

На правах рукописи

Субботин Константин Сергеевич

**Биологическая продуктивность
сосновых фитоценозов (подрод *Pinus*)
в климатических градиентах Евразии**

06.03.02 - лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»

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

Официальные оппоненты: Ведрова Эстелла Фёдоровна, доктор биологических наук, ФГБУ науки «Институт леса им. В.Н. Сукачёва» Сибирского отделения РАН, лаборатория биогеохимических циклов в лесных экосистемах, ведущий научный сотрудник; Габделхаков Айдар Кавилович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», кафедра лесоводства и ландшафтного дизайна, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Архангельск

Защита состоится 30 июня 2016 г. в 12.00 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).

Автореферат разослан _____ 2016 г.

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

Магасумова Альфия Гаптрауфовна

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На климатическом саммите ООН в Париже в декабре 2015 г. 196 стран приняли на себя обязательства сократить выбросы углекислого газа и не допустить повышения среднегодовой температуры более чем на 2 градуса к концу века. Лесным экосистемам, как поглотителям атмосферного углерода, отводится в названной перспективе важная роль. Сегодня фитомасса лесов рассматривается как их основная характеристика, определяющая ход процессов в лесных экосистемах и используемая в целях экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова, оценки углерододепонирующей емкости лесов.

В связи с актуальностью таких проблем, как глобальные изменения климата и устойчивое развитие, исследования фитомассы, чистой первичной продукции (ЧПП) - количества фитомассы, произведенной насаждением на единице площади в единицу времени, и удельной чистой первичной продукции (УдЧПП), как отношения ЧПП к величине фитомассы лесных экосистем, являются сегодня наиболее приоритетными (Jiang et al., 1999). Биологическая продуктивность растительного покрова определяется многими факторами, из которых главнейшим является климатический, связанный с интенсивностью солнечной радиации и континентальностью климата (Григорьев, Будыко, 1956; Назимова. 1995; D'Aprile et al., 2015).

Настоящее исследование посвящено анализу структуры биологической продуктивности сосняков в климатических градиентах Евразии.

Степень разработанности темы исследования. В 1960-е гг. в ходе реализации Международной биологической программы было заложено большое количество пробных площадей с определениями на них не только фитомассы, но и ЧПП. УдЧПП, как третьей составляющей понятия биологической продуктивности, начали уделять внимание лишь в последние годы (Гульбе и др., 2010; Usoltsev et al., 2015). Диссертация является законченным научным исследованием.

Цель диссертационной работы - изучение фракционного состава биопродуктивности двухвойных сосен (подрод *Pinus*) в трансконтинентальных климатических градиентах Евразии на двух уровнях – дерева и насаждения в целом.

В связи с поставленной целью конкретные задачи исследования следующие:

- сформировать базу данных о фитомассе двухвойных сосен (кг), произрастающих на территории Евразии, и выполнить анализ аллометрических соотношений в структуре фитомассы деревьев;

- на основе сформированной базы подеревных данных двухвойных сосен разработать регрессионные модели для оценки фитомассы (кг) и исследовать закономерности изменений в фракционной структуре фитомассы по трансконтинентальным градиентам;

- сформировать базу данных о фитомассе и годичной ЧПП (т/га) двухвойных сосен, произрастающих на территории Евразии, разработать регрессионные модели для оценки их фитомассы и годичной ЧПП и на их основе исследовать изменения в фракционной структуре названных показателей по трансконтинентальным градиентам;

- на основе двух сформированных баз данных исследовать закономерности изменения фракционной структуры УдЧПП на уровнях дерева и фитоценоза в связи с определяющими факторами;

- разработать таблицы хода роста сосновых древостоев Урала по ЧПП и УдЧПП, совмещенные с традиционными таблицами хода роста (ТХР) древостоев.

Научная новизна. Впервые сформирована подеревная база данных о фитомассе (кг) двухвойных сосен Евразии, изучена структура фитомассы с использованием аллометрических моделей и выполнен её анализ по трансконтинентальным градиентам. Сформирована база экспериментальных данных о фитомассе и ЧПП фитоценозов (т/га) двухвойных сосен и на её основе впервые исследованы трансконтинентальные градиенты изменения фракционной структуры их фитомассы, ЧПП и УдЧПП на территории от Западной Европы до юга Китая. Впервые разработаны таблицы хода роста сосновых древостоев по ЧПП и УдЧПП для региона Урала.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что получены ранее неизвестные количественные закономерности изменения фитомассы, ЧПП и УдЧПП двухвойных сосен на уровнях дерева и фитоценоза в трансконтинентальных градиентах Евразии. Результаты работы могут быть полезны при оценке углерододепонирующей и кислородопродуцирующей функций сосновых лесов Евразии.

