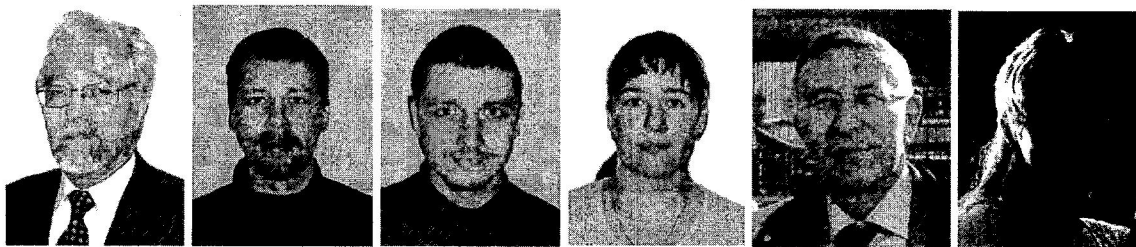


*В.А. Усольцев<sup>1,2</sup>, К.В. Колчин<sup>1</sup>, И.С. Цепордей<sup>2</sup>, А.А. Осмирко<sup>1</sup>, В.П. Часовских<sup>1</sup>,  
А.Ф. Уразова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург  
<sup>2</sup> Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

**АДДИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ФИТОМАССЫ ПИХТОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ  
В ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ В ЕВРАЗИИ**



**Ключевые слова:** *пихтовые древостой, 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 370 пихтовых древостоев по трансевразийским гидротермическим градиентам Евразии на основе сформированной базы данных о фактической структуре фитомассы. Установлено, что все фракции фитомассы, за исключением массы кроны, изменяются по одной общей схеме, но в разных соотношениях: фитомасса пихтарников увеличивается при повышении уровня осадков от 300 до 900 мм во всех зональных поясах, характеризуемых диапазоном средних температур января от +10°C до -30°C, и независимо от уровня осадков также увеличивается при зональном повышении средней температуры января от -30°C до +10°C. Но масса хвои и ветвей пихтарников в трансконтинентальных гидротермических градиентах изменяется иначе: если при повышении средней температуры января от -30°C до +10°C она увеличивается независимо от уровня осадков, то при повышении уровня осадков в тёплых поясах она снижается, а в холодных – увеличивается, причем последняя закономерность более четко выражена по массе хвои и менее очевидна – по массе ветвей. При повышении температуры на 1°C в разных экорегионах, характеризуемых разными соотношениями температуры и осадков, как масса корней, так и все фракции надземной фитомассы пихтарников закономерно увеличиваются в предположении, что уровень осадков не подвержен изменениям. При увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах, характеризуемых разными соотношениями температуры и осадков, как масса корней, так и все фракции надземной фитомассы пихтарников также закономерно увеличиваются в предположении, что средняя температура января не подвержена изменениям. Исключение составили закономерности для массы хвои и ветвей: в тёплом климатическом поясе (субтропики Китая) предполагается некоторое снижение их фитомассы независимо от существующего уровня осадков в экорегионе.

*V.A. Usoltsev, K.V. Kolchin, I.S. Tsepordey, A.A. Osmirko, V.P. Chasovskikh, A.F. Urazova*

**ADDITIVE MODEL OF FIR STAND BIOMASS SENSITIVE TO TEMPERATURE  
AND PRECIPITATION IN EURASIA**

**Key words:** *fir 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 370 fir stands biomass (t/ha), according to the trans-Eurasian hydrothermal gradients of Eurasia on the basis of the database compiled for the actual structure of biomass. It is found that all the biomass components, except for the tree crown mass, change in one common scheme, but in different ratios: the fir-stand biomass increases in all zonal belts ( $T_m = +10...-30^{\circ}\text{C}$ ) due to the increase in precipitation from 300 to 900 mm, as well due to the increase in the average January temperature from  $-30^{\circ}\text{C}$  to  $+10^{\circ}\text{C}$  regardless of the precipitation level. But the mass of needles and branches of fir stands varies in transcontinental hydrothermal gradients by the different ways: if it increases in different zones having mean January temperature from  $-30^{\circ}\text{C}$  to  $+10^{\circ}\text{C}$ , regardless of the level of precipitation, then it decreases in warm zones and it increases in cold zones due the increase in precipitation, and the latter pattern is more clearly expressed for needle biomass and less obvious for branches biomass. With the increase in January temperature by  $1^{\circ}\text{C}$  in different ecoregions, characterized by different values of temperature and precipitation, both the mass of the roots and all components of the aboveground biomass of fir stands are increasing under the assumption that the precipitation level is not subject to changes. With the increase in precipitation by 100 mm in different ecoregions, characterized by different values of temperature and precipitation, both the mass of roots and all components of the aboveground biomass of stands are also increasing under the assumption that the mean January temperature is not subject to changes. The exceptions are the patterns for the needles and branches biomass: in a warm climate zone (subtropical China) it is expected a slight decrease of their biomass, regardless of the existing level of precipitation in this ecoregion.

-----  
**Усольцев Владимир Андреевич** - доктор сельскохозяйственных наук, 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.

**Vladimir Andreyevich Usoltsev** - 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.

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

**Цепордей Иван Степанович** – аспирант 2-го года обучения в Ботаническом саду УрО РАН (Екатеринбург). Тел.: (343)254-61-59; e-mail: [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru).

