

На правах рукописи



**Цепордей Иван Степанович**

**Биологическая продуктивность двухвойных сосен Евразии:  
аддитивные модели и биогеография**

06.03.02 - Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в ФГБУН «Ботанический сад  
Уральского отделения Российской академии наук»

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор Усольцев Владимир Андреевич;

Официальные оппоненты: Маленко Александр Анатольевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», кафедра лесного хозяйства, заведующий;  
Бергман Игорь Евгеньевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБУН Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН, лаборатория экотоксикологии популяций и сообществ, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН - обособленное подразделение ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН».

Защита состоится 18 декабря 2019 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» ([www.usfeu.ru](http://www.usfeu.ru)).

Автореферат разослан «\_11\_»\_ноября\_2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. с.-х. наук, доцент



Магасумова  
Альфия Гаптрауфовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Оценка углерододепонирующей способности лесного покрова как составная часть проблемы глобального потепления и его стабилизации путём снижения выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу является одним из наиболее приоритетных научных направлений последнего времени во всем мире, однако имеющиеся результаты неопределённые и довольно противоречивы. Поэтому исследования проблемы и перспектив её решения на основе современных научных достижений являются наиболее приоритетными.

В последние годы повышение корректности аллометрических уравнений фитомассы, на основе которых рассчитывается биопродуктивность лесного покрова, осуществляется, в частности, путём обеспечения аддитивности фитомассы по её фракционному составу (Parresol, 2001; Carvalho, 2003). Это означает, что суммарная фитомасса стволов, ветвей, хвои, корней, полученная по «фракционным» уравнениям, должна равняться значению, полученному по общему уравнению (Kugucz, 1969). Кроме того, осознаётся необходимость формирования мировых баз данных о фитомассе лесов с целью выявления на их основе глобальных закономерностей, сформулированная в понятии «эры больших массивов данных» (<http://www.gfbinitiative.org/symposium2017>) (Kudyba et al. 2014).

Настоящее исследование посвящено моделированию изменения аддитивной структуры биологической продуктивности двухвойных сосен (подрод *Pinus* L.) Евразии в связи с температурой воздуха и осадками.

**Степень разработанности темы исследования.** В последние годы после того, как для территории Евразии впервые сформированы базы данных о биопродуктивности деревьев и древостоев, были разработаны видоспецифичные модели ее изменения по градиентам природной зональности и континентальности климата (Усольцев, 2016а, б), мало пригодные для прогноза динамики биопродуктивности в связи с изменением климата, в частности, температуры воздуха и осадков, а имеющиеся в литературе результаты подобных исследований либо имеют региональный характер, либо не связаны с морфологией лесов.

Диссертация является законченным научным исследованием.

**Цель диссертационной работы** - изучение изменений фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен в связи с температурой и осадками на территории Евразии на уровне аддитивных регрессионных моделей.

В связи с поставленной целью конкретные задачи исследования следующие:

- выполнить анализ состояния проблемы биологической продуктивности лесов в связи с изменениями климата;
- разработать систему прогнозирования аддитивной структуры фитомассы деревьев двухвойных сосен при изменении средней температуры января и среднегодовых осадков;
- разработать систему прогнозирования аддитивной структуры фитомассы древостоев двухвойных сосен при изменении средней температуры января и среднегодовых осадков;

- разработать систему прогнозирования относительных (безразмерных) показателей фитомассы древостоев двухвойных сосен при изменении средней температуры января и среднегодовых осадков.

**Научная новизна.** Впервые на примере двухвойных сосен в их евразийском ареале разработана система эмпирического прогнозирования аддитивной структуры фитомассы деревьев и древостоев и относительных её показателей в связи с зимними температурами и среднегодовыми осадками.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что на основе разработанных эмпирических моделей фитомассы двухвойных сосен можно оценивать ее возможные изменения в связи с изменением средней температуры января и среднегодовых осадков на территории Евразии. Они могут быть использованы также при оценке углерододепонирующей функции и углеродного баланса сосновых лесов Евразии.

**Методология и методы исследования.** В основу исследования положен многофакторный анализ фитомассы на основе эмпирических регрессионных зависимостей.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты транс-евразийского моделирования аддитивной структуры биопродукционных показателей по принципу пропорционального взвешивания;

- система многофакторных регрессионных моделей и закономерностей, описывающих изменение аддитивной структуры фитомассы деревьев и древостоев и относительных (безразмерных) показателей фитомассы двухвойных сосен в связи с изменениями средней температуры января и среднегодовых осадков на территории Евразии.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность выводов и предложений определена содержательным анализом объектов исследования и применением современных IT-технологий.

Все виды работ по теме диссертации выполнены автором или при его участии.

Основные результаты исследований апробированы на международных научных конференциях «Computer Systems, Applications and Software Engineering» (Nizhniy Tagil, Russia, 2018); международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (Тамбов, 2018); международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки» (Тамбов, 2018); международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки» (Томск, 2018); всероссийской научно-технической конференции «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2019); международной научно-практической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» (Екатеринбург, 2019).

Основное содержание диссертации изложено в 27 печатных работах, в том числе 3 статьи, индексируемые в Scopus, 1 статья, индексируемая в WoS, и 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 240 страницах, включает в себя введение, 5 глав, заключение, список литературы и 3 приложения. Содержит 12 таблиц и 19 рисунков. В список литературных источников вошли 258 наименований, в том числе 139 на иностранных языках.

## **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Дано описание эколого-географических особенностей распространения двухвойных сосен (подрод *Pinus*) в пределах Евразии. Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием структуры фитомассы деревьев и древостоев. Выполненный анализ литературы по моделированию биологической продуктивности деревьев и древостоев в биогеографических градиентах выявил большое варьирование и неопределённость имеющихся результатов, показал наличие как некоторых общих для всех древесных пород закономерностей, так и взаимно исключающих трендов, объяснить которые на уровне ранее применяемых методологий не представляется возможным. Одна из причин может состоять в том, что биогеографический анализ биопродуктивности деревьев и древостоев выполнялся в градиентах природной зональности и континентальности климата, к числу недостатков которых относится кодирование природных зон числами натурального ряда, а также корреляция индекса континентальности с природной зональностью. Кроме того, эмпирические модели, разработанные на их основе, не сопрягаются с наблюдаемыми изменениями глобальных температур и осадков. Существенные неопределенности и противоречия выявлены также в установленных взаимосвязях фитомассы деревьев и древостоев с температурой воздуха и осадками. Противоречивые результаты получены даже в пределах одного региона, влияние же температур и осадков на фитомассу деревьев и древостоев отдельных древесных видов (родов) в трансевразийских климатических градиентах по сей день неизвестно, поскольку имеющиеся сведения отрывочны и противоречивы.

## **ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Сформирована база подеревных данных двухвойных сосен (подрод *Pinus*), которая включает 1520 и 580 модельных деревьев соответственно из естественных и искусственных насаждений (всего 2100) с определениями фитомассы (кг), полученными на 320 пробных площадях (Усольцев, 2016). Кроме того, сформированы две базы данных для древостоев двухвойных сосен Евразии с определениями на пробных площадях: одна с данными фитомассы, другая – с данными чистой первичной продукции (ЧПП) и фитомассы (т/га), первая из которых состоит из 2460 определений, в том числе 1480 – в естественных насаждениях и 980 – в культурах, а база данных о годичной ЧПП и фитомассе сосняков включает в себя 920 определений, из которых 75 % – в естественных насаждениях и

25 % – в культурах. Их основу составляют опубликованные В.А. Усольцевым (2010) данные с некоторыми нашими дополнениями. В основу исследования положен системный подход в виде его простейшей реализации – метода многофакторных регрессионных зависимостей. В некоторых главах они представлены в виде рекурсивной системы, согласно которой независимые переменные предыдущего выступают в последующих уравнениях в роли зависимых переменных (Дрейпер, Смит, 1973).

