

A
б43

Электронный архив УГЛТУ

6

На правах рукописи



Белоусов Евгений Владимирович

Структура и география первичной продукции культур сосны
обыкновенной (на примере Северной Евразии)

Специальности 06.03.03. - лесоведение, лесоводство;
лесные пожары и борьба с ними;
06.03.02. -- лесоустройство и лесная таксация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург 2006

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете.

Научный руководитель -
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор В. А. Усольцев

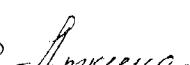
Официальные оппоненты -
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор З.Я. Нагимов;
кандидат биологических наук
В.М. Горячев

Ведущая организация – Оренбургский государственный агрониверситет

Зашита состоится 25 мая 2006 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 36.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Факс: (343)254-62-25

Автореферат разослан 24 апреля 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
 Л. И. Аткина

Введение

Актуальность темы. Лесной покров играет доминирующую роль во всех процессах биосфера, и реализация любой лесоэкологической программы начинается с оценки биологической продуктивности лесных экосистем. В исследовании биопродуктивности лесных экосистем можно выделить несколько приоритетных направлений.

Биопродуктивность лесов и изменение климата. Скорость потепления в последние десятилетия заставляет признать роль антропогенного фактора в этом явлении. Еще в 1927 г. в "Очерках геохимии" Вернадский писал о том, что сжигание больших количеств каменного угля должно привести к изменению химического состава атмосферы и климата. Сейчас большинство климатологов мира признаёт роль антропогенного фактора в потеплении климата. Несмотря на разработку множества программ по оценке биологических ресурсов лесов планеты и их вклада в углеродный баланс, в этом вопросе имеется много неопределенностей. В результате роль лесных экосистем в глобальных биосферных циклах разными исследователями оценивается с точностью до наоборот: от отрицательной (Woodwell et al., 1978) до положительной (Кобак и др., 1980).

Международный экологический мониторинг лесов. XIX Мировой конгресс ИЮФРО в 1990 г. инициировал разработку «Руководящих указаний по международному мониторингу лесов», в которых первоочередное значение имеют данные о продукции фитомассы лесов. С 1993 года формируется мировая систематизированная база данных о структуре лесного полога при финансовой поддержке Национального фонда науки США (Nadkazni, Parker, 1994). Создание баз данных о фитомассе лесов - насущная проблема современности. Подобная база является исходной основой для многоплановых исследований экологической и биосферной роли лесов.

Таким образом, мировое научное сообщество проявляет повышенный интерес к изучению биологической продуктивности и углерододепонирующей способности лесов, необходимым для оценки их роли в глобальных экологических циклах. Реализации этой задачи на примере культуры сосны обыкновенной, произрастающих на лесопокрытых площадях Северной Европы, посвящена настоящая работа.

Исследования автора проводились в 2003-2006 гг. в рамках грантов РFFI №№ 01-04-96424 и 04-05-96083 (руководитель проектов – профессор Усольцев В. А.).

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы - изучение структуры первичной продукции в искусственных насаждениях сосны обыкновенной на двух уровнях – локальном и глобальном. В первом случае

оценивается фракционная структура первичной продукции в условиях южной тайги Среднего Урала в связи с возрастом насаждений, а во втором - на основе сформированной базы данных о первичной продукции культур сосны Северной Евразии разрабатывается система регрессионных моделей, составляется карта-схема и устанавливаются географические закономерности распределения первичной продукции.

В связи с поставленной целью конкретными задачами исследования были:

- изучить особенности структуры первичной продукции культур сосны в условиях южной тайги Среднего Урала;
- составить таблицы для оценки первичной продукции (кг/дерево) и эскизы таблиц ее возрастной динамики (т/га) в культурах сосны южной тайги;
- построить систему многофакторных регрессионных моделей, отражающих взаимосвязь фракционной структуры первичной продукции с морфоструктурой культур сосны в пределах Северной Евразии;
- построить карту-схему распределения первичной продукции культур сосны Северной Евразии и проанализировать ее географию.
- составить таблицы для оценки первичной продукции культур сосны на территории России, совмещенные с ТХР нормальных древостоев и предельными значениями фитомассы, и проанализировать ее географию.