Методология и методы исследования. В основу исследования положен системный подход в виде его простейшей реализации – метода многофакторных регрессионных зависимостей.

Положения, выносимые на защиту:

- система многофакторных регрессионных моделей и закономерностей, отражающих изменение фракционной структуры фитомассы, ЧПП и УдЧПП двухвойных сосен на уровне дерева (кг) и фитоценоза (т/га) в трансконтинентальных градиентах Евразии;

- таблицы хода роста сосновых древостоев по ЧПП и УдЧПП для региона Урала.

Степень достоверности и апробация результатов. Системный подход при содержательном анализе объектов исследования и решение поставленных задач на уровне многофакторных статистически значимых ре-

грессионных моделей, а также использование современных IT-технологий определяют обоснованность выводов и предложений. Все виды работ по теме диссертации выполнены автором или при его участии.

Основные результаты исследований доложены на международных научно-практических конференциях «Наука и образование в жизни современного общества» (Тамбов, 2014); «Перспективы развития науки и образования» (Тамбов, 2015); XI всероссийской конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2015); X Международной научно-технической конференции «Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса», посвященной 85-летию УГЛТУ (Екатеринбург, 2015).

Основное содержание диссертации изложено в 16 печатных работах, в том числе одной монографии и трёх статьях, опубликованных в рецензируемых журналах (список ВАК).

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, состоит из введения, 6 глав, заключения и 7 приложений. Список использованной литературы включает 340 наименований, в том числе 165 иностранных. Текст иллюстрирован 11 таблицами и 85 рисунками.

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. В частности, показано широкое применение аллометрии в биологических исследованиях, в том числе при анализе структуры фитомассы дерева и распределении прироста в его компонентах согласно теориям «метаболического масштабирования» (West et al., 1997; Enquist, Niklas, 2002) и «адаптивного распределения масс» (Poorter et al., 2012). Показаны связи биологической продуктивности лесных фитоценозов с климатом на основе методов математического моделирования, даны понятия фитоклиматического ареала, «зоны жизни», радиационного баланса, индекса сухости и климатического индекса. Рассмотрены результаты моделирования биопродуктивности лесного покрова по климатическим трансконтинентальным градиентам с учетом массообразующих показателей древостоев с предварительной ординацией данных фитомассы на схемах изоконт и изотерм (Борисов, 1967; Tuukkanen, 1984) на примере кедровников и березняков и на схемах изоконт по С.П. Хромову (1957) и зональных поясов по Б.П. Алисову и Б.В. Полтараусу (1974) на примере елово-пихтарников (Usoltsev et al., 2014; Усольцев и др., 2015). Показано, что УдЧПП как одна из важнейших характеристик функционирования лесных экосистем, характеризующая скорость обновления органического вещества в лесной экосистеме

(Базилевич, Титлянова, 2008), так же, как и фитомасса, и ЧПП, характеризуется статистически значимыми трендами ее изменения в елово-пихтарниках и березняках по климатическим трансконтинентальным градиентам (Норицина, 2009; Усольцев, 2014).

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования биологической продуктивности сосновых фитоценозов (подрод *Pinus*) в климатических градиентах Евразии сформированы три базы данных: одна – для фитомассы на уровне дерева (кг) и две на уровне лесного фитоценоза, из последних одна с данными фитомассы, другая – с данными ЧПП и фитомассы (т/га).

Первая из них включает 2540 модельных деревьев двухвойных сосен, полученных на 320 пробных площадях (200 в естественных насаждениях и 120 – в культурах) на территории от Великобритании до Китая. Из общего количества на Россию приходится 72% деревьев. Материалы объединены в один исходный массив, структурированный в географическом плане. Вторая база данных о фитомассе сосняков (т/га) включает опубликованные В.А. Усольцевым (2010) данные с некоторыми нашими дополнениями. Она состоит из 3020 определений на пробных площадях, в том числе 2125 – в естественных фитоценозах и 895 – в культурах. В третью базу данных - о годичной ЧПП и фитомассе сосняков (т/га) - входят 920 определений, в том числе 690 – в естественных фитоценозах и 230 – в культурах. Пробные площади охватывают территорию от Великобритании и Испании на западе до русской Колымы и юга Китая на востоке. Используются также уникальные материалы Н.И. Казмирова с соавторами (1977) для древостоев *Pinus sylvestris* L., включающие данные полного фракционного состава как фитомассы, так и ее годичного прироста у 113 деревьев по ступеням толщины, и охватывающие полный экологический ряд на приозёрном склоне в составе 7 типов леса. В основу исследования положен системный подход в виде его простейшей реализации – метода многофакторных регрессионных зависимостей.