### ГЛАВА 3. ФИТОМАССА ДЕРЕВЬЕВ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН ЕВРАЗИИ: АДДИТИВНЫЕ МОДЕЛИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ

Каждая пробная площадь, на которой было выполнено определение фитомассы деревьев, позиционирована относительно изолиний средней температуры января (рис. 3.1) и относительно изолиний среднегодовых осадков (рис. 3.2), и составлена матрица исходных данных, в которой значения фитомассы фракций и таксационные показатели деревьев соотнесены с соответствующими значениями средней температуры января и среднегодовых осадков, включенная затем в процедуру регрессионного анализа.

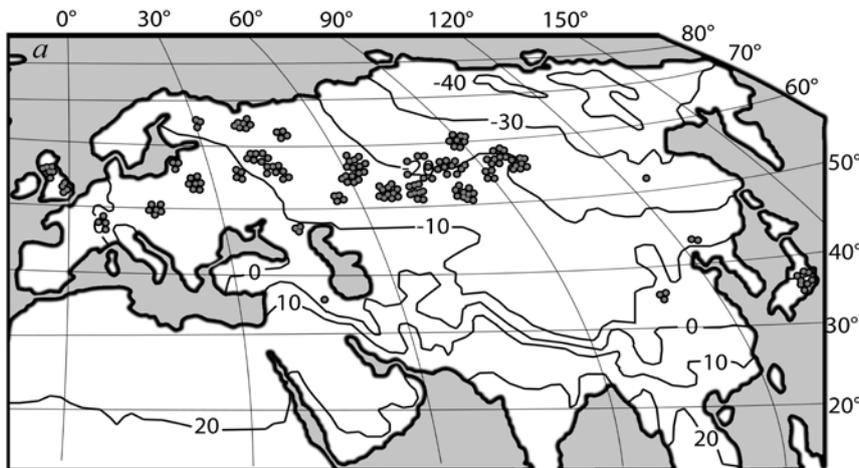


Рис. 3.1. Распределение экспериментальных данных о фитомассе сосновых деревьев на карте-схеме средней температуры января, °С (показана цифрами) (World Weather Maps, 2007).

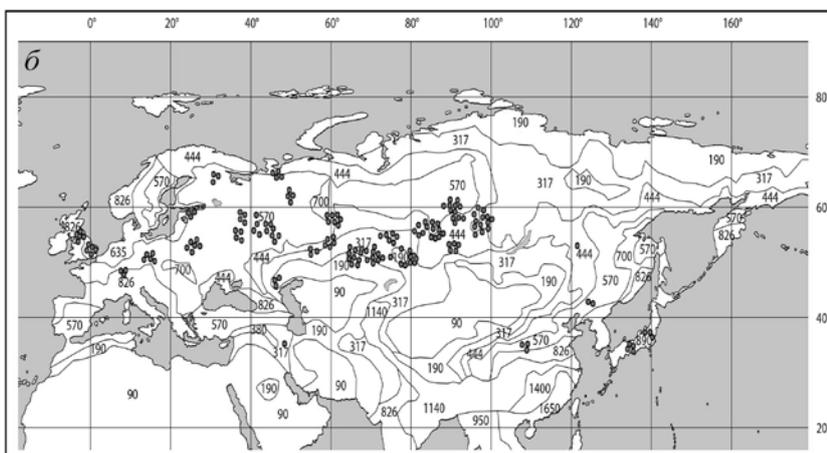


Рис. 3.2. Распределение экспериментальных данных о фитомассе сосновых деревьев на карте-схеме среднегодовых осадков, мм (показаны цифрами) (World Weather Maps, 2007).

Рассчитаны исходные регрессионные уравнения:

$$\ln P_i = a_{0i} + a_{1i}(\ln d) + a_{2i}(\ln h) + a_{3i}(\ln d)(\ln h) + a_{4i}X + a_{5i}[\ln(T+40)] + a_{6i}[\ln(T+40)]^2 + a_{7i}(\ln PR) + a_{8i}(\ln PR)^2 + a_{9i}[\ln(T+40)] \cdot (\ln PR), \quad (3.1)$$

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 естественных сосняков ( $X = 0$ ) и культур сосны ( $X = 1$ );  $T$  – средняя температура января, °C;  $PR$  – среднегодовые осадки, мм. В качестве температурного предиктора принята средняя температура января, поскольку зимние температуры более чувствительны к изменениям климата (Laing, Vinyamin, 2013).

Путем подстановки регрессионных коэффициентов полученных исходных уравнений в структуру аддитивной модели, представленную по трехшаговой схеме пропорционального взвешивания, получили трансконтинентальную аддитивную модель, описывающую зависимость фракционного состава фитомассы деревьев от температуры и осадков. Из табличной формы модели взяты значения фитомассы и построены соответствующие графики (рис. 3.3).

Прослеживается закономерность, единая для фитомасс общей, надземной, стволов и корней: в холодных поясах увеличение осадков приводит к снижению фитомассы, а в теплых – к ее увеличению. Соответственно во влагообеспеченных районах повышение температуры вызывает увеличение фитомассы, а в засушливых – ее снижение. Полученная «пропеллеро-образная» закономерность подтверждена другими исследованиями регионального уровня (Глебов, Литвиненко, 1976; Молчанов, 1976; Поликарпов, Чебакова, 1982). На рис. 3.4 показано изменение фитомассы деревьев ( $\Delta$ , %) при повышении температуры на 1°С в разных экорегионах, характеризующихся разными соотношениями температуры и осадков. При этом предполагается, что осадки изменяются только территориально, а температура в результате предполагаемого изменения климата повышается на 1°С при разных территориальных уровнях температур, обозначаемых как  $-30\Delta \dots +10\Delta$ . Получена общая закономерность евразийского масштаба: в холодных и достаточно влагообеспеченных климатических поясах повышение температуры при неизменном количестве осадков вызывает увеличение фитомассы всех фракций, а в теплых климатических поясах с низким уровнем осадков – ее снижение. На рис. 3.5 показано изменение фитомассы деревьев ( $\Delta$ , %) 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  $300\Delta \dots 800\Delta$ . Установлена общая трансконтинентальная закономерность: в теплых климатических поясах с низким уровнем осадков повышение уровня осадков при неизменной средней температуре января вызывает увеличение фитомассы всех фракций, а в холодных и достаточно влагообеспеченных климатических поясах – ее снижение.