Перечисленные положения выносятся на защиту.

Научная новизна. Впервые выполнена оценка фракционной структуры первичной продукции культур сосны в условиях южной тайги Среднего Урала в связи с возрастом насаждений и составлены таблицы для оценки первичной продукции на уровнях дерева и древостоя. Разработана система многофакторных регрессионных моделей, отражающих взаимосвязь фракционной структуры первичной продукции с морфоструктурой культур сосны в пределах Северной Евразии, на основе которой построена карта-схема и установлены географические закономерности распределения первичной продукции. Впервые составлены таблицы возрастной динамики первичной продукции культур сосны обыкновенной.

Практическая значимость работы состоит в разработке нормативов, необходимых при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем, при реализации систем лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексного освоения искусственных сосновых насаждений.

Разработанные нормативы используются Свердловской лесоустроительной экспедицией и Северо-Казахстанским филиалом Казахского государственного института по проектированию лесного хозяйства (имеются справки о внедрении) при инвентаризации культур сосны.

Обоснованность выводов и предложений. Использование обширного экспериментального материала и современных методов статистического анализа, системный подход при содержательном анализе фактических материалов и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне многофакторных регрессионных моделей определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов и предложений.

Личное участие автора. Все виды работ по теме диссертации от сбора экспериментального материала до анализа и обработки полученных результатов осуществлены автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты исследований изложены на Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», Вологда, 2003; II Международной научно-практической конференции «Экология: образование, наука, промышленность и здоровье», Белгород, 2004; 5-й Международной научно-технической конференции «Лес-2004», Брянск, 2004; 4-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса», Брянск, 2004; Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Екатеринбург, 2004; Международной научно-технической конференции "Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса", Екатеринбург, 2004; Международной научно-практической конференции «Лесопользование, экология и охрана лесов: фундаментальные и прикладные аспекты», Томск, 2005; 6-й Международной научно-технической конференции «Лес-2005», Брянск, 2005.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 19 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения и 8 приложений. Список использованной литературы включает 222 наименования, в том числе 70 иностранных. Текст иллюстрирован 28 таблицами и 16 рисунками.

Глава 1. Состояние проблемы

В реализации концепции устойчивого развития значительное внимание уделяется снижению антропогенных выбросов наиболее обильного биогена – углерода и связыванию атмосферной углекислоты лесным покровом. Предполагают, что путем интенсивного лесоразведения можно скомпенсировать 11-15% антропогенных выбросов CO₂. Лесные культуры, особенно молодые, связывают атмосферный углерод более интенсивно в сравнении с естественными насаждениями (Brown et al., 1986; Brown, 1996).

Хотя лесные культуры отличаются от естественных насаждений наиболее активным связыванием атмосферного углерода, особенно в первых двух классах возраста, их первичная продукция изучена слабо, в частности, в сравнении с естественными насаждениями.

Оценка фитомассы древостоев по составляющим фракциям по трудоемкости несопоставима с традиционной оценкой запасов стволовой древесины. За всю историю лесной таксации накоплены огромные банки данных о запасах стволовой древесины и составлено большое количество региональных таблиц хода роста (ТХР) древостоев разных пород. Создание аналогичной нормативной базы для оценки фитомассы и первичной продукции традиционными таксационными методами невозможно. Единственно приемлемый путь - сопряжение традиционных нормативов по запасам стволовой древесины с данными о биопродуктивности лесов на основе переводных коэффициентов и соответствующих уравнений.

Лес представляет собой сложную биологическую динамичную систему, и исследование его структуры и динамики осуществляется на основе системного подхода, в том числе его простейшей математической реализации - регрессионного моделирования. Раздельное описание зависимостей регрессионными уравнениями приводит к тому, что полученные оценки характеристик не сбалансированы. Математические зависимости, объединенные в единую логически непротиворечивую концепцию, образуют систему связанных уравнений, основным достоинством которой является внутренняя согласованность описываемых закономерностей.