**Ivan Sergeyevich Tsepordey** – postgraduate at Botanical Garden of Ural Branch of RAS (Yekaterinburg). Phone: (343)254-61-59; e-mail: [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru).

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

**Anna Andreevna Osmirko** - 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.

**Viktor Petrovich Chasovskikh** - 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.

**Уразова Алина Флоритовна** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства Института лесопромышленного бизнеса и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета. Тел. 8-908-911-3024; e-mail: [ura-alina@mail.ru](mailto:ura-alina@mail.ru).

**Alina Floritovna Urazova**– PhD, Associate Professor of the Forestry Machinery and Equipment Department at the Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: 8-908-911-3024; e-mail: [ura-alina@mail.ru](mailto:ura-alina@mail.ru).

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., 2018б), так и модельных деревьев (Forrester et al., 2017; Zeng et al., 2017; Усольцев и др., 2018а), но, в основном, на локальном или региональном уровнях, часто без учёта возраста, морфологии древостоев и породного состава. При этом не обеспечивается аддитивность фракционного состава, согласно которой суммарная фитомасса фракций (стволы, ветви, хвоя, корни), полученная по «фракционным» уравнениям, равнялась бы значению фитомассы, полученной по общему уравнению (Dong et al., 2015). Влияние климатических изменений на фитомассу той или иной древесной породы в формате аддитивных моделей по трансконтинентальным гидротермическим градиентам совершенно не изучено.

В настоящем исследовании предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы пихтовых древостоев по трансевразийским гидротермическим градиентам. 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 370 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 её фракции согласно схеме, представленной на рис. 3.

## Результаты и обсуждение

Расчитаны исходные регрессионные уравнения

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

где  $P_i$  – масса  $i$ -й фракции, т/га;  $A$  – возраст древостоя, лет;  $M$  – запас древесины, м<sup>3</sup>/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 ( $bk$ );  $Tm$  – среднегодовая температура января, °С;  $PRm$  – среднегодовые осадки, мм.

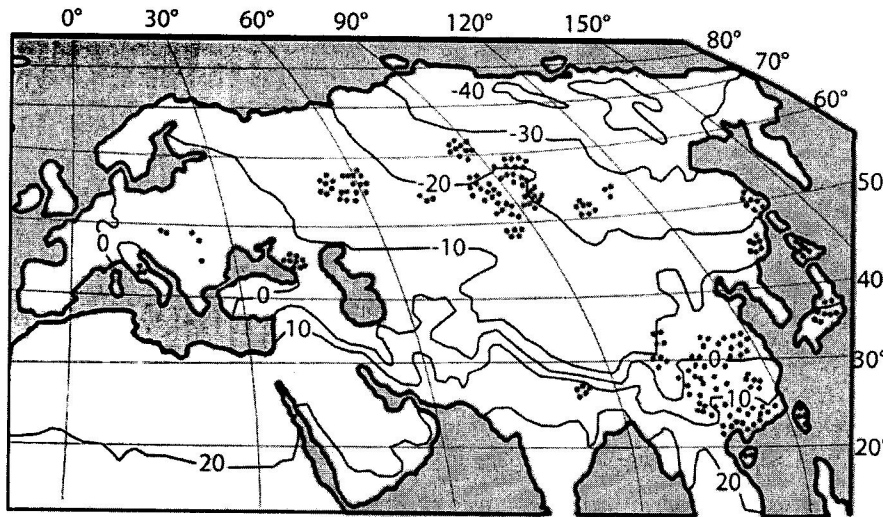


Рис. 1. Распределение 370 пробных площадей с измерениями фитомассы (т/га) пихтовых древостоев на карте-схеме среднегодовой температуры января, °С (показана цифрами) (World Weather Maps, 2007).

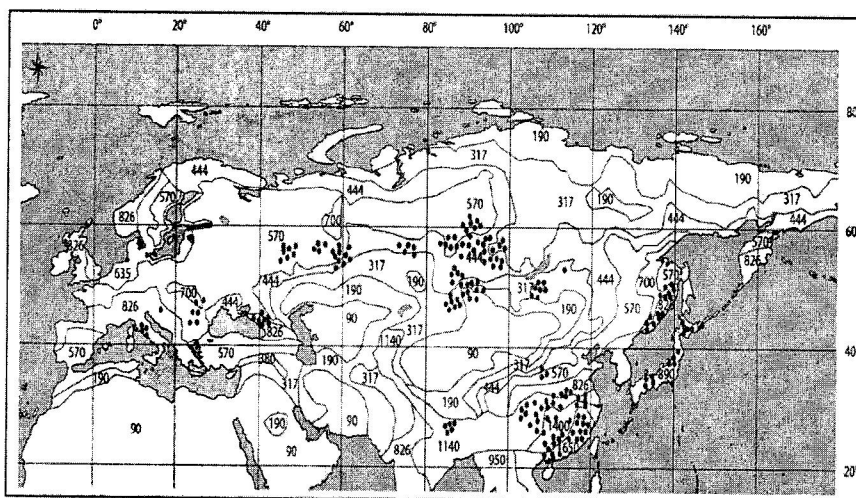


Рис. 2. Распределение 370 пробных площадей с измерениями фитомассы (т/га) пихтовых древостоев на карте-схеме среднегодовых осадков, мм (показаны цифрами) (World Weather Maps, 2007): (<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>).