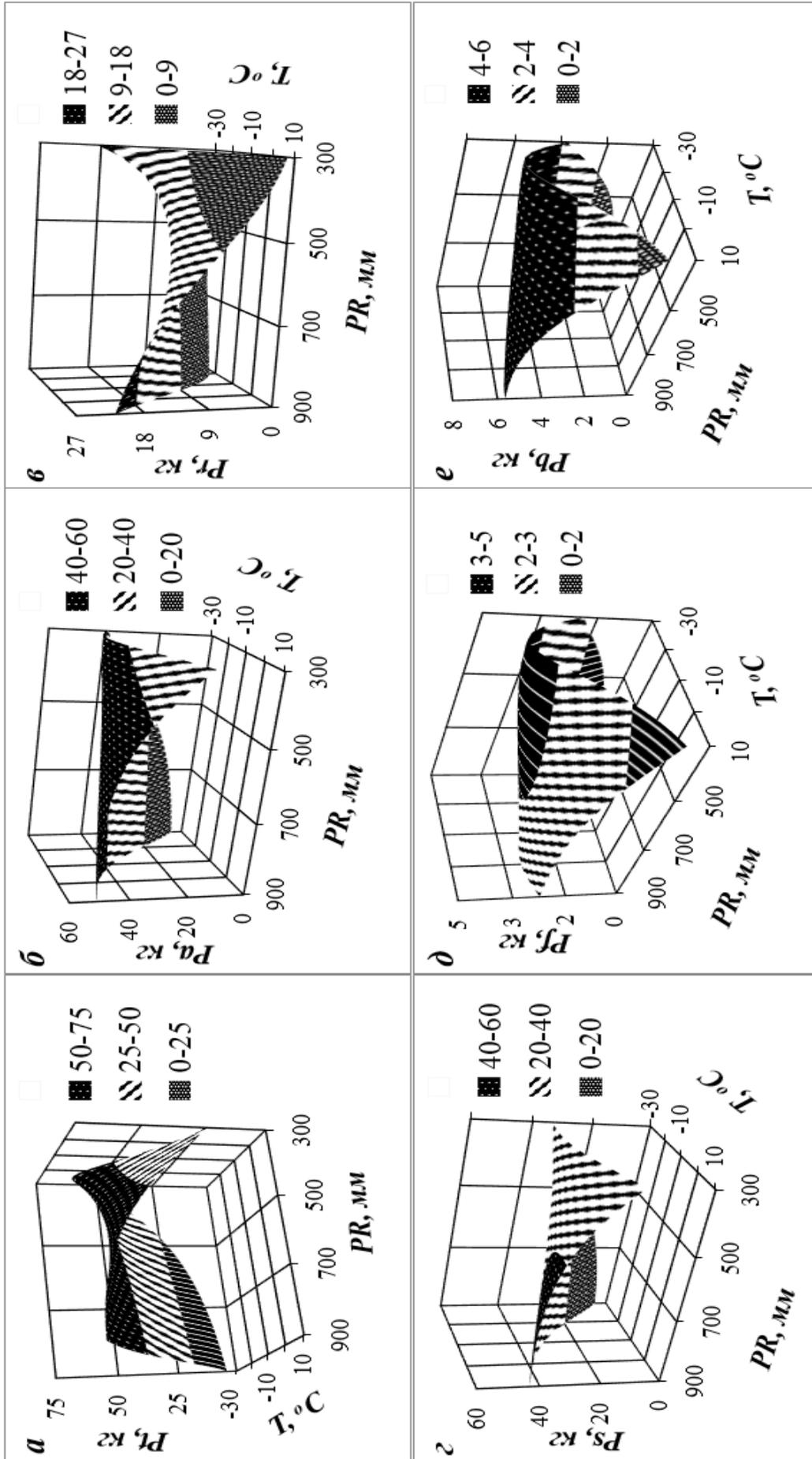


Рис. 3.3. Зависимость фитомассы деревьев естественных сосняков Евразии ( $X = 0$ ) для  $d = 14$  см и  $h = 12$  м от средней температуры января ( $T$ ) и осадков ( $PR$ ). Обозначения:  $P_t$ ,  $P_a$ ,  $P_r$ ,  $P_s$ ,  $P_f$ ,  $P_b$ ,  $P_{b_1}$  – соответственно фитомасса общая, надземная, корней, ствола, хвои и ветвей, кг.

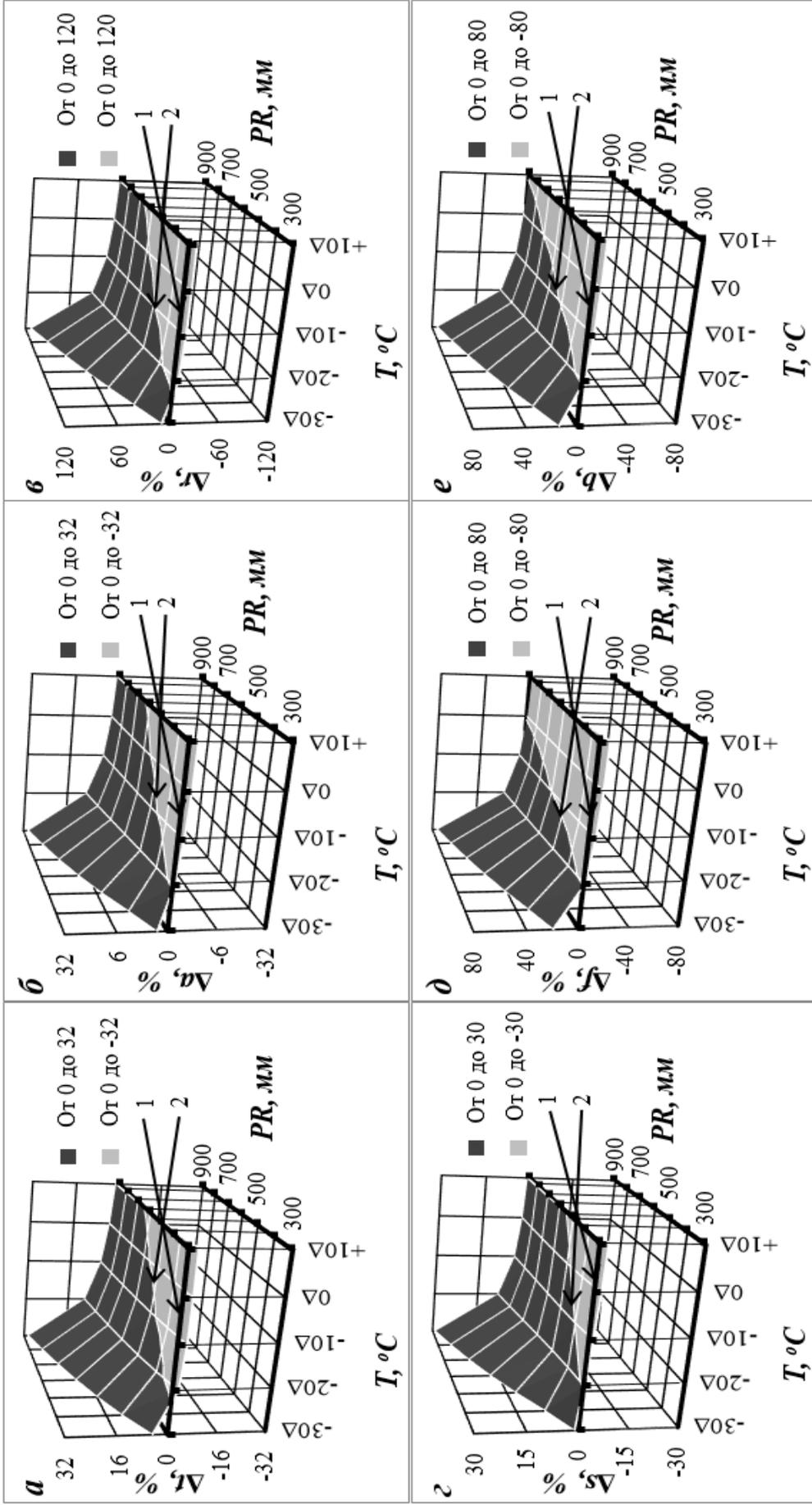


Рис. 3.4. Изменение фитомассы деревьев при повышении температуры на 1°С вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T$  – средняя температура января, °С;  $PR$  – среднегодовой уровень осадков, мм. Буквами от **a** до **е** обозначены фракции фитомассы (%): общая  $\Delta t$ , надземная  $\Delta a$ , корней  $\Delta r$ , стволов  $\Delta s$ , хвои  $\Delta f$  и ветвей  $\Delta b$ . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы ( $\Delta$ , %).