Система, в которой описание признаков (переменных) можно закодировать, но нельзя упорядочить, получила распространение в эконометрии под названием блоковых фиктивных переменных (Дрейпер, Смит, 1973). В работах В.А. Усольцева (1998, 2001) подобная методология впервые применена для оценки степени "дистанцирования" показателей фитомассы лесных экосистем по зональному и провинциальному градиентам.

Глава 2. Общая характеристика районов и объектов исследования

Сухоложский лесхоз Агентства лесного хозяйства по Свердловской области расположен на территории Сухоложского и Богдановичского административных районов в 120 км к востоку от Екатеринбурга (57° с.ш., 62° в.д.). Территория лесхоза относится к сосново-березовому предлесостепному округу Зауральской равнинной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области (Колесников и др., 1974). Лесные культуры занимают площадь около 10 тыс. га (из них 90 % площадей приходится на сосну), что составляет 12 % от лесопокрытой. Это существенно выше соответствующего

показателя, среднего по Свердловской области (3,5 %) (Суставова, 2003). Приведена краткая природная характеристика района исследования, дана характеристика лесного фонда. В целом, климатические условия и плодородие почв района исследований благоприятны для произрастания сосновых насаждений сравнительно высокой производительности.

Объектами исследований служили культуры сосны обыкновенной, относящиеся к разнотравному типу леса. Посадка осуществлялась в борозды под меч Колесова. Шаг посадки в ряду 0,7-1,0 м, ширина между рядов 3,0-4,0 м. Вследствие варьирования ширины между рядов при посадке, а также вследствие слабого самоизреживания древостоев в возрастном диапазоне от 15 до 32 лет, возрастная динамика текущей густоты древостоев недостаточно выражена, однако остальные таксационные показатели в названном возрастном диапазоне имеют четкую возрастную динамику (табл. 1).

Нами собрана коллекция данных о первичной продукции культур сосны в количестве 215 пробных площадей (83 % которых приходится на *Pinus sylvestris*, а остальные - на *P. nigra*, *P. densiflora* и *P. tabulaeformis*) позаимствованных из 30 литературных источников. Эти данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории распределились по 12 экорегионам.

Таблица 1

Таксационные показатели культур сосны разного возраста по данным перечетов на пробных площадях Сухоложского лесхоза

№ п/п	Состав	Возраст, лет	Средние		Густота, экз/га	Площадь сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			Высота, м	Диаметр, см				
1	10С	15	5,55	7,2	3200	13,03	34,8	I
2	10С	18	7,71	7,4	6045	26,33	106,9	I
3	10С	26	8,60	10,0	3396	26,55	166,3	II
4	9С1Б	29	12,2	12,1	2733	31,58	206,6	I
5	10С	32	16,6	12,5	3944	48,41	452,3	Ia

Глава 3. Методика исследований

Пробные площади заложены по ОСТ 56-69-83. Для определения первичной продукции деревьев и древостоев взяты модельные деревья, средние по диаметру, высоте и размерам кроны для каждой ступени толщины в пределах всего диапазона их варьирования. Возраст установлен по годичным кольцам на пне.

Модельные деревья брали в августе после полного формирования хвои. После рубки измерялись длина дерева, протяженность бессучковой части,

диаметры ствола на высоте 1,3 м и у основания кроны. Ствол делили на секции длиной, равной 1/10 высоты дерева. На середине каждой секции и на высоте груди выпиливали диск, измеряли диаметры в коре и без коры в двух направлениях, толщину диска; отделяли кору, взвешивали с точностью до 0,1 г отдельно древесину и кору до и после сушки при температуре 100–105 °С до постоянной массы. По полученным данным определяли содержание сухого вещества и базисную плотность древесины и коры.

Прирост древесины ствола определен путем “расчехления” ствола по 10 отрезкам и определения объемного прироста, среднего за последние 5 лет, с последующим пересчетом на абсолютно сухое состояние по базисной плотности, определенной по навескам. Прирост коры рассчитан по приросту древесины и соотношению массы древесины и коры ствола.