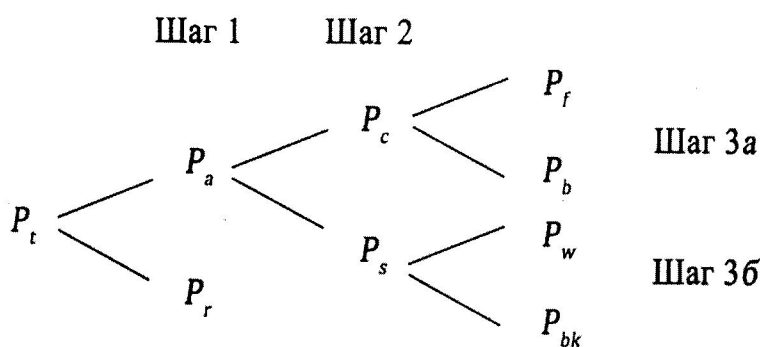


Рис. 3. Блок-схема «дисагрегированной» (расчленяемой) трехшаговой аддитивной модели фитомассы древостоев. Обозначения:  $P_t, P_r, P_a, P_c, P_s, P_f, P_b, P_w$  и  $P_{bk}$  – соответственно фитомасса древостоя: общая, подземная (корней), надземная, кроны (хвои и ветвей), ствола (древесины и коры), хвои, ветвей, древесины ствола и коры ствола, т/га.

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 ко-



эфициенты 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 ельников показан в табл. 2.

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. 4), показывает степень коррелированности названных показателей и отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям.

Характеристика исходных регрессионных уравнений (1)

Таблица 1

Фракции фитомассы	Регрессионные коэффициенты модели				
	$P_t$	2,245E-05	$A^{0,2376}$	$M^{0,7697}$	$A^{0,0221 \ln(N)}$
Шаг 1					
$P_a$	2,08E-03	$A^{0,1725}$	$M^{0,8235}$	$A^{0,0213 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{1,6741}$
$P_r$	1,89E-08	$A^{0,2530}$	$M^{0,6758}$	$A^{0,0310 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{4,4585}$
Шаг 2					
$P_c$	1,76E-06	$A^{0,1250}$	$M^{0,5499}$	$A^{0,0350 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{3,8132}$
$P_s$	2,67E-01	$A^{0,1898}$	$M^{0,9364}$	$A^{0,0132 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{-0,1326}$
Шаг 3а					
$P_f$	5,99E-13	$A^{-0,1369}$	$M^{0,5002}$	$A^{0,0259 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{7,9716}$
$P_b$	2,26E-03	$A^{0,2892}$	$M^{0,6169}$	$A^{0,0325 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{1,2925}$
Шаг 3б					
$P_w$	4,14E-10	$A^{0,2061}$	$M^{0,9849}$	$A^{0,0225 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{6,0684}$
$P_{bk}$	3,40E+07	$A^{0,2179}$	$M^{0,7755}$	$A^{0,0345 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{-6,0017}$

Продолжение таблицы 1

Фракции фитомассы	Регрессионные коэффициенты модели		$adjR^*$	$SE^*$
	$P_t$	$PRm^{1,3132}$		
Шаг 1				
$P_a$	$PRm^{0,7301}$	$(Tm+40)^{-0,2129 \ln(PRm)}$	0,957	1,17
$P_r$	$PRm^{2,2674}$	$(Tm+40)^{-0,6141 \ln(PRm)}$	0,780	1,36
Шаг 2				
$P_c$	$PRm^{1,8751}$	$(Tm+40)^{-0,5481 \ln(PRm)}$	0,717	1,37
$P_s$	$PRm^{-0,1075}$	$(Tm+40)^{0,0470 \ln(PRm)}$	0,975	1,15
Шаг 3а				
$P_f$	$PRm^{4,3326}$	$(Tm+40)^{-1,2141 \ln(PRm)}$	0,562	1,48
$P_b$	$PRm^{0,5408}$	$(Tm+40)^{-0,1645 \ln(PRm)}$	0,738	1,44
Шаг 3б				
$P_w$	$PRm^{2,8542}$	$(Tm+40)^{-0,8792 \ln(PRm)}$	0,978	1,13
$P_{bk}$	$PRm^{-3,3007}$	$(Tm+40)^{0,9810 \ln(PRm)}$	0,928	1,20

\*  $adjR^2$  – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных;  $SE$  – стандартная ошибка уравнения.

Таблица 2

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

$$P_t = 2,25E-05 A^{0,2376} M^{0,7697} A^{0,0221 \ln(N)} (Tm+40)^{3,1452} PR^{1,3132} (Tm+40)^{-0,3951 \ln(PR)}$$