ГЛАВА 3. ФИТОМАССА ДЕРЕВА, ЕЁ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

3.1. Аллометрия и закономерности распределения ассимилятов в деревьях двухвойных сосен

Согласно фрактальной модели Г. Веста (West et al., 1999), представляющей симбиоз двух теорий – пайп-модели (Shinozaki et al., 1964) и фракталов (West et al., 1999; Enquist, Niklas, 2001), связь надземной массы дерева P_{abo} с диаметром ствола D описывается аллометрическим уравнением, имеющим общий вид:

$$Y = a X^b, \quad (1)$$

где X может обозначать, например, массу (г или кг) всей особи данного вида (P) или её размер (например, диаметр ствола D , см), и Y - массу или размер того или иного органа особи. Параметр a - аллометрическая константа, параметр b - экспонента масштабирования. Согласно теории Г. Веста, параметр b не зависит от структурных и морфологических характеристик исследуемых деревьев и имеет постоянную величину $b = 8/3$ (или $\approx 2,67$).

По нашей подеревной базе рассчитано аллометрическое уравнение вида:

$$\ln(Pabo) = a + b_1 (\ln D) + b_2 X, \quad (2)$$

где X – бинарная фиктивная переменная (Дрейпер, Сит, 1973), кодирующая два массива фактических данных фитомассы деревьев: $X = 0$ – для естественных сосняков и $X = 1$ – для культур. Оказалось, что по надземной фитомассе деревьев различие естественных сосняков и культур статистически не подтверждается, и получено уравнение

$$\ln(Pabo) = -2,557 + 2,45 (\ln D); R^2=0,984. \quad (3)$$

Величина b в (3) составила 2,45, что меньше теоретического значения по Г. Весту, равного 2,67, но больше средней экспериментальной величины по Д. Цианису и М. Менкуччини (Zianis, Mencuccini, 2004), равной 2,37. На статистически значимом уровне установлено, что величина b стабильна (2,45) на всем диапазоне размеров двухвойных сосен, но только по показателю надземной фитомассы, а по отдельным фракциям она непрерывно изменяется по мере увеличения размера дерева.

Согласно другой биологической модели Г. Веста (West et al., 1997), известной как «теория метаболического масштабирования» (MST), экспонента масштабирования b в соотношениях масс *листва ~ ствол*, *листва ~ корни* и *ствол ~ корни* (уравнение (1)) составляет соответственно 0,75; 0,75 и 1,0 (Enquist, Niklas, 2002), а это означает, что скорость относительного роста листвы, ствола и корней остается строго пропорциональной в процессе роста, и что относительные изменения массы листвы, ствола и корней остаются пропорциональными. Расчет уравнений по нашим данным для двухвойных сосен показал, что величина b в соотношении масс *хвоя ~ ствол*, вместо стабильного значения 0,75, снижается с увеличением массы ствола от 1,37 до 0,73, а затем возрастает с 0,73 до 0,85, в соотношении *хвоя ~ корни*, вместо стабильного значения 0,75, с увеличением массы корней вначале снижается от 1,21 до 0,77, а затем возрастает от 0,77 до 1,28, в соотношении *ствол ~ корни*, вместо стабильного значения 1,0, возрастает с 0,90 до 1,16.

3.2. Изменение структуры фитомассы двухвойных сосен (кг) в трансконтинентальных градиентах Евразии

Пробные площади, на которых выполнено определение фитомассы деревьев, позиционированы по зональным поясам (Алисов, Полтараус, 1974) на карте-схеме Евразии и соотнесены с индексом континентальности

на карте-схеме изоконт, рассчитанных по В. Ценкеру (Борисов, 1967). Нами предложена структурная форма регрессионной модели:

$$\ln P_i = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln Vt, \ln(Zon), \ln(ICC)), \quad (4)$$

где P_i - фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои, надземной части и корней (соответственно Pst , Pbr , Pf , Pa и Pr), кг; Vt – объем ствола в коре, дм^3 ; A – возраст дерева, лет; H – высота дерева, м; D – диаметр ствола на высоте груди, см; N – густота древостоя, тыс. экз./га; Zon – номер зонального пояса (2, 3 и 4, соответственно северный умеренный, южный умеренный и субтропический, по Алисову и Полтараусу); ICC - индекс континентальности климата по Ценкеру-Борисову.