После валки дерева обрубали последовательно каждую мутовку в направлении от нижней части кроны к верхней. Взвешивали мутовку целиком, а затем отбирали среднюю ветвь, взвешивали с точностью 5 г и удаляли всю хвою, в том числе хвою текущего года. По навескам хвои и ветвей, взятым в средней части каждой трети кроны, и взвешенным до и после сушки, определяли содержание сухого вещества. Затем рассчитывали долю хвои в массе каждой мутовки и определяли массу хвои всего дерева, хвои текущего года и скелета кроны (ветвей).

Для определения годичного прироста скелета кроны (ветвей) в литературе предложено несколько методов, разных по сложности и точности. В нашей коллективной работе (Усольцев и др., 2004) выполнен специальный сравнительный анализ методов А. И. Уткина (1975), Р. Уиттекера (Whittaker, 1962) и А.И. Русаленко и Е.Г. Петрова (1975). Установлено, что наиболее трудоемкий метод А. И. Уткина и наименее трудоемкий - А.И. Русаленко и Е.Г. Петрова дают одни и те же значения годичного прироста массы скелета ветвей. Поэтому в нашем исследовании годичный прирост массы ветвей определен последним методом, путем деления удвоенной массы ветвей на возраст кроны, измеренный по годичным кольцам у ее основания. Это согласуется с известным фактом (Уткин, 1975), что средняя по массе мутовка у сосен приходится на середину кроны.

Глава 4. Структура первичной продукции культур сосны южнотаежной подзоны и нормативы ее оценки

Вследствие чрезвычайной трудоемкости процедуры оценки первичной продукции деревьев используются ее зависимости от легко измеряемых мас-сообразующих показателей и составляются на их основе таблицы по образцу

традиционных объемных таблиц (или таблиц фракционного состава фитомассы) с двумя входами - диаметром и высотой дерева.

Наиболее часто используется двухфакторная зависимость

$$P_i = f(H, D), \quad (1)$$

которая в форме линеаризованного уравнения множественной статической аллометрии (Усольцев, 1988) имеет вид

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D + a_3 \ln H \ln D, \quad (2)$$

где P_i - масса фракции дерева (ствол, листва, ветви), кг; H и D - соответственно его высота (м) и диаметр на высоте груди (см).

Иногда в уравнение включается третий фактор – возраст дерева (A , лет), учитывающий изменение ценотического положения дерева одного и того же размера по мере роста и самоизреживания древостоя (Усольцев, 1988; Суставова, 2004):

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln H + a_3 \ln D + a_4 \ln H \ln D. \quad (3)$$

Подобные 2-3-факторные уравнения предназначены для локального применения, т.е. в тех же лесорастительных условиях, в которых были заложены пробные площади. Для расчета универсальных уравнений (применимых в широком диапазоне условий местопроизрастания в разных экорегионах) упомянутых трех факторов недостаточно, и в такие уравнения вводятся характеристики древостоя, учитывающие добротность местопроизрастания и густоту стояния деревьев (Казимиров, Митруков, 1978; Усольцев, 1985, 1988; Usoltsev, Hoffmann, 1997; Нагимов, Сальникова, 1998; Нагимов, 2000; Wirth et al., 2004). В случаях, когда таблицы для поддеревной оценки фитомассы составляются с использованием имеющихся объемных таблиц, то в уравнение в качестве одной из независимых переменных включают также объем ствола (Usoltsev, Hoffmann, 1997; Нагимов, Сальникова, 1998; Нагимов, 2000).

Структуру уравнения (3) мы взяли за основу при моделировании значений первичной продукции деревьев Z_i , кг. Фактические данные первичной продукции 38 модельных деревьев обработаны по программе многомерного регрессионного анализа. Кроме фракций фитомассы (Z_i), в качестве зависимой переменной проанализированы показатели объемного прироста стволов без коры (Z_V , дм³)

$$\ln Z_V = f [\ln A, \ln D, (\ln H)^2, (\ln D \ln H)] \quad (4)$$

и составлены соответствующие таблицы.