Шаг 1	$P_a = \frac{1}{1+9,10E-06 A^{0,0805} M^{-0,1477} A^{0,0097 \ln(N)} (Tm+40)^{2,7844} PR^{1,5373} (Tm+40)^{-0,4013 \ln(PR)}} \times P_t$
	$P_r = \frac{1}{1+1,10E+05 A^{-0,0805} M^{0,1477} A^{-0,0097 \ln(N)} (Tm+40)^{-2,7844} PR^{-1,5373} (Tm+40)^{0,4013 \ln(PR)}} \times P_t$
Шаг 2	$P_c = \frac{1}{1+1,52E+05 A^{0,0648} M^{0,3865} A^{-0,0217 \ln(N)} (Tm+40)^{-3,9458} PR^{-1,9827} (Tm+40)^{0,5951 \ln(PR)}} \times P_a$
	$P_s = \frac{1}{1+6,59E-06 A^{-0,0648} M^{-0,3865} A^{0,0217 \ln(N)} (Tm+40)^{3,9458} PR^{1,9827} (Tm+40)^{-0,5951 \ln(PR)}} \times P_a$
Шаг 3а	$P_f = \frac{1}{1+3,77E+09 A^{0,4261} M^{0,1167} A^{0,0067 \ln(N)} (Tm+40)^{-6,6791} PR^{-3,7918} (Tm+40)^{1,0496 \ln(PR)}} \times P_c$
	$P_b = \frac{1}{1+2,65E-10 A^{-0,4261} M^{-0,1167} A^{-0,0067 \ln(N)} (Tm+40)^{6,6791} PR^{3,7918} (Tm+40)^{-1,0496 \ln(PR)}} \times P_c$
Шаг 3б	$P_w = \frac{1}{1+8,23E+16 A^{0,0118} M^{-0,2094} A^{0,0120 \ln(N)} (Tm+40)^{-12,0700} PR^{-6,1548} (Tm+40)^{1,8602 \ln(PR)}} \times P_s$
	$P_{bk} = \frac{1}{1+1,22E-17 A^{-0,0118} M^{0,2094} A^{-0,0120 \ln(N)} (Tm+40)^{12,0700} PR^{6,1548} (Tm+40)^{-1,8602 \ln(PR)}} \times P_s$

Таблица 3

Сравнение коэффициентов детерминации исходных и аддитивных уравнений фитомассы пихтарников

Фракции фитомассы								
$P_t$	$P_a$	$P_r$	$P_s$	$P_w$	$P_{bk}$	$P_c$	$P_b$	$P_f$
Исходные уравнения								
0,934	0,939	0,736	0,963	0,829	0,581	0,674	0,709	0,412
Аддитивные уравнения								
0,934	0,940	0,750	0,950	0,792	0,554	0,654	0,684	0,368

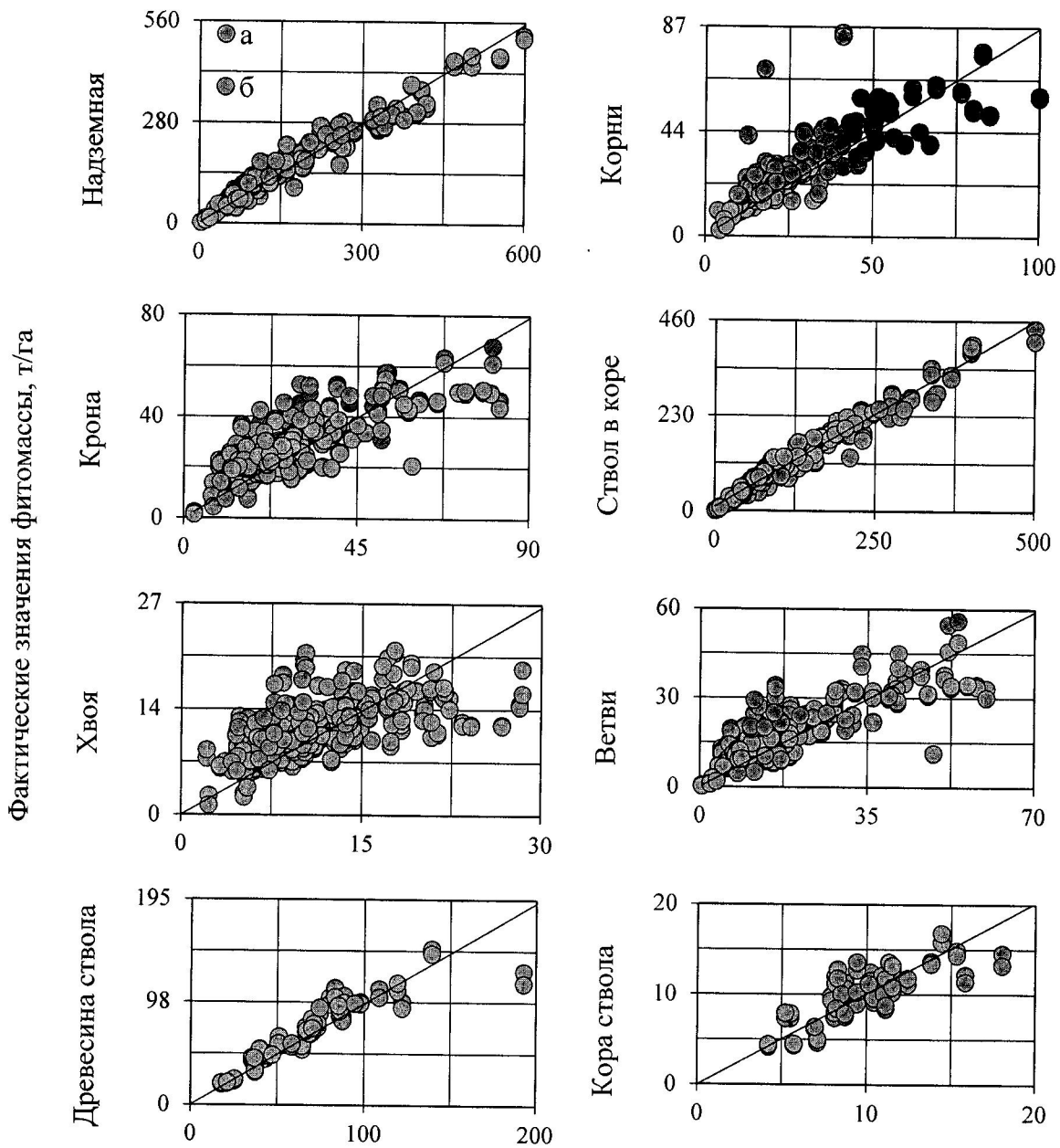
Проблема трансформации модели (1) в табличный вариант заключается в том, что мы можем задать только показатели возраста древостоя, температуры и осадков, а значения запаса и густоты могут быть введены в таблицу в виде расчетных величин, полученных системой вспомогательных рекурсивных уравнений, имеющих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