Итоговая система рекурсивных уравнений имеет общий вид:

$$H=f(A, Zon, ICC) \rightarrow D=f(A, H, Zon, ICC) \rightarrow N=f(A, H, D, Zon, ICC) \rightarrow Vt=f(A, H, D, N, Zon, ICC) \rightarrow P_i=f(A, H, D, N, Vt, Zon, ICC). \quad (5)$$

В результате последовательного расчета констант уравнений (5) установлено, что коэффициенты детерминации R^2 равны: для H , D , N и Vt соответственно 0,593; 0,933; 0,763 и 0,994, а для Pa , (Pf/Pa) , (Pbr/Pa) , (Pst/Pa) и (Pr/Pa) соответственно 0,992; 0,771; 0,574; 0,785 и 0,632. Все регрессионные коэффициенты при независимых переменных уравнений (5) значимы на уровне P_{95} и выше.

Рекурсивная система уравнений (5) протабулирована в последовательности, показанной стрелками, и получены возрастные тренды фракций фитомассы деревьев, скорректированные совместным влиянием A , H , D , Vt , N , Zon , ICC . Из полученных возрастных трендов Pa , Pf , Pbr , Pst , и Pr , распределенных по трём зональным поясам (с 2-го по 4-й) и в каждом – по значениям индексов континентальности в диапазоне от 35 до 95, взяты значения фитомассы деревьев для возраста 100 лет и построены графики, согласно которым масса всех фракций монотонно увеличивается в направлении с севера на юг. Динамика их фитомассы в направлении от тихоокеанского и атлантического побережий к полюсу континентальности в Якутии характеризуется монотонным снижением всех фракций, включая корни. Последнее находится в противоречии с изменением фитомассы корней у деревьев лиственницы по градиенту континентальности климата (Usoltsev et al., 2015), которая, в отличие от массы корней сосны, не снижается, а возрастает. Возможно, одна из причин - различная толерантность лиственницы и сосны к почвенной мерзлоте.

3.3. Общая структура фитомассы двухвойных сосен естественного и искусственного происхождения в связи с возрастом, диаметром ствола и высотой дерева

При ориентировочных оценках фитомассы деревьев и древостоев в пределах обширных экорегионов может потребоваться информация об изменении средних характеристик структуры фитомассы в связи с возрастом, диаметром ствола и высотой дерева. Для этой цели нами использован исходный массив базы подеревных данных двухвойных сосен в количестве

2540 определений. Применена регрессионная модель, структура которой получила обоснование в работах В.А. Усольцева (1985, 1988, 2004):

$$\ln Pi \text{ или } \ln(Pi/Pa) = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln D + a_3 \ln H + a_4 (\ln D \times \ln H) + a_5 X, \quad (6)$$

обозначения переменных в которой те же, что в (5); X – бинарная фиктивная переменная: $X = 0$ – для естественных древостоев, $X = 1$ – для культур.

В уравнении для показателя (Pr/Pa) возраст дерева оказался не значимым ($t_{\text{факт}} = 0,82 < t_{05} = 2,0$), а в уравнении для (Pb/Pa) не подтвердилось различие между деревьями из естественных фитоценозов и культур ($t_{\text{факт}} = 0,48 < t_{05} = 2,0$). В то же время, показатели Pa и (Pf/Pa) в культурах оказались существенно выше, чем в естественных фитоценозах, а (Ps/Pa) и (Pr/Pa) , напротив, существенно ниже, по-видимому, вследствие меньшей густоты культур по сравнению с естественными сообществами. Путем табулирования уравнений (6) по задаваемым значениям возраста, диаметра ствола и высоты дерева составлена таблица для ориентировочной оценки фракционного состава фитомассы двухвойных сосен в естественных древостоях и культурах.

ГЛАВА 4. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ (т/га) СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ В ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ

4.1. Трансконтинентальные климатические градиенты фитомассы сосняков Евразии

Фактические значения фитомассы (т/га) 3020 сосновых фитоценозов мы соотнесли с пятью зональными поясами (Алисов, Полтараус, 1974), а также с индексами континентальности территории Евразии по С.П. Хромову, путем нанесения координат каждой пробной площади на упомянутые карты-схемы. Рассчитана система уравнений

$$N = f(A, Zon, ICKh) \rightarrow M = f(A, N, Zon, ICKh) \rightarrow Pi = f(A, N, M, Zon, ICKh), \quad (7)$$

где N - число стволов, тыс. экз./га; A – возраст древостоя, лет; M – запас стволовой древесины, м³/га; P_i - фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои, корней, надземная, общая и нижнего яруса растительности, в который включены, живой напочвенный покров, подлесок и подрост (соответственно P_S , P_B , P_F , P_R , P_A , P_T и P_U), т/га; Zon – номер зонального пояса: 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно субарктический, северный умеренный, южный умеренный, субтропический и субэкваториальный; $ICKh$ – индекс континентальности климата по С.П. Хромову, %. Уравнения объясняют от 48 до 97 % изменчивости искомым показателей. Все их константы значимы на уровне P_{95} и выше.

