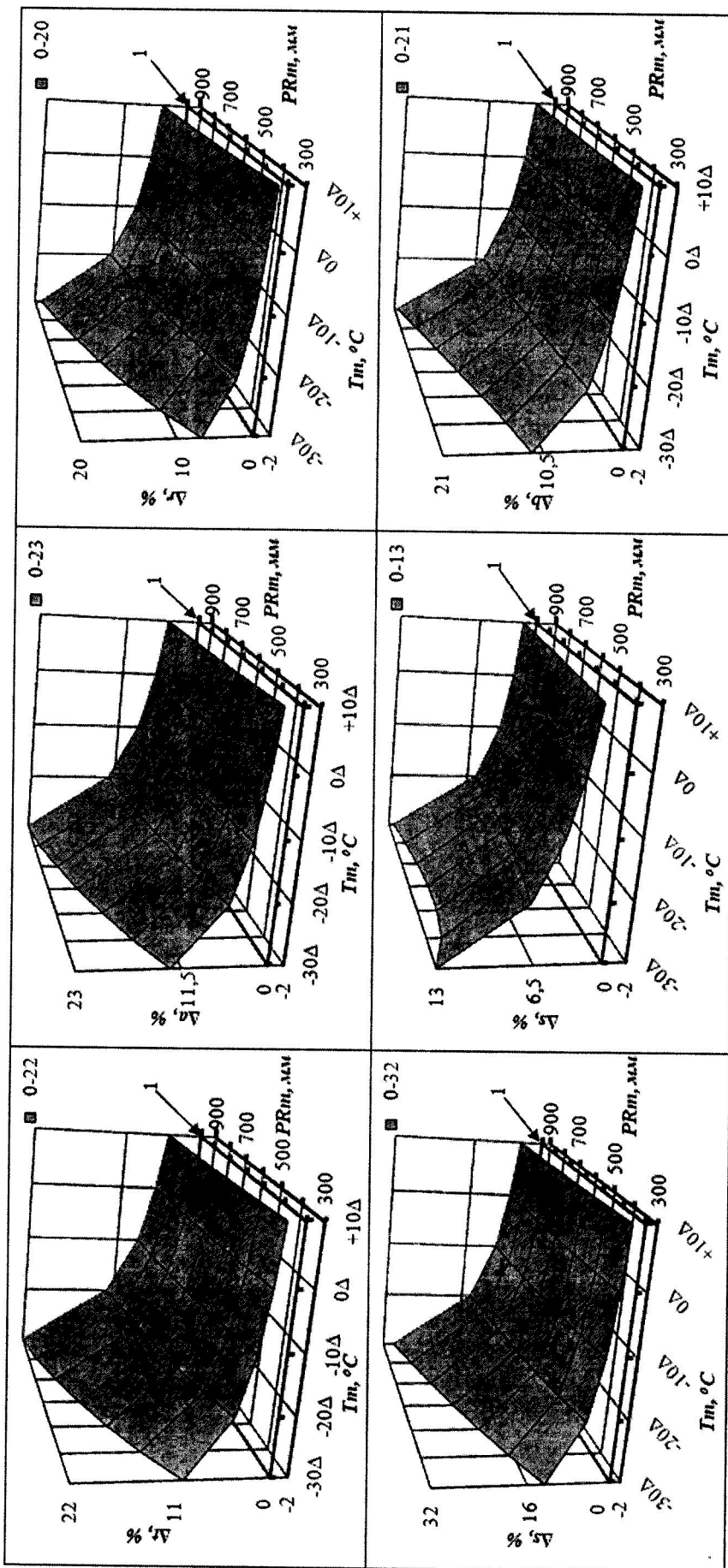


Рис. 5. Изменение фитомассы (Δ , %) еловых древостоев при повышении температуры января на 1°C вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков. T_m – средняя температура января, $^\circ\text{C}$; PR_m – средняя температура января, $^\circ\text{C}$; PR_m – среднегодовой уровень осадков, мм. Фракции фитомассы, изменяющейся при повышении температуры на 1°C (%): общая Δ , надземная Δ_a , корней Δ_r , стволов Δ_s , хвои Δ_h и ветвей Δ_b . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы при предполагаемом повышении температуры на 1°C ; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы (Δ , %) при предполагаемом повышении температуры на 1°C .