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

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

Результаты расчета (2) и (3) даны в табл. 4. Результаты табулирования уравнений в последовательности (2), (3) и (1) представляют довольно громоздкую таблицу. Мы взяли из неё показатели фракционного состава фитомассы пихтарников для возраста 100 лет и построили графики их зависимости от температуры и осадков (рис. 5).

Судя по графикам, все фракции фитомассы, за исключением массы кроны, изменяются по одной общей схеме, но в разных соотношениях: фитомасса пихтарников увеличивается во всех зональных поясах ( $Tm = +10 \dots -30^\circ\text{C}$ ) при повышении уровня осадков от 300 до 900 мм, и независимо от уровня осадков при повышении средней температуры января от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+10^\circ\text{C}$ . Это согласуется с увеличением относительного радиального прироста, обезличенного по породному составу, в бореальных лесах Канады по мере роста как среднегодовой температуры, так и годовичных осадков (рис. 6).



Расчетные значения фитомассы, т/га

Рис. 4. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчетом по исходным (а) и аддитивным (б) моделям фитомассы пихтовых древостоев.

Характеристика рекурсивной системы вспомогательных уравнений для массообразующих показателей пихтовых древостоев

Таблица 4

Массообразующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели				
	$N$	1,15E-13	$A^{-0,6440}$	$\exp[14,5818 (1/A)]$	-
$M$	2,16E-04	$A^{0,7545}$	$N^{-0,4294}$	$A^{0,0813 \ln(N)}$	$(Tm+40)^{2,0329}$
Продолжение таблицы 4					
Массообразующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели		$adjR^2$	SE	
$N$	$PRm^{5,9645}$	$(Tm+40)^{-1,4361 \ln(PRm)}$	0,529	2,32	
$M$	$PRm^{1,4592}$	$(Tm+40)^{-0,2410 \ln(PRm)}$	0,549	1,77	