Из таблицы, полученной путем табулирования системы уравнений (7), взяты значения искомым показателей для возраста 100 лет и представлены в виде графиков взаимосвязи как с зональностью территории, так и с континентальностью ее климата. Установлено, что масса хвои и ветвей сосняков монотонно возрастает в направлении от 1-го к 5-му зональным поясам, масса стволов и корней изменяется по колоколообразной кривой с

максимумом в 3-м зональном поясе, а совокупные по фракциям показатели - надземная и общая фитомасса – возрастают от 1-го к 3-му поясу, а затем практически выходят на плато. В условиях южного умеренного пояса все фракции фитомассы и их совокупные показатели монотонно снижаются в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности. Аналогичная закономерность была установлена для фитомассы кедровых сообществ (Усольцев, 2013). Изменение расчетных показателей фитомассы нижнего яруса по трансконтинентальным градиентам, в основном, аналогично изменению надземной и общей массы фитоценозов, т.е. она возрастает в направлении с севера на юг и снижается в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности.

4.2. Трансконтинентальные климатические градиенты ЧПП сосняков Евразии

Аналогичным образом наши пробные площади с 920 определениями ЧПП и фитомассы позиционированы по зональным поясам и индексам континентальности и рассчитаны регрессионные уравнения:

$$\ln Z_i = f(A, N, P_i, Zon, ICKh), \quad (8)$$

где Z_i – ЧПП i -й фракции ($Z_S, Z_B, Z_F, Z_R, Z_A, Z_T$ и Z_U , соответственно: ствол, ветвей (скелета кроны), хвои, корней, надземной, общей и нижнего яруса) сосновых фитоценозов, т/га в год. Тогда совмещённая с (7) рекурсивная система уравнений имеет вид:

$$N=f(A, Zon, ICKh) \rightarrow M=f(A, N, Zon, ICKh) \rightarrow P_i=f(A, N, M, Zon, ICKh) \rightarrow \ln Z_i = f(A, N, P_i, Zon, ICKh). \quad (9)$$

Уравнения (9) объясняют от 74 до 82 % изменчивости искомым показателей. Все их константы значимы на уровне P_{95} и выше.

Из таблицы, полученной путем табулирования системы уравнений (9), взяты значения искомым показателей для возраста 100 лет и представлены в виде графиков, из которых следует, что характер изменения ЧПП сосняков в связи с индексом континентальности совпадает с изменением их фитомассы в том же градиенте. Он аналогичен также с изменением подземной, надземной и общей ЧПП елово-пихтарников (Usoltsev et al., 2014), но отличается от аналогичных трендов в березняках (Усольцев и др., 2015). По зональным поясам надземная и общая ЧПП сосняков монотонно возрастает с севера на юг, что совпадает с аналогичными закономерностями в елово-пихтарниках, но по отдельным фракциям подобные закономерности для елово-пихтарников и сосняков, а также по большинству фракций березняков, различаются существенно. Изменение расчетных показателей ЧПП нижнего яруса сосняков по трансконтинентальным градиентам аналогично изменению фитомассы нижнего яруса, т.е. она возрастает в направлении с севера на юг и снижается в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности. Отношение подземной ЧПП к надземной (Z_R/Z_A) в сосняках в направлении от 1-го зонального пояса к 5-му изменяется по колоколообразной кривой с макси-

мумом во 2-м и 3-м поясах, а в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности монотонно возрастает, как и соответствующее соотношение для фитомассы. Отношение ЧПП нижнего яруса к общей ЧПП сосняков (Z_U/Z_T) изменяется по некоей седлообразной поверхности: в направлении от 1-го зонального пояса к 5-му имеется резкий «провал» во 2-м и 3-м поясах, а по мере усиления континентальности климата названное соотношение монотонно снижается. Аналогичные тренды были и по доле фитомассы нижнего яруса в общей.

ГЛАВА 5. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ УдЧПП (%) СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ

5.1. Закономерности изменения фитомассы, ЧПП и УдЧПП деревьев *Pinus sylvestris* по диаметру ствола и типам леса в условиях европейского Севера