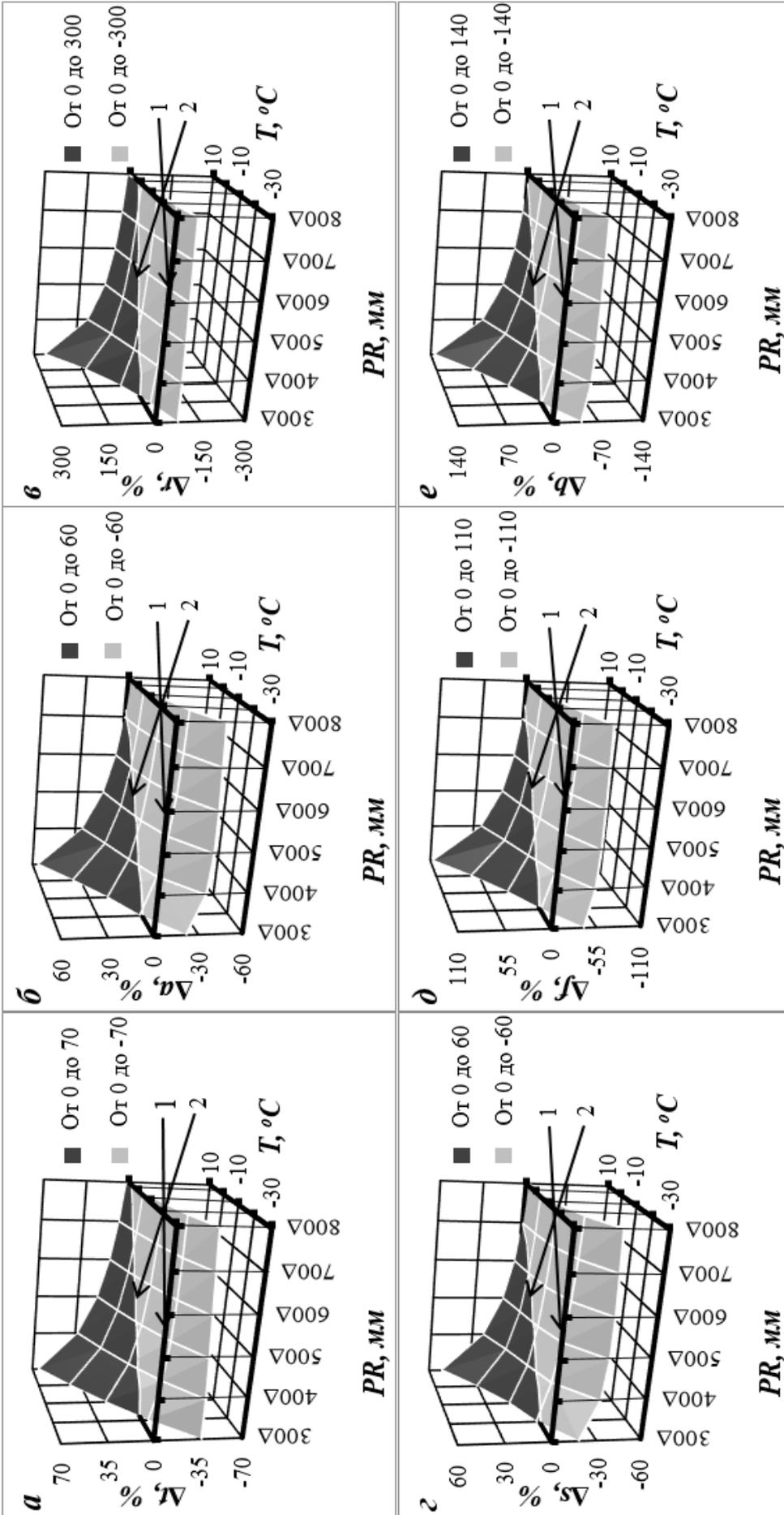


Рис. 3.5. Изменение фитомассы деревьев при повышении уровня осадков на 100 мм вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T$  – средняя температура января, °C;  $PR$  – среднегодовой уровень осадков, мм. Буквами от **a** до **e** обозначены фракции фитомассы (%): общая  $\Delta_t$ , надземная  $\Delta_a$ , корней  $\Delta_r$ , стволов  $\Delta_s$ , хвой  $\Delta_f$  и ветвей  $\Delta_b$ . 1 – плюскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы ( $\Delta$ , %).

#### ГЛАВА 4. ФИТОМАССА ДРЕВОСТОЕВ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН ЕВРАЗИИ: АДДИТИВНЫЕ МОДЕЛИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ

Каждая пробная площадь, на которой было выполнено определение фитомассы древостоев, позиционирована относительно изолиний средней температуры января и относительно изолиний среднегодовых осадков по аналогии с рис. 3.1 и 3.2, и составлена матрица исходных данных, в которой значения фракций фитомассы и таксационные показатели древостоев соотнесены с соответствующими значениями средней температуры января и среднегодовых осадков, включенная затем в расчет регрессионных уравнений, имеющих общий вид:

$$\ln P_i = a_{0i} + a_{1i}(\ln A) + a_{2i}(\ln A)^2 + a_{3i}(\ln M) + a_{4i}(\ln N) + a_{5i}X + a_{6i}[\ln(Tm+40)] + a_{7i}[\ln(Tm+40)]^2 + a_{8i}(\ln PRm) + a_{9i}(\ln PRm)^2 + a_{10i}[\ln(Tm+40)] \cdot (\ln PRm), \quad (4.1)$$

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 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 естественных сосняков ( $X = 0$ ) и культур сосны ( $X = 1$ );  $PRm$  – среднегодовые осадки, мм;  $Tm$  – средняя температура января, °С. Для табулирования модели (4.1) рассчитаны вспомогательные зависимости:

$$N = f[A, X, (Tm+40), PRm], \quad (4.2)$$

$$M = f[A, N, X, (Tm+40), PRm] \quad (4.3)$$

и после табулирования всей рекурсивной системы в последовательности (4.2), (4.3) и (4.1) для возраста 100 лет построены соответствующие графики (рис. 4.1). На их основании можно заключить, что фитомасса как деревьев, так и древостоев двухвойных сосен изменяется в трансконтинентальных градиентах температуры и осадков по одной и той же «пропеллеро-образной» схеме, подтверждающей ранее выявленные закономерности на локальном и региональном уровнях (Молчанов, 1976; Глебов, Литвиненко, 1976; Поликарпов, Чебакова, 1982). Для культур сосны названные закономерности сохраняются, но в абсолютных показателях фитомасса культур выше: общая, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 16, 11, 18, 2 и 3 %. На рис. 4.2 показано изменение фитомассы ( $\Delta$ , %) при повышении температуры на 1°С в разных экорегионах, характеризующихся разными соотношениями температуры и осадков: в холодных и недостаточно влагообеспеченных климатических поясах повышение температуры при неизменном количестве осадков вызывает снижение фитомассы всех фракций, а в остальных регионах – ее увеличение. На рис. 4.3 показано изменение фитомассы древостоев ( $\Delta$ , %) при увеличении осадков на 100 мм в разных экорегионах: в теплых климатических поясах с низким уровнем осадков возрастание осадков при неизменной средней температуре января вызывает увеличение фитомассы всех фракций, а в остальных регионах – ее снижение.