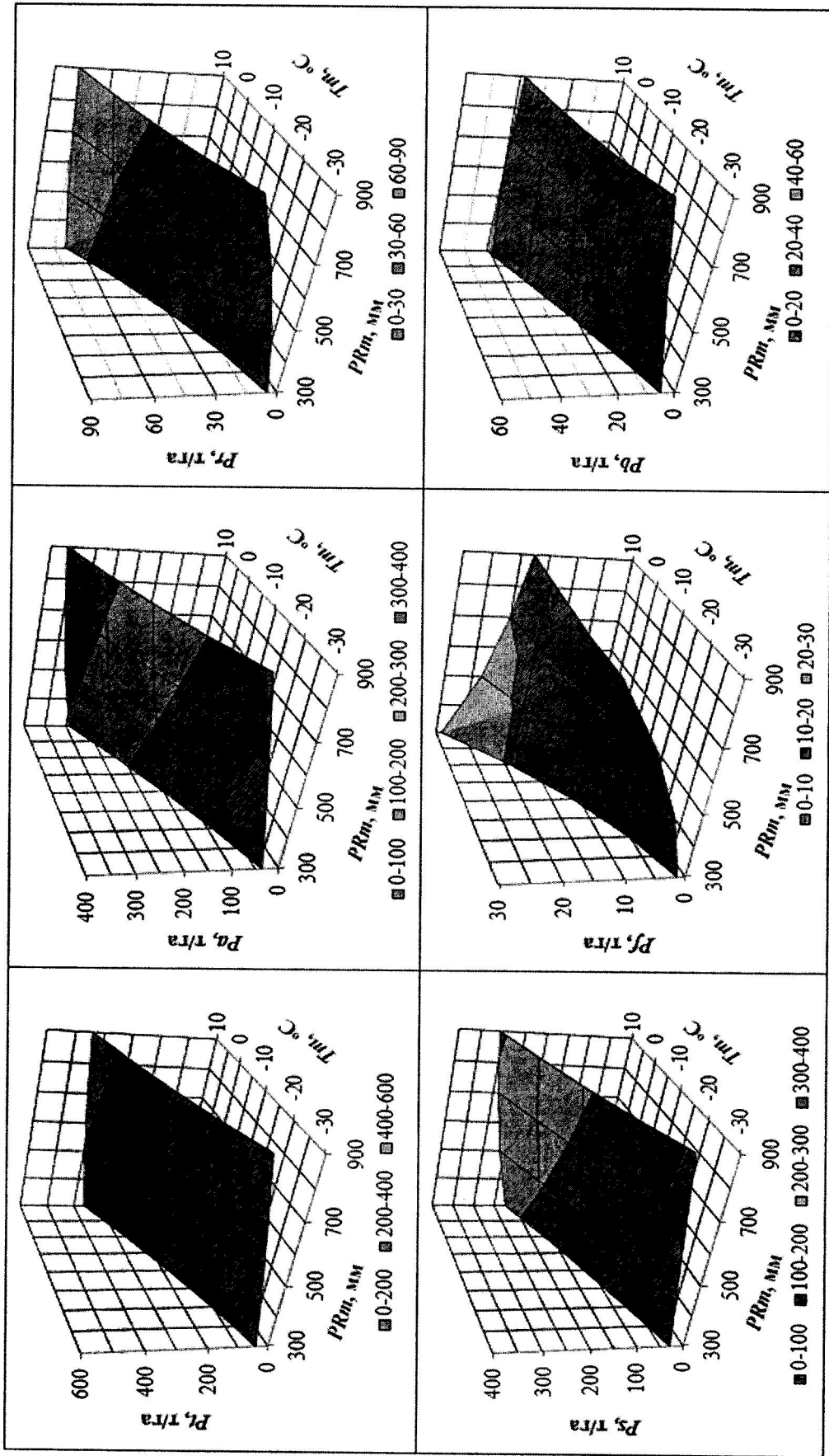


Рис. 5. Зависимость фитомассы пихтарников от среднегодовой температуры января ( $T_m$ ) и осадков ( $PR_m$ ). Обозначения:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_6$  – соответственно фитомасса общая, стволов, надземная, хвои, корней и ветвей, т/га.



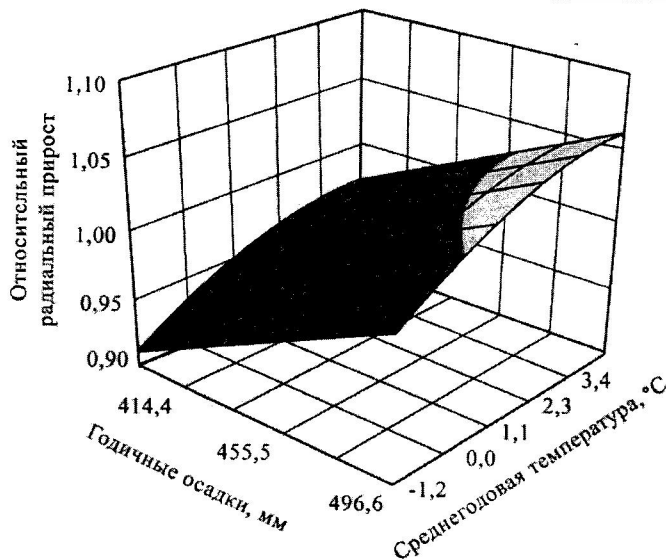


Рис. 6. Изменение относительного радиального прироста деревьев, обозначенных по породному составу, в бореальных лесах Канады в зависимости от среднегодовой температуры и осадков (Miao, Li, 2011).

Но масса ветвей и особенно хвои пихтарников в трансконтинентальных гидротермических градиентах изменяется иначе: если при повышении средней температуры января от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+10^{\circ}\text{C}$  она увеличивается независимо от уровня осадков, то при повышении

уровня осадков в тёплых поясах она снижается, а в холодных – увеличивается, причем последняя закономерность более четко выражена по массе хвои и менее очевидна – по массе ветвей.

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).

Полученные аддитивные модели фитомассы пихтовых древостоев 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, характеризуемой среднегодовой температурой января  $-10^{\circ}\text{C}$  и среднегодовыми осадками 400 мм, повышение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  при неизменном уровне осадков вызывает у пихтовых древостоев в возрасте 100 лет увеличение фитомассы всех фракций: общей, надземной, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 3,9; 3,8; 4,6; 3,8; 4,6 и 3,5 %. Для того же региона в таких же древостоях повышение осадков на 100 мм при неизменной среднегодовой температуре января вызывает увеличение фитомассы общей, надземной, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 12,5; 11,9; 15,3; 12,7; 1,4 и 1,9 %.

На рис. 7 показано изменение фитомассы древостоев ( $\Delta$ , %) при повышении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  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  $1^{\circ}\text{C}$  при разных территориальных (зональных) уровнях температур, обозначаемых как  $-30\Delta\dots+10\Delta$ . Рис. 7 демонстрирует общую закономерность увеличения, как общей, так и подземной фитомассы пихтовых древостоев при повышении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  во всех температурных зонах Евразии и во всех регионах, различающихся по уровню осадков.

На рис. 8 показано изменение фитомассы пихтовых древостоев ( $\Delta$ , %) 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  $300\Delta\dots800\Delta$ .