Материалы Н.И. Казиминова (1977) дают возможность анализа фитомассы, ЧПП и УдЧПП *Pinus sylvestris* в лесотипологическом градиенте. Рассчитаны уравнения

$$\ln Pi = a_1 + a_2 (\ln D) + a_3 (\ln D)^2 + a_4 K + a_5 (K^2), \quad (10)$$

$$\ln Zi = a_1 + a_2 (\ln D) + a_3 (\ln D)^2 + a_4 K + a_5 (K^2), \quad (11)$$

где Pi – фитомасса хвои, ветвей, ствола в коре, подземная (корни), надземная и общая, соответственно Pf , Pb , Ps , Pr , Pa и Pt , кг; Zi – годичный прирост фитомассы хвои, ветвей, ствола в коре, подземная (корни), надземная, и общая, соответственно Zf , Zb , Zs , Zr , Za и Zt , кг; D – диаметр ствола на высоте груди, см; K – код принадлежности фитоценоза к тому или иному типу леса в последовательности от лишайникового до багульниково-сфагнового, обозначается числами натурального ряда от 1 до 7. Все коэффициенты уравнений (10) и (11) значимы на уровне P_{999} . Показатели УдЧПП (%) рассчитаны путем деления расчетных значений Zi , полученных по уравнениям (11), на расчетные значения Pi , полученные по уравнениям (10). При анализе результатов табулирования уравнений (10) и (11) установлено, что в экологическом ряду по мере изменения условий увлажнения происходит перераспределение фитомассы и годичного прироста между стволом, кроной и корнями. Но надземная и общая фитомасса и ее прирост наибольшие в оптимальных условиях роста и наименьшие – в пессимальных. В эту закономерность не укладываются показатели УдЧПП деревьев: надземная УдЧПП монотонно увеличивается вниз по склону в ряду от лишайникового до багульниково-сфагнового типа леса, а общая в том же направлении снижается. Аналогичный анализ связи продукционных показателей с классом бонитета показал, что УдЧПП надземная и общая на ухудшение условий произрастания не реагирует. Возможно, причина такого несоответствия кроется в разном влиянии густоты, определяющей приоритеты в распределении приростов по компонентам фитомассы.

5.2. Изменение УдЧПП сосновых фитоценозов по трансконтинентальным градиентам

Поскольку УдЧПП представляет частное от деления ЧПП на фитомассу фитоценоза, закономерности изменения УдЧПП от климатических факторов мы получили путем деления расчетных значений ЧПП на соответствующие значения фитомассы, полученные в результате табулирования уравнений (7) и (8). Установлено, что закономерности изменения надземной и подземной УдЧПП сосняков по градиенту континентальности имеют противоположный характер: увеличение названного показателя по корням и снижение по надземным фракциям и по общей УдЧПП. Закономерности изменения УдЧПП сосняков и елово-пихтарников по большинству фракций имеют противоположный характер.

В направлении с севера на юг УдЧПП надземной фитомассы в сосняках увеличивается, а в елово-пихтарниках и березняках снижается. Между елово-пихтарниками и сосняками имеются также существенные различия в изменении УдЧПП хвои и корней. В направлении с севера на юг (от 1-го к 5-му зональному поясу) происходит увеличение УдЧПП как нижнего яруса, так и надземной и общей УдЧПП основного яруса. Но по градиенту континентальности закономерности противоположные: увеличение УдЧПП нижнего яруса и снижение надземной и общей УдЧПП основного яруса. Таким образом, географически упорядоченные трансконтинентальные тренды исследуемых показателей УдЧПП существуют, и они видоспецифичны. Это находится в противоречии с выводом И.В. Паламарчук (2013), согласно которому относительные показатели фитомассы древостоев «не зависят от географических регионов» (с. 23). Мы имеем также существенные противоречия при интерпретации географии УдЧПП разных древесных пород.

Известно, что УдЧПП означает «скорость превращения органического вещества» или, в других терминах, интенсивность круговорота веществ (Базилевич, Титлянова, 2008)). Но насколько это правомерно, если учесть, что УдЧПП рассчитывается как отношение ЧПП к наличной фитомассе без учета ее отпада и опада? Возможно, это определение в большей мере соответствовало бы действительности, если вместо наличного запаса фитомассы в формулу УдЧПП включать наличную фитомассу плюс весь ее отпад и опад на тот или иной момент времени. Возможно, это одна из причин того, что для разных древесных видов нет единых закономерностей, и при интерпретации географии их УдЧПП мы сталкиваемся с существенными неопределенностями (Усольцев, 2014).

ГЛАВА 6. ХОД РОСТА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО ЧПП И УдЧПП

Устойчивое ведение лесного хозяйства (sustainable forest management) является приоритетным для мировой лесной науки и практики (Strategy..., 1994; Гусев, Гусева, 1996). В ходе его реализации необходим комплекс