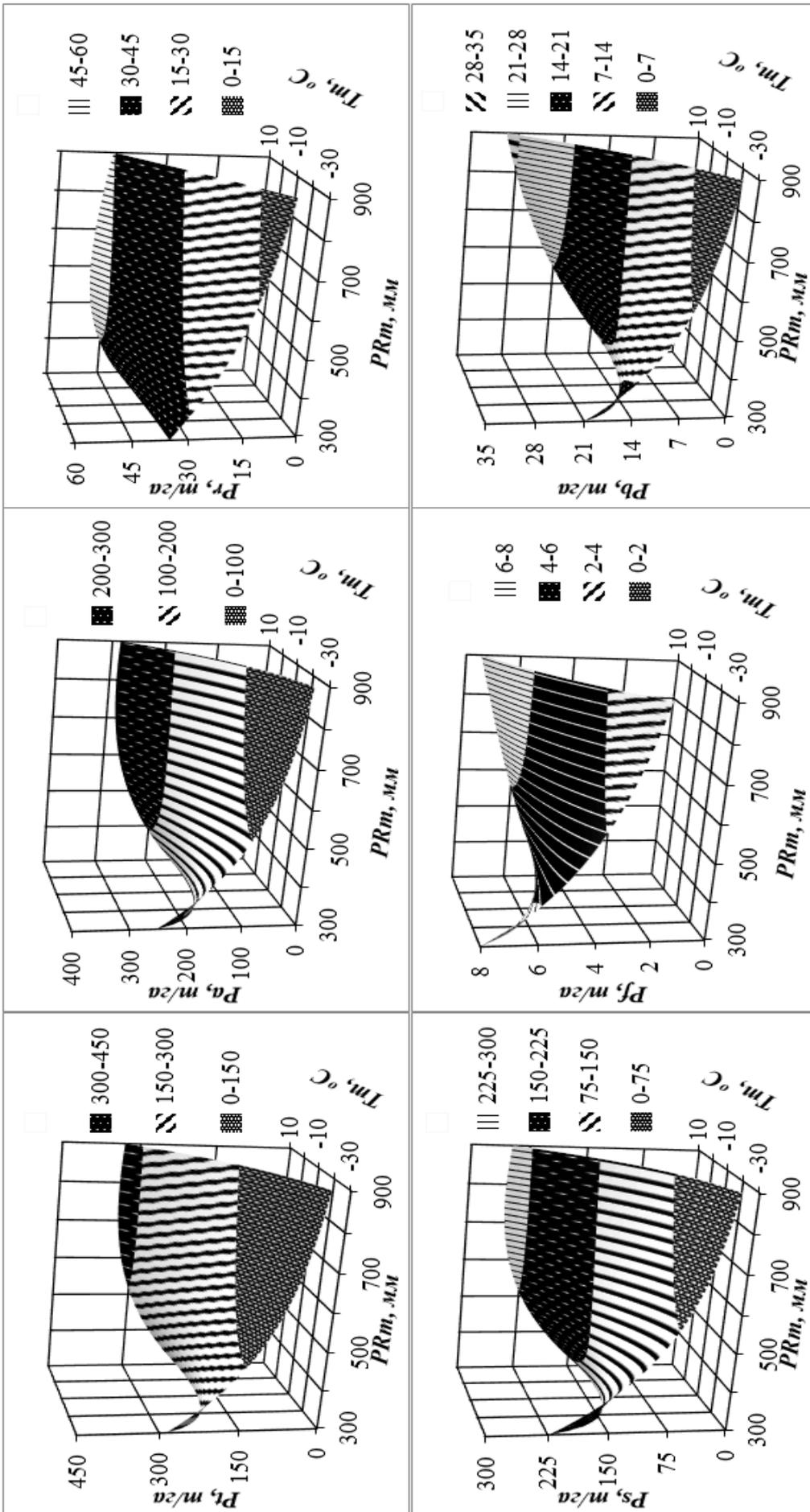


Рис. 4.1. Зависимость фитомассы естественных сосняков Евразии от средней температуры ( $T_m$ ) и среднегодовых осадков ( $PR_m$ ). Обозначения:  $P_t$ ,  $P_s$ ,  $P_a$ ,  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_b$  – соответственно фитомасса общая, стволов, надземная, хвои, корней и ветвей, т/га.

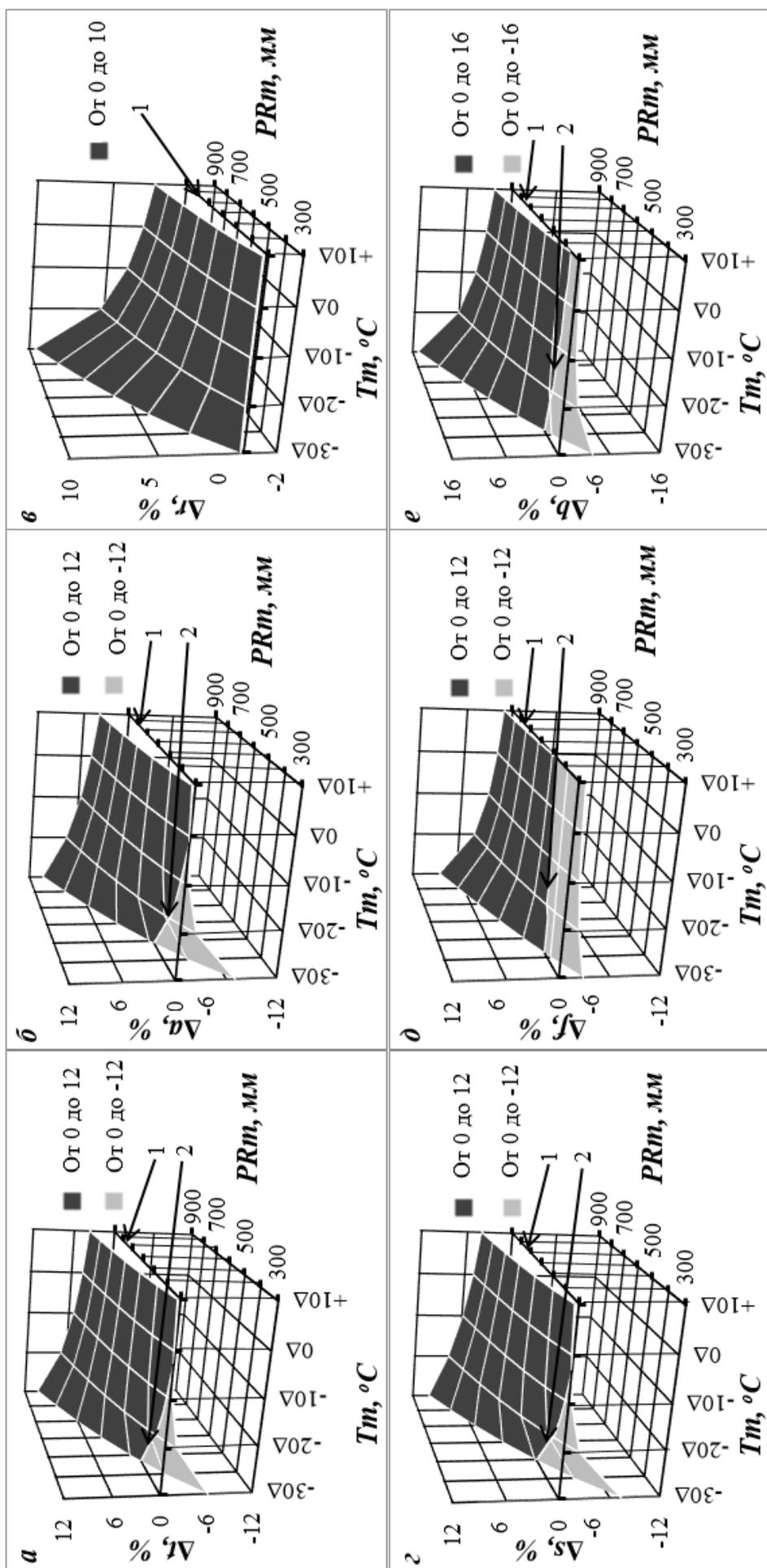


Рис. 4.2. Изменение фитомассы древостоев при повышении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T_m$  – средняя температура января,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $PR_m$  – среднегодовой уровень осадков, мм. Буквами от *a* до *e* обозначены фракции фитомассы (%): общая  $\Delta t$ , надземная  $\Delta_a$ , корней  $\Delta_r$ , стволов  $\Delta_s$ , хвои  $\Delta_f$  и ветвей  $\Delta_b$ . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы ( $\Delta$ , %).