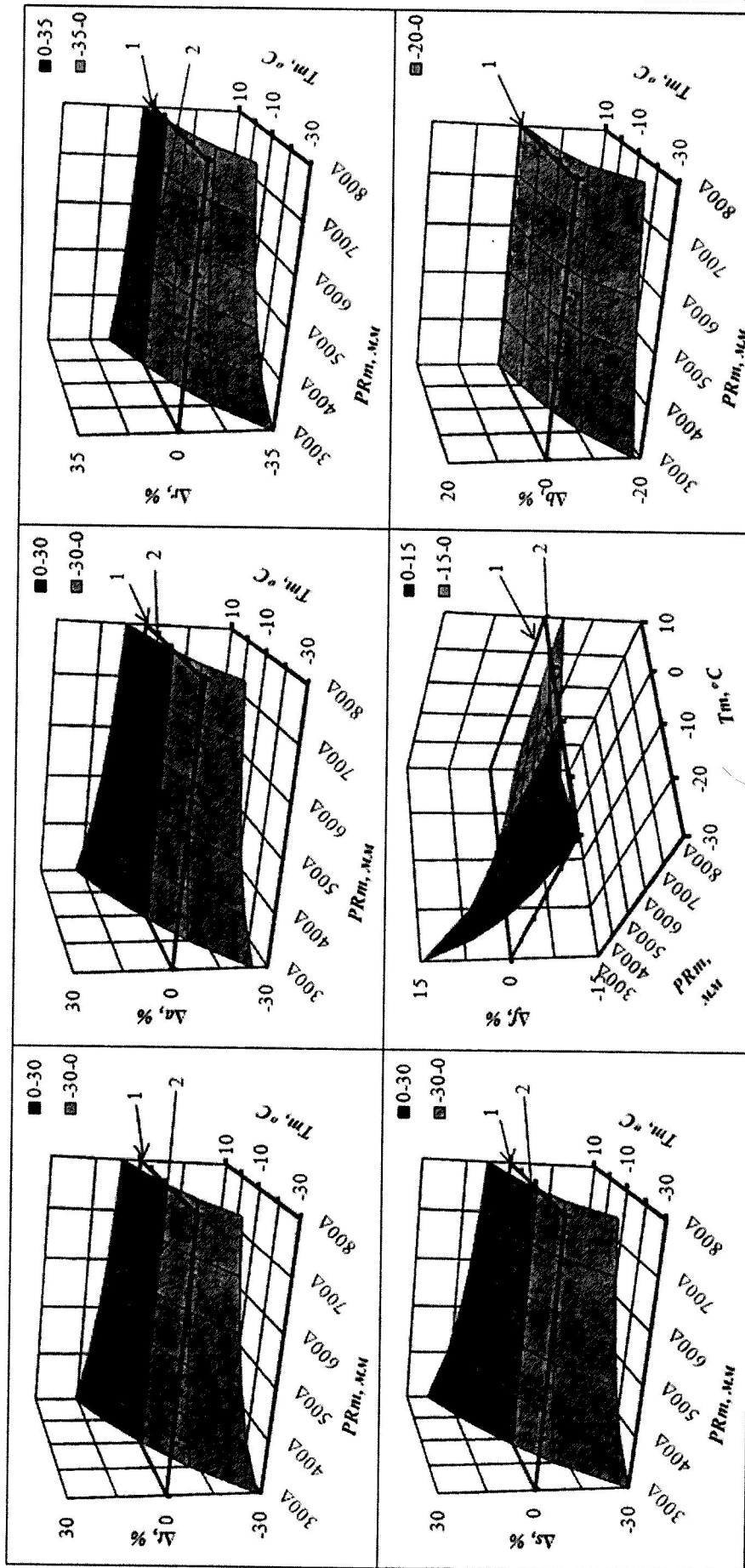


Рис. 6. Изменение фитомассы (Δ , %) еловых деревьев при повышении уровня осадков на 100 мм вследствие предпологаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков. T_m – средняя температура января, °C; PR_{mm} – среднегодовой уровень осадков, мм. Фракции фитомассы: общая Δ_a , надземная Δ_r , корневая Δ_g , стволов Δ_b , хвои Δ_l и ветвей Δ_k . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы при предполагаемом увеличении осадков на 100 мм; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы (Δ , %) при предполагаемом увеличении осадков на 100 мм.