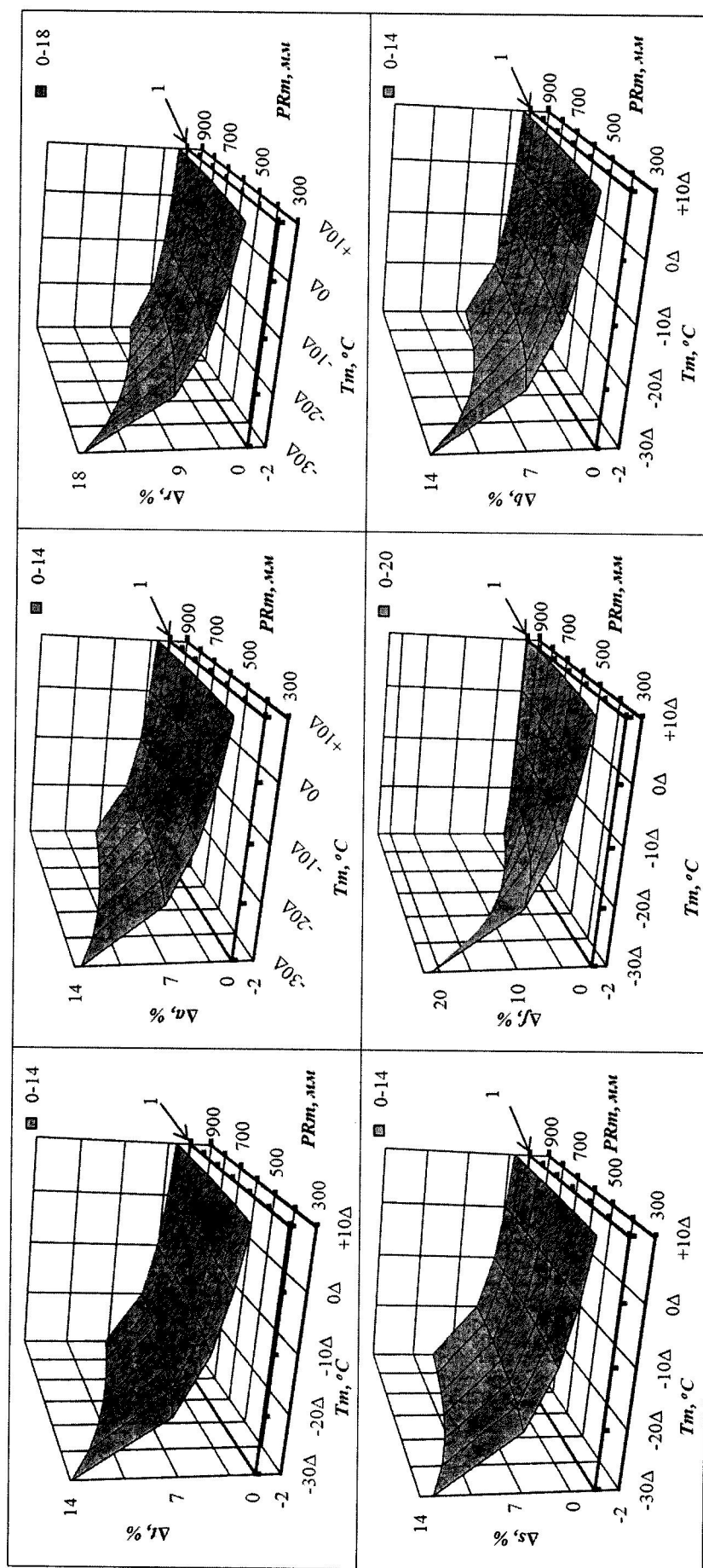


Рис. 7. Изменение фитомассы пихтовых древостоев при повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$  вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T_m$  – среднегодовая температура января,  $^\circ\text{C}$ ;  $PR_m$  – среднегодовой уровень осадков, мм. По осям ординат последовательно обозначены фракции фитомассы, изменяющейся при повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$  (%): общая  $\Delta b$ , надземная  $\Delta a$ , корней  $\Delta y$ , стволов  $\Delta s$ , хвои  $\Delta u$  и ветвей  $\Delta b$ . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы при предполагаемом повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$ .