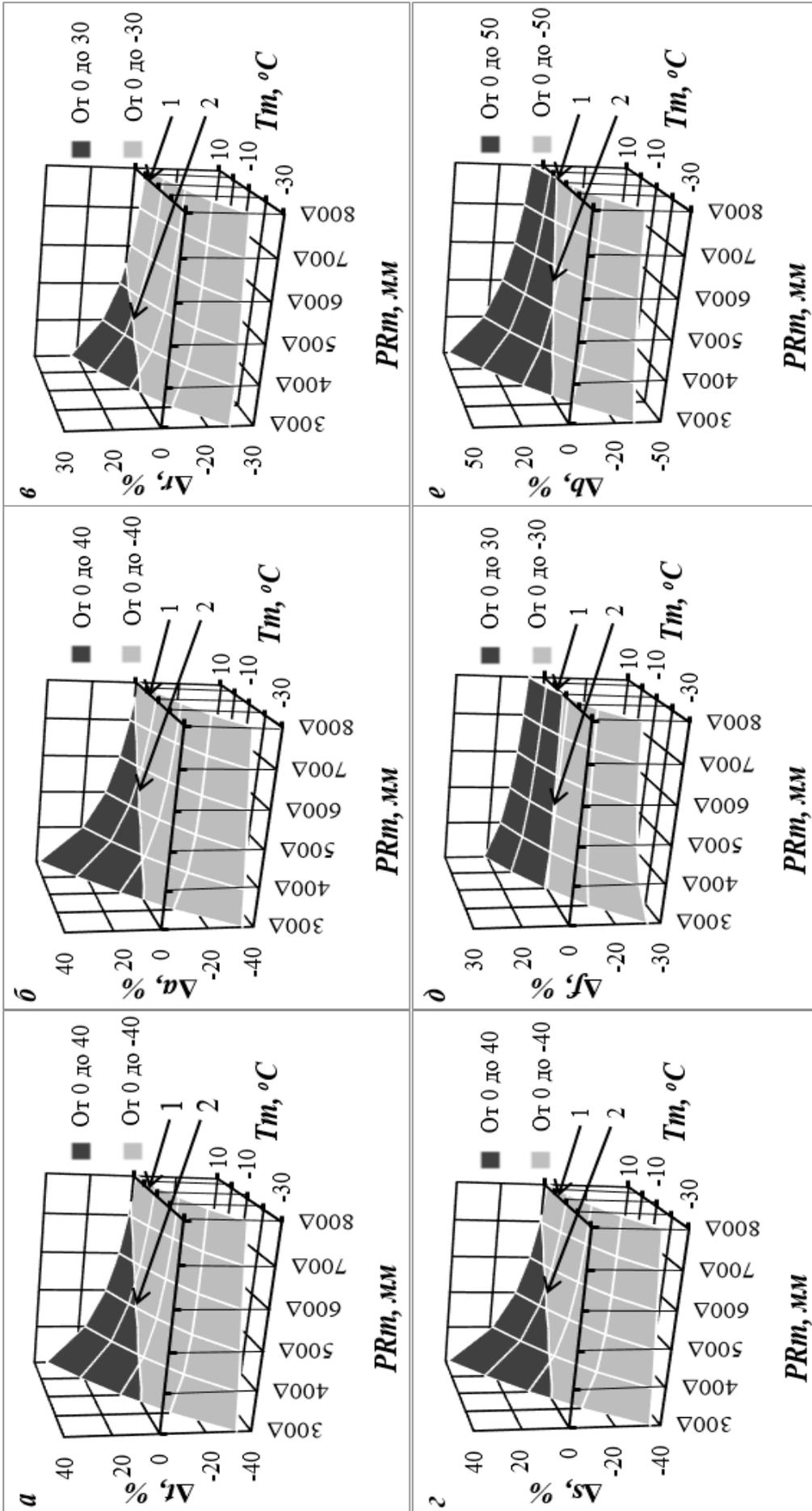


Рис. 4.3. Изменение фитомассы древостоев при повышении уровня осадков на 100 мм вследствие предполагаемого изменения климата при разных территориальных уровнях температур и осадков.  $T_m$  – средняя температура января, °C;  $PR_m$  – среднегодовой уровень осадков, мм. Буквами от *a* до *з* обозначены фракции фитомассы (%): общая  $\Delta t$ , надземная  $\Delta a$ , корней  $\Delta r$ , стволов  $\Delta s$ , хвои  $\Delta f$  и ветвей  $\Delta b$ . 1 – плоскость, соответствующая нулевому изменению фитомассы; 2 – линия разграничения положительных и отрицательных изменений фитомассы ( $\Delta$ , %).

## ГЛАВА 5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ (БЕЗРАЗМЕРНЫЕ) ПОКАЗАТЕЛИ ФИТОМАССЫ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ

В тех же трансконтинентальных градиентах температуры и осадков построены модели изменения удельной чистой первичной продукции (УдЧПП) как отношения ЧПП к фитомассе (рис. 5.1), продуктивности ассимиляционного аппарата (ПАА) как отношения ЧПП к массе хвои (рис. 5.2), отношения подземной фитомассы к надземной (ОПН) (рис. 5.3) и отношения фитомасс нижнего и древесного ярусов (ОНД) (рис. 5.4). Закономерности, полученные по изменению УдЧПП общей и подземной фитомассы, оказались прямо противоположными тем, что были получены для фитомассы, а именно: в холодных поясах увеличение осадков приводит не к снижению, а к увеличению УдЧПП, а в теплых – напротив, не к увеличению, а к снижению. Повышение температуры в засушливых условиях вызывает увеличение УдЧПП тех же фракций, а по мере повышения влагообеспеченности ее зависимость от температуры постепенно исчезает. Независимо от уровня осадков, зависимость УдЧПП надземной фитомассы и нижнего яруса от температуры выражена колоколообразной кривой. ПАА изменяется по такой же «пропеллеро-образной» схеме, что и фитомасса всех фракций древостоя, как и ОПН. Но в последнем случае зависимость ОПН по осям координат прямо противоположная (зеркальная). Связь ОНД с температурой описывается колоколообразной поверхностью.