Заклучение

Таким образом, предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы еловых древостоев по трансевразийским гидро-термическим градиентам на основе сформированной базы данных о фактической структуре фитомассы 900 еловых древостоев (род *Picea* Dietr.), произрастающих на территории Евразии. Установлено, что фитомасса всех фракций увеличивается при повышении средней температуры января независимо от уровня осадков. В тёплых зональных поясах при повышении уровня осадков фитомасса всех фракций, за исключением массы хвои, увеличивается, а масса хвои при тех же условиях снижается. По мере перехода от тёплых зональных поясов к холодным зависимость фитомассы всех фракций от уровня осадков нивелируется, и при средней температуре января -30°C либо исчезает, либо приобретает слабый отрицательный тренд.

При повышении температуры на 1°C в разных экорегионах, характеризующихся разными показателями температуры и осадков, прослеживается общая закономерность снижения, как общей фитомассы, так и всех её фракций, включая корни. При увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах, характеризующихся разными показателями температуры и осадков, в тёплых зональных поясах ($0^{\circ}\text{C} \dots 10^{\circ}\text{C}$) фитомасса общая, надземная, стволов и корней увеличивается, а в холодных ($-20^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$) снижается. Масса хвои в холодных поясах ($-10^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$) увеличивается независимо от региональных уровней нынешних осадков, а в тёплых поясах ($0^{\circ}\text{C} \dots 10^{\circ}\text{C}$) снижается. Масса ветвей при этом снижается во всех экорегионах.

В центральной части европейской России повышение температуры января на 1°C независимо от уровня осадков вызывает в 100-летнем ельнике увеличение фитомассы всех фракций примерно на 5 %, а на повышение осадков на 100 мм при неизменных температурах января фракции фитомассы реагируют с противоположным знаком, в частности, общая фитомасса снижается, а надземная возрастает.

Полученные аддитивные модели фитомассы еловых древостоев дают возможность установить количественные изменения в её структуре в связи с климатическими изменениями, в частности, среднегодовой температуры января и среднегодовых осадков. Поскольку закономерности изменения продукционных показателей древостоев в разных регионах различаются, их изучение необходимо проводить на региональной основе. Разработка подобных моделей для основных лесобразующих пород Евразии даст возможность прогнозировать изменения продуктивности лесного покрова Евразии в связи с изменениями климата.

Список использованной литературы

Лит Х. Моделирование первичной продуктивности Земного шара // Экология. 1974. № 2. С. 13-23.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>).

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Осмирко А.А., Часовских В.П. Фитомасса древостоев двухвойных сосен Евразии: аддитивные модели в климатических градиентах // Эко-потенциал. 2018а. № 3 (23). С. 9-31.

Усольцев В.А., Колчин К.В., Цепордей И.С., Осмирко А.А., Часовских В.П., Уразова А.Ф. Аддитивная модель фитомассы пихтовых древостоев в градиентах температур и осадков в Евразии // Эко-потенциал. 2018б. № 4 (24). С. 78-90.

Alcamo J., Moreno J.M., Nováky B., Bindi M., Corobov R., Devoy R.J.N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesen J.E., Shvidenko A. Europe: impacts, adaptation and vulnerability.

Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (eds.). Climate change 2007. Cambridge University Press, Cambridge. P. 541–580.

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

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).

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.

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.

Miao Z., Li C. Predicting tree growth dynamics of boreal forest in response to climate change // C. Li et al. (eds.). Landscape Ecology in Forest Management and Conservation. Berlin, Heidelberg: Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, 2011. P. 176–205.

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).

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. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second ed., enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).

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.