нормативных материалов, в том числе таблицы хода роста не только по запасу стволовой древесины, но и по фитомассе, ЧПП и УдЧПП. За основу при их составлении нами взяты традиционные таблицы хода роста (ТХР) древостоев Урала, дополненные показателями ЧПП и УдЧПП путем совмещения ТХР с полученными нами регрессионными моделями фитомассы (7) и ЧПП (8). Подобным образом при наличии соответствующих традиционных ТХР система уравнений (7) и (8) может быть использована при разработке ТХР сосновых древостоев по фитомассе, ЧПП и УдЧПП по регионам Евразии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованием аллометрических взаимосвязей между компонентами фитомассы деревьев двухвойных сосен (подрод *Pinus*) на основе базы данных в количестве 2540 определений установлено, что экспонента масштабирования b в аллометрическом уравнении не только не является постоянной величиной согласно модели Г. Веста (West et al., 1999), но также не подтверждает и биологическую её трактовку по модели, предложенной Х. Поортером (Poorter et al., 2015), поскольку конфигурации полученных кривых фитомассы не только не совпадают, но бывают противоположными. Более продуктивным может быть не сравнительный анализ тех или иных теорий, а изучение и интерпретация доверительных интервалов, характеризующих динамику исследуемых стохастических процессов.

Анализ изменения фракционной структуры фитомассы деревьев (кг), позиционированных нами по зональным поясам (с 1-го по 5-й в направлении с севера на юг) и соотнесенных с индексом континентальности на карте-схеме изоконт по В. Ценкеру, показал, что она изменяется как в связи с массобразующими характеристиками деревьев и древостоев, так и по трансконтинентальным градиентам.

Установлено, что основной вклад в объяснение изменчивости надземной фитомассы сосен вносит диаметр ствола и существенно меньший – высота и возраст дерева. При прочих равных условиях надземная фитомасса разновозрастных и разновеликих деревьев в культурах выше на 11% по отношению к естественным фитоценозам вследствие большей густоты и более выраженных конкурентных отношений в последних.

Анализ изменения фракционной структуры фитомассы, ЧПП (т/га) и УдЧПП (%) сосновых фитоценозов на основе сформированных баз данных показал, что масса хвои и ветвей сосняков монотонно возрастает в направлении от 1-го к 5-му зональному поясу, масса стволов и корней изменяется по колоколообразной кривой с максимумом в 3-м зональном поясе, а совокупные по фракциям показатели - надземная и общая фитомасса – возрастают от 1-го к 3-му поясу, а затем выходят на плато. Аналогично общей массе древостоя изменяется и фитомасса нижнего яруса. В пределах зонального пояса все фракции фитомассы и их совокупные показатели монотонно снижаются в направлении от атлантического и тихоокеанского побережий к полюсу континентальности. Характеры изменения ЧПП основ-

ного и нижнего ярусов сосняков по зональным поясам и в связи с индексом континентальности аналогичны изменению их фитомассы в тех же градиентах.

Анализ материалов Н.И. Казиминова (1977) для средневозрастных фитоценозов сосны обыкновенной на европейском Севере показал, что по мере изменения условий увлажнения происходит перераспределение фитомассы и годового прироста между стволом, кроной и корнями. Показатели УдЧПП (%) всех фракций фитомассы дерева закономерно и статистически значимо изменяются при переходе от одного типа леса к другому.

Изменение УдЧПП (%) на единице площади сосняков в градиенте континентальности статистически значимо, но для надземной и подземной УдЧПП оно имеет противоположные тренды: увеличение названного показателя у корней и снижение по надземным фракциям и по общей УдЧПП. В направлении с севера на юг происходит увеличение УдЧПП как нижнего яруса, так и надземной и общей УдЧПП основного яруса. Но по градиенту континентальности закономерности противоположные: увеличение УдЧПП нижнего яруса и снижение надземной и общей УдЧПП основного яруса.

Таким образом, установлена идентичность трансконтинентальных трендов фитомассы деревьев, а также фитомассы, ЧПП и УдЧПП сосновых фитоценозов: монотонный характер увеличения в направлении с севера на юг и снижения по градиенту континентальности в направлении от тихоокеанского и атлантического побережий к полюсу континентальности. Однако по отдельным фракциям фитомассы закономерности существенно различаются, что свидетельствует о географически обусловленной специфике распределения прироста в разные фракции деревьев и фитоценозов. Наличие географически упорядоченных трансконтинентальных трендов УдЧПП сосняков не подтверждает вывод И.В. Паламарчук (2013), согласно которому относительные показатели фитомассы древостоев «не зависят от географических регионов».

Для целей устойчивого ведения лесного хозяйства составлены таблицы хода роста сосняков по фитомассе, ЧПП и УдЧПП путем совмещения разработанных многофакторных регрессионных моделей с традиционными таблицами хода роста сосняков Урала по запасу древесины.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Усольцев, В.А. Биологическая продуктивность сосновых лесов Евразии: Исследование системных связей, обеспечивающих эффективность принятия решений в лесном секторе средствами ИТ-технологий / В.А. Усольцев, К.С. Субботин, Е.В. Кох, О.А. Богословская. - Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2015. - 157 с.