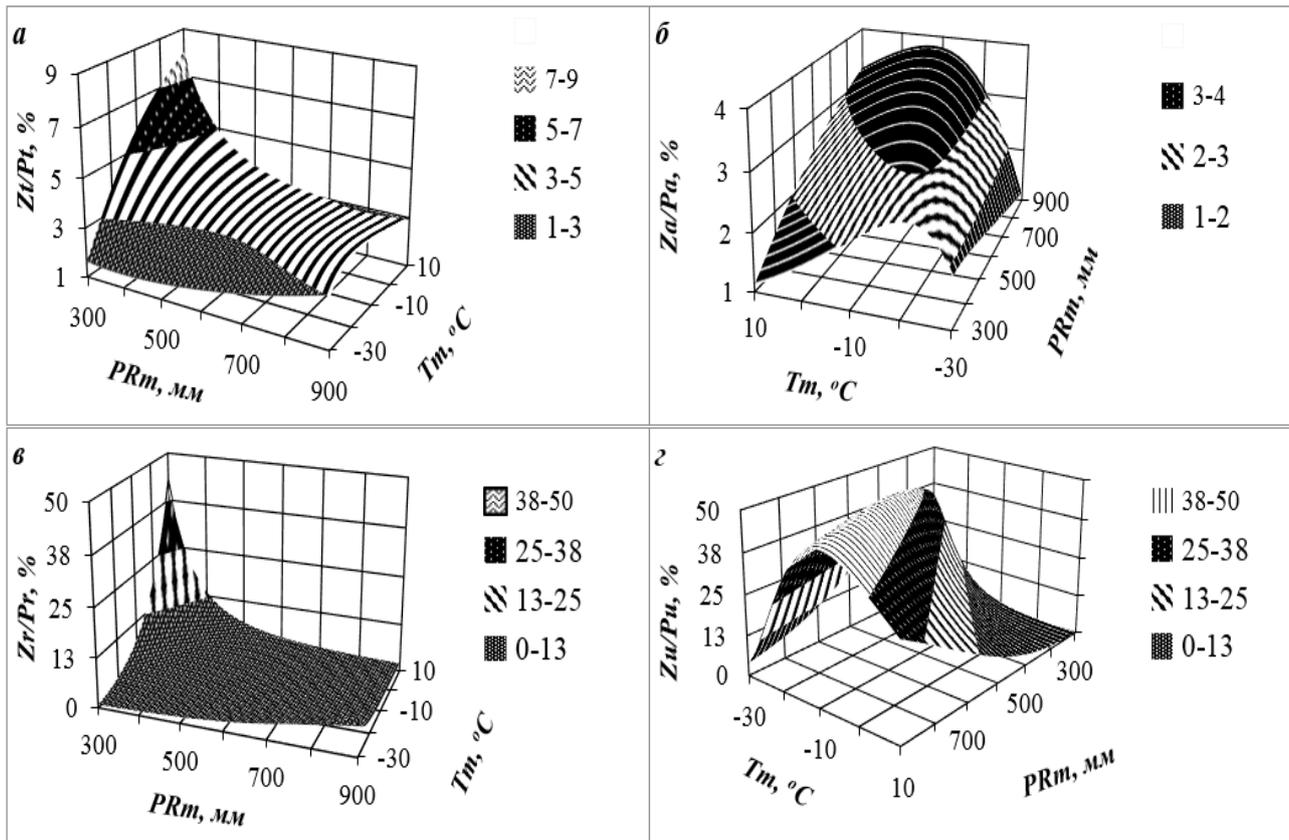


Рис. 5.1. Зависимость УдЧПП естественных сосняков Евразии в возрасте 100 лет от средней температуры января ( $T_m$ ) и среднегодовых осадков ( $PR_m$ ) для фитомассы общей (а), надземной (б), корней (в) и нижнего яруса (з), %.

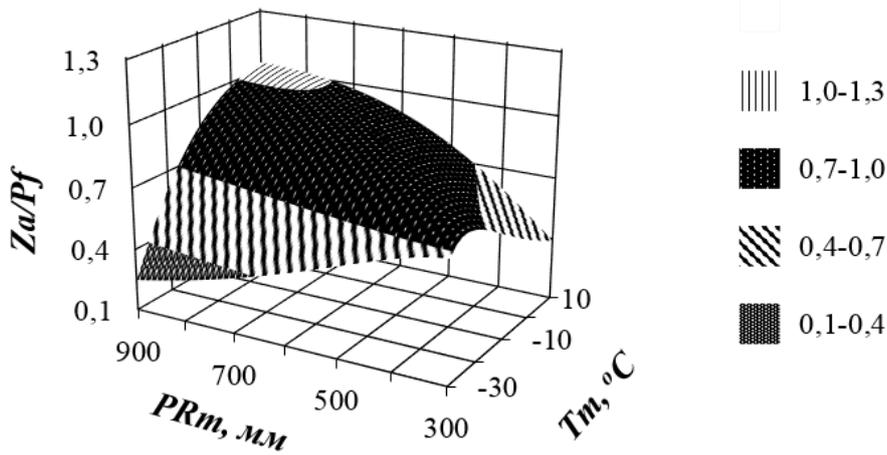


Рис. 5.2. Зависимость продуктивности ассимиляционного аппарата (ПАА) сосняков в возрасте 100 лет от средней температуры января ( $Tm$ ) и среднегодовых осадков ( $PRm$ ) на территории Евразии.

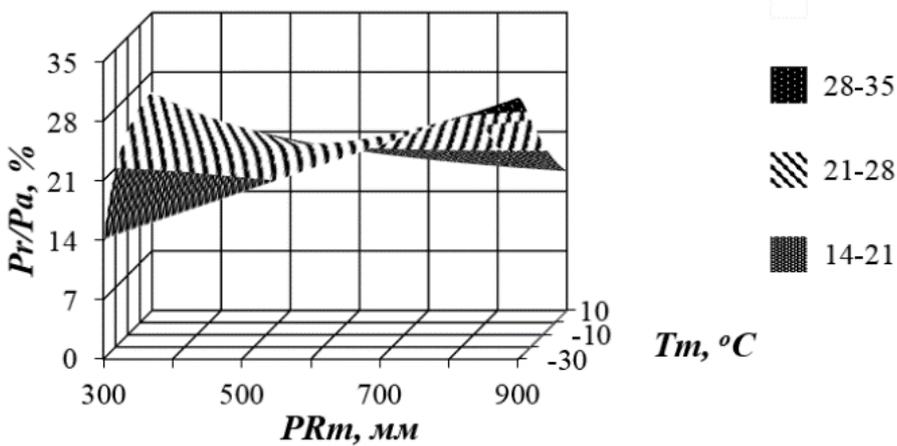


Рис. 5.3. Зависимость ОПН сосняков в возрасте 100 лет от средней температуры января ( $Tm$ ) и среднегодовых осадков ( $PRm$ ) на территории Евразии.

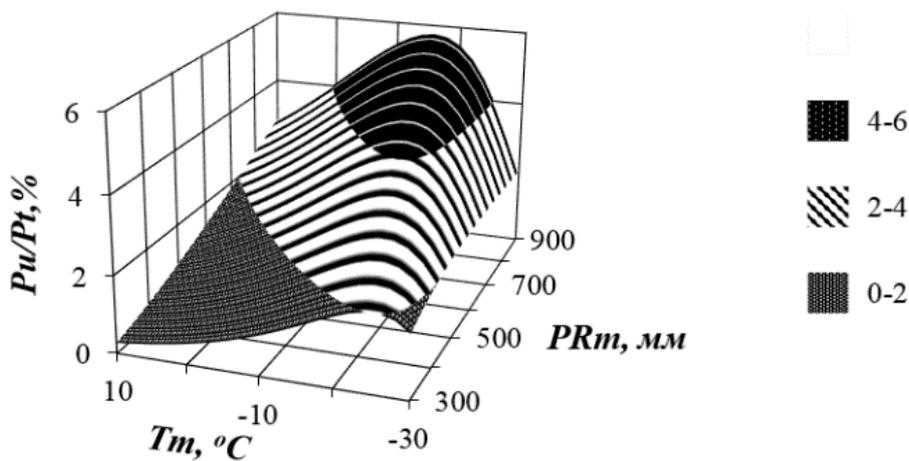


Рис. 5.4. Зависимость ОНД сосняков в возрасте 100 лет от средней температуры января ( $Tm$ ) и среднегодовых осадков ( $PRm$ ) на территории Евразии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Моделирование изменений аддитивного фракционного состава фитомассы на уровнях деревьев и древостоев двухвойных сосен по трансевразийским градиентам температур и осадков показало, что в холодных климатических поясах увеличение осадков приводит к снижению фитомассы большинства фракций, а в теплых – к ее увеличению. Соответственно во влагообеспеченных районах повышение температуры вызывает увеличение фитомассы, а в засушливых – ее снижение. Геометрическая интерпретация полученной закономерности представлена «пропеллеро-образной» поверхностью, подтверждающей ранее установленные закономерности других авторов на локальном и региональном уровнях.

2. Предложенные модели аддитивной структуры фитомассы на уровнях деревьев и древостоев дают возможность прогнозировать региональные изменения структуры фитомассы, связанные с одновременным повышением или снижением как температур, так и осадков.

3. Закономерности, полученные по изменению безразмерных показателей фитомассы сосновых древостоев, отличаются большим разнообразием: для некоторых показателей подтверждается та же «пропеллеро-образная» закономерность, что и для фитомассы, для других она подтверждается, но в противоположном, зеркальном отображении, а для третьих описывается колоколообразными зависимостями.

4. Закономерности, выявленные в изменении биологической продуктивности сосняков под влиянием температур и осадков, во многих случаях не соответствуют закономерностям, ранее установленным под влиянием природной зональности и континентальности климата. Следовательно, в зависимости от выбора того или иного климатического показателя можно получить совершенно иной результат.