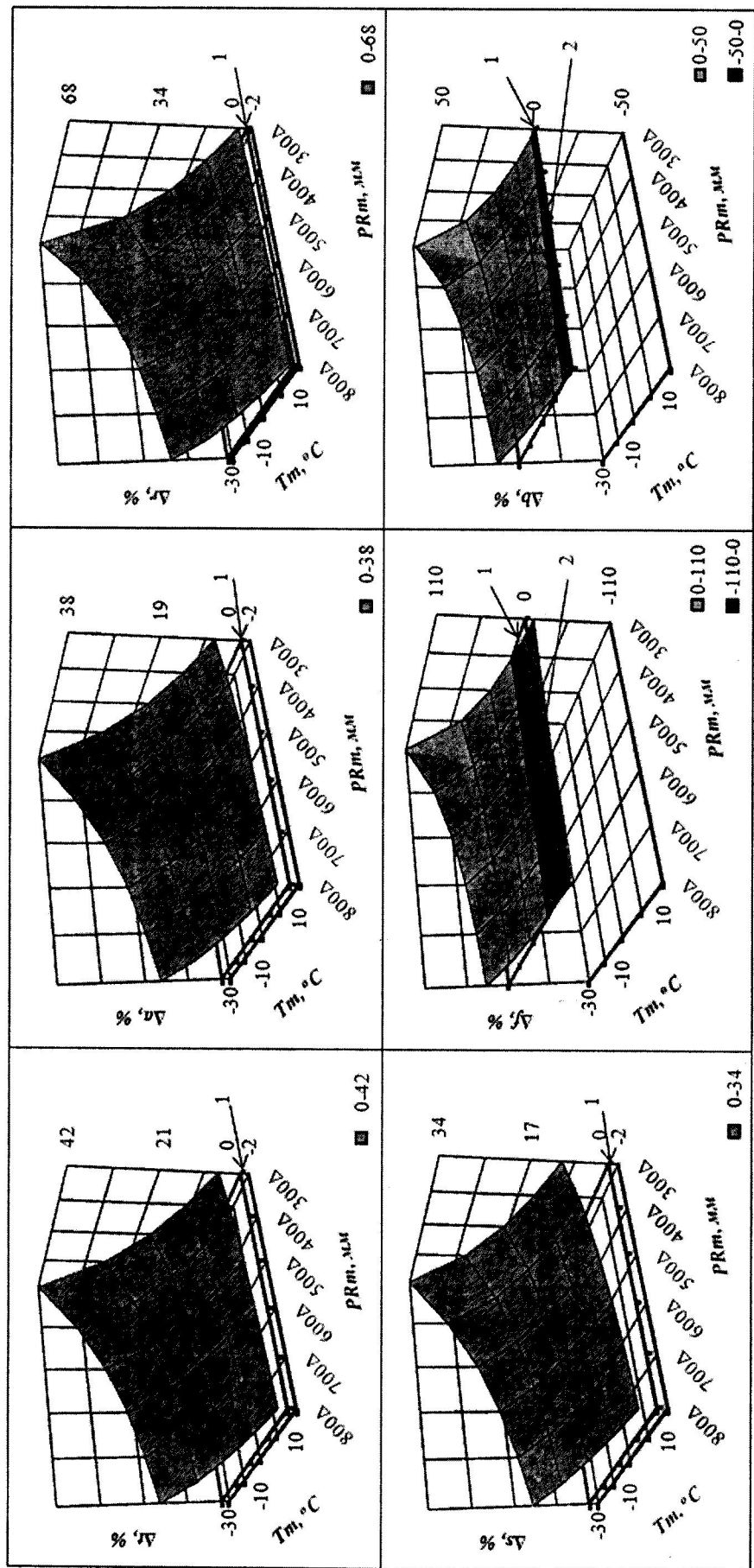


Рис. 8. Изменение фитомассы пихтовых древостоев при повышении уровня осадков на 100 мм вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T_m$  – среднегодовая температура января,  $^{\circ}C$ ;  $PR_m$  – среднегодовой уровень осадков, мм. По осям ординат последовательно обозначены фракции фитомассы, изменяющейся ( $\Delta$ , %) при увеличении осадков на 100 мм: общая  $\Delta t$ , надземная  $\Delta a$ , корней  $\Delta r$ , стволов  $\Delta s$ , хвои  $\Delta u$  и ветвей  $\Delta b$ . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы при предполагаемом увеличении осадков на 100 мм; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы ( $\Delta$ , %) при предполагаемом увеличении осадков на 100 мм.

**Рис. 8** демонстрирует общую закономерность увеличения, как общей, так и подземной фитомассы пихтовых древостоев при повышении осадков на 100 мм во всех температурных зонах Евразии и во всех регионах, различающихся по уровню осадков. Исключение составили закономерности для массы хвои и ветвей: в тёплых климатических поясах ( $T_m = 10^\circ\text{C}$ ) предполагается некоторое снижение их фитомассы независимо от существующего уровня осадков в регионах.

### Заключение

Таким образом, предпринята первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава фитомассы по трансевразийским гидротермическим градиентам на основе сформированной базы данных о её фактической структуре в 370 пихтовых древостоях, произрастающих на территории Евразии. Установлено, что все фракции фитомассы, за исключением массы кроны, изменяются по одной общей схеме, но в разных соотношениях: фитомасса пихтарников увеличивается во всех зональных поясах ( $T_m = +10 \dots -30^\circ\text{C}$ ) при повышении уровня осадков от 300 до 900 мм, и независимо от уровня осадков при повышении средней температуры января от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+10^\circ\text{C}$ . 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 масса хвои и ветвей пихтарников в трансконтинентальных гидротермических градиентах изменяется иначе: если при повышении средней температуры января от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+10^\circ\text{C}$  она увеличивается независимо от уровня осадков, то при повышении уровня осадков в тёплых поясах она снижается, а в холодных – увеличивается, причем последняя закономерность более четко выражена по массе хвои и менее очевидна – по массе ветвей.

При повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$  в разных экорегионах, характеризующихся разными соотношениями температуры и осадков, как масса корней, так и все фракции надземной фитомассы пихтарников закономерно увеличиваются в предположении, что уровень осадков не подвержен изменениям.

При увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах, характеризующихся разными соотношениями температуры и осадков, как масса корней, так и все фракции надземной фитомассы пихтарников также закономерно увеличиваются в предположении, что средняя температура января не подвержена изменениям. Исключение составили закономерности для массы хвои и ветвей: в тёплом климатическом поясе (субтропики Китая) предполагается некоторое снижение их фитомассы независимо от существующего уровня осадков в регионе.

Поскольку закономерности изменения продукционных показателей древостоев в разных регионах различаются, их изучение, по-видимому, необходимо проводить на региональной основе. Разработка подобных моделей для основных лесообразующих 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., Колчин К.В., Осмирко А.А., Часовских В.П. Фитомасса деревьев в елово-пихтовых лесах Евразии: аддитивные модели в климатических градиентах // Эко-потенциал. 2018а. № 3 (23). С. 67-79.

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

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.