В журналах, рекомендованных ВАК:

2. Усольцев, В.А. Биологическая продуктивность естественных сосняков Северной Евразии: элементы географии / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин**, В.В. Терентьев, А.А. Маленко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2014. - № 11 (121). - С. 55-60.

3. Маленко, А.А. Надземная фитомасса деревьев сосны в культурах ленточных боров Западной Сибири / А.А. Маленко, В.А. Усольцев, **К.С. Субботин** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2015. - № 1 (123). - С. 60-65.

4. Усольцев, В.А. Изменение структуры фитомассы деревьев сосны (подрод *Pinus*) в трансконтинентальных градиентах Евразии / В.А. Усольцев, В.А. Азарёнок, **К.С. Субботин**, А.И. Колтунова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2015. - № 4(54). - С. 191-193.

В прочих изданиях:

5. Usoltsev, V.A. Produttività biologica larice limiti nord e sud della distribuzione (Biological productivity of larch species on the northern and southern limits of its spreading) / V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh, **К.С. Субботин**, Yu.V.Noritsina // Italian Science Review. - 2014. - No. 12(21). - P. 58-64 (итал.)

6. Усольцев, В.А. Формирование подеревной базы данных о фитомассе лесов Евразии / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин**, Д.С. Гаврилин // Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. По материалам междунар. науч.-практ. конф. (30 декабря 2014 г.). - Тамбов: «Юком», 2015. - Ч. 1. - С. 149-151.

7. Усольцев, В.А. Формирование базы данных о подеревной фитомассе лесов Евразии / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин**, Д.С. Гаврилин // Лесотехнические университеты в реализации концепции возрождения инженерного образования: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: матер. X Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. - С. 316-319.

8. Гаврилин, Д.С. Квалиметрия фитомассы сосны обыкновенной и лиственницы сибирской / Д.С. Гаврилин, **К.С. Субботин**, В.А. Усольцев // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы XI Всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «УМНИК» (21-22 апреля 2015). - Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. - Ч. 2. - С. 271-273.

9. Усольцев, В.А. Моделирование распределения ассимилятов в фитомассе деревьев: законы или закономерности? / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин**, Д.С. Гаврилин, Ю.В. Норичина // Эко-Потенциал. - 2015.- № 1(9). - С. 15-32.

10. Усольцев, В.А. О моделировании распределения ассимилятов в фитомассе деревьев / В.А. Усольцев, Г.Б. Кофман, **К.С. Субботин**, Д.С. Гаврилин // Перспективы развития науки и образования: сб. науч.

тр. по материалам междунар. научно-практич. конф. (28 февраля 2015 г.) - Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. – Ч. 4. - С. 152-154

11. Усольцев, В.А. Фитомасса деревьев лиственницы на северном и южном пределах и составление справочно-нормативных таблиц / В.А. Усольцев, Д.С. Гаврилин, **К.С. Субботин** // Эко-Потенциал. - 2015. - № 2(10). - С. 7-16

12. Usoltsev, V.A. Foreste di produzione specifica primario larice dell'Eurasia: elementi di geografia (Удельная первичная продукция лиственничных насаждений Евразии: элементы географии) / V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh, D.S. Gavrilin, **K.S. Subbotin** // Italian Science Review. - 2015. - No. 6(27). - P. 33-37 (итал.).

13. Усольцев, В.А. Изменение удельной первичной продукции сосновых насаждений по трансконтинентальным климатическим градиентам Евразии / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин**, В.П. Часовских // Эко-Потенциал. - 2015. - № 3(11). - С. 24-31

14. Усольцев, В.А. Таблицы хода роста по первичной и удельной первичной продукции сосняков Уральского региона / В.А. Усольцев, **К.С. Субботин** // Эко-Потенциал. - 2015. - № 3(11). - С. 32-33

15. Usoltsev, V.A. Ristrutturazione di fitomassa di pini (*Pinus sottogenere*) in Eurasia gradienti transcontinentali (Structure of pine tree (*Pinus subgenus*) biomass in transcontinental gradients of Eurasia) / V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh, **K.S. Subbotin** // Italian Science Review. - 2015. - No. 7(28). - P. 35-40 (итал.)

16. Usoltsev, V.A. Biomassa pinete naturale del nord dell'Eurasia: elementi di geografia (Biomass of natural pine forests of Northern Eurasia: The elements of geography) / V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh, **K.S. Subbotin** // Italian Science Review. - 2015. - No. 7(28). - P. 41-44 (итал.).

Подписано в печать 29.04.2016. Объем 1,0 авт. л. Заказ № _____. Тираж 100. 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. УГЛТУ. Отдел оперативной полиграфии.