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

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В изданиях, индексируемых в Scopus и WoS:*

1. Usoltsev V.A. The Investigation of the Additive Allometric Models of Biomass [Электронный ресурс] / V.A. Usoltsev, **I.S. Tsepordey** // CEUR Workshop Proceedings. - 2018. - Vol. 2131. - Paper 11. - P. 1-8. (urn:nbn:de:0074-2131-0).

2. Usoltsev V.A. Modeling the additive structure of stand biomass equations in climatic gradients of Eurasia / V.A. Usoltsev, S.O.R. Shobairi, **I.S. Tsepordey**, V.P. Chasovskikh // Environmental Quality Management. - 2018. - Vol. 28, Issue 2. - P. 55-61.

3. Usoltsev V.A. Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia / V.A. Usoltsev, W. Zukow, A.A. Osmirko, **I.S. Tsepordey**, V.P. Chasovskikh // Ecological Questions. - 2019. - Vol. 30, No 2. - P. 57-67.

4. Usoltsev V.A. Modelling Forest Stand Biomass and Net Primary Production with the Focus on Additive Models Sensitiveto Climate Variables for Two-needled Pines in Eurasia / V.A. Usoltsev, S.O.R. Shobairi, **I.S. Tsepordey**, V.P. Chasovskikh // Journal of Climate Change. – 2019. - Vol. 5, No. 1. - P. 41-49.

**В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

5. Усольцев В.А. Повышение эффективности принятия решений при оценке углеродного пула лиственных лесов на основе компьютерного моделирования: аддитивные модели фитомассы / В.А. Усольцев, Е. В. Кох, В.П. Часовских, А. И. Колтунова, **И.С. Цепордей** // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2018. - № 3 (71). - С. 123-128.

6. Усольцев В.А. Сравнительная оценка структуры биомассы деревьев *Picea L.* и *Abies Mill.* на территории Евразии аддитивным и традиционным методами / В.А. Усольцев, К.В. Колчин, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских // Сибирский лесной журнал. - 2018. - № 6. - С. 121-125.

7. Усольцев В.А. Моделирование аддитивной структуры биомассы древостоев *Pinus L.* в климатических градиентах Евразии / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, А.А. Осмирко, В.Ф. Ковязин, В.П. Часовских, В.А. Азаренок, М.В. Азаренок, Н.И. Кузьмин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2018. – Вып. 225. - С. 28-46.

8. Усольцев В.А. Трансевразийская модель аддитивной структуры фитомассы деревьев в новом освещении / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, А.И. Колтунова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2018. - № 4 (72). - С. 161-166.

9. Усольцев В.А. Фитомасса деревьев двухвойных сосен Евразии: Аддитивные модели в климатических градиентах / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских // Сибирский лесной журнал. - 2019. - № 1. - С. 44-56.

**В прочих изданиях:**

10. Усольцев В.А. Проблемы оценки биопродуктивности лесов в аспекте биогеографии: 2. Модели смешанных эффектов / В.А. Усольцев, С.О.Р. Шубаири, Дж.А. Дар, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, К.В. Колчин // Эко-потенциал. - 2018. - № 1 (21). - С. 9-26.

11. Усольцев В.А. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, С.О.Р. Шубаири, Дж.А. Дар, В.П. Часовских // Эко-потенциал. - 2018. - № 1 (21). - С. 27-47.

12. Усольцев В.А. Аддитивные региональные модели фитомассы деревьев и древостоев Евразии. Сообщение 1: род *Larix Mill.* / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, А.А. Осмирко // Эко-потенциал. - 2018. - № 2 (21). - С. 16-34.

13. Усольцев В.А. Аддитивные региональные модели фитомассы деревьев и древостоев Евразии. Сообщение 2: род *Betula L.* / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, А.А. Осмирко // Эко-потенциал. - 2018. - № 2 (21). - С. 35-54.

14. Усольцев В.А. Аддитивные региональные модели фитомассы деревьев и древостоев Евразии. Сообщение 3: род *Populus* L. / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, А.А. Осмирко // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 2 (21). - С. 55-73.
15. Усольцев В.А. Аддитивные региональные модели фитомассы деревьев и древостоев Евразии. Сообщение 4: род *Quercus* L. / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, В.П. Часовских, А.А. Осмирко // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 2 (21). - С. 74-90.
16. Усольцев В.А. Фитомасса древостоев двухвойных сосен Евразии: аддитивные модели в климатических градиентах / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, А.А. Осмирко, В.П. Часовских // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 3 (21). - С. 9-30.
17. Усольцев В.А. Относительные (безразмерные) показатели фитомассы двухвойных сосен в климатических градиентах Евразии / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, А.А. Осмирко, В.П. Часовских // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 3 (21). - С. 31-66.
18. Усольцев В.А. Аддитивная модель фитомассы пихтовых древостоев в градиентах температур и осадков в Евразии / В.А. Усольцев, К.В. Колчин, **И.С. Цепордей**, А.А. Осмирко, В. П. Часовских, А.Ф. Уразова // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 4 (24). - С. 78-90.
19. Усольцев В.А. Фитомасса еловых древостоев Евразии: аддитивная модель в климатических градиентах температур и осадков / В.А. Усольцев, К.В. Колчин, А.А. Осмирко, **И.С. Цепордей**, В. П. Часовских // *Эко-потенциал*. - 2018. - № 4 (24). - С. 91-102.
20. Усольцев В.А. Аддитивная аллометрия и проблема гармонизации моделей фитомассы деревьев / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей**, К.В. Колчин // *Вестник научных конференций*. - 2018. - № 2-3 (30). - С. 146-147.
21. Усольцев В.А. Аддитивные региональные модели фитомассы деревьев *Larix* Mill. Евразии / В.А. Усольцев, А.А. Осмирко, **И.С. Цепордей** // *Вестник научных конференций*. - 2018. - № 8-2(36), Часть 2. - С. 108-110.
22. Усольцев В.А. Динамика аддитивной структуры фитомассы сосновых древостоев в связи с гидротермическими показателями Евразии / В.А. Усольцев, **И.С. Цепордей** // *Актуальные вопросы современной науки: Сб. статей по матер. XIII междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. Ч.1.* – Уфа: Изд-во «Дендра», 2018. - С. 135-138.
23. Усольцев В.А. Аддитивная модель фитомассы древостоев в климатических градиентах Евразии / В.А. Усольцев, К.В. Колчин, А.А. Осмирко, **И.С. Цепордей** // *Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. XV Всерос. науч.-техн. конф.* - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. - С. 618-619.
24. Усольцев В.А. О прогнозировании фитомассы лесов Евразии в связи с их биоразнообразием и изменением климата / В.А. Усольцев, А.А. Осмирко, **И.С. Цепордей** // *Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: матер. XII Междунар. науч.-техн. конф.* -Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. - С. 399-402.

25. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Евразии: исследование системных связей средствами информационных технологий [Электронный ресурс] / В.А. Усольцев, В.П. Часовских, **И.С. Цепордей**. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. - 133 с. -1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-60413-520-4.

26. Усольцев В.А. Вертикальная структура фитомассы деревьев сосны обыкновенной: исследование системных связей средствами информационных технологий [Электронный ресурс] / В.А. Усольцев, В.П. Часовских, **И.С. Цепордей**. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. - 436 с. -1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-6041352-3-5.

27. Усольцев В.А. Фитомасса лесных деревьев и биогеография: исследование системных связей средствами информационных технологий [Электронный ресурс] / В.А. Усольцев, В.П. Часовских, **И.С. Цепордей** // Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. - 456 с. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-6041352-5-9.

Отзывы на автореферат просим направить в 3 экземплярах по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.281.01 Магасумовой А.Г. e-mail: dissovet.usfeu@mail.ru

Подписано в печать 06.11.2019 г. Объем 1,0 авт. л. Заказ № 52. Тираж 100. 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет. Сектор оперативной полиграфии РИО.