Для оценки первичной продукции деревьев рассчитана цепочка взаимозависимых (рекурсивных) уравнений:

$$\begin{aligned} \ln Z_S &= f [\ln A, (\ln D \ln H), (\ln H)^2] \rightarrow \ln (Z_{SB}) = f [\ln Z_S, (\ln D)^2, (\ln H)^2] \rightarrow \\ &\rightarrow \ln Z_B = f [\ln D, \ln H, (\ln H \ln D)] \rightarrow \\ &\rightarrow \ln (Z_F) = f [\ln A, \ln D, \ln Z_B]; \end{aligned} \quad (5)$$

где Z_S , Z_{SB} , Z_B , Z_F – первичная продукция фракции дерева, соответственно стволов с корой, коры стволов, ветвей, хвои в абсолютно сухом состоянии, кг.

Уравнения (4) и (5) характеризуются высокой степенью адекватности и имеют коэффициенты детерминации R^2 в пределах от 0,901 до 0,979. Путем последовательного табулирования (5) получены таблицы для поддеревной оценки первичной продукции надземной фитомассы деревьев в культурах 15-35-летнего возраста.

Установлено, что 35-летние деревья диаметром 12 см и высотой 10 м по сравнению с 15-летними имеют годичный прирост массы ствола, меньший почти в 4 раза, а прирост массы хвои, меньший в 2,6 раза в связи с возрастным снижением ранга равновеликих деревьев.

Фактические данные первичной продукции, полученные на пробных площадях в культурах сосны Сухоложского лесхоза по возрастному градиенту для наиболее распространенного типа леса – разнотравного, сведены в табл. 2.

В лесной таксации общеизвестна обратно пропорциональная зависимость процента текущего прироста стволов от возраста, выражаемая обычно гиперболической либо иной, близкой по биологическому смыслу функцией. Эту зависимость распространяют на определение показателя, представляющего собой частное от деления первичной продукции той или иной фракции фитомассы Z_i (т/га) на запас стволовой древесины (M , м³/га), в зависимости от возраста древостоя (A , лет) (Замолодчиков, Уткин, 2000; Уткин и др., 2003). Зависимость описывается гиперболической функцией:

$$\frac{Z_i}{M} = a_0 + a_1 (1/A), \quad (6)$$

Наряду с этим, начиная с XIX века известна взаимосвязь величины депонируемого в фитомассе прироста с массой ассимиляционного аппарата, (Hartig, 1896; Busse, 1930; Яблоков, 1934; Burger, 1929-1953; Kittredge, 1944; Георгиевский, 1948; Полякова, 1954) которую можно выразить зависимостью (Усольцев, 1997; Usoltsev et al., 2002):

$$\ln Z_i = f(\ln P_F), \quad (7)$$

где Z_i – первичная продукция массы i -й фракции (стволов, ветвей и хвои, соответственно Z_S , Z_B и Z_F), в абсолютно сухом состоянии, т/га; P_F – наличная масса хвои, т/га.

Однако зависимость (7) не постоянна (Möller, 1947; Полякова-Минченко, 1961), и при расчете возрастных трендов фракционного состава первичной продукции культур зависимость (7) скорректирована возрастом древостоя:

$$\ln Z_i = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 \ln P_F, \quad (8)$$

В соответствии с двумя методами аналитического описания фракционной структуры первичной продукции фитомассы по исходным данным табл. 2 рассчитаны системы уравнений (6) и (8).

Для аналитического описания зависимости таксационных показателей и массы хвои от возраста принята структура моделей

$$\ln H, \ln D, \ln G, \ln M, \ln P_F = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2; \quad (9)$$

где H , D , G , M , P_F – соответственно средние высота (м) и диаметр (см), сумма площадей сечений (м²/га), запас стволовой древесины (м³/га) и масса хвои (т/га). В (9) R^2 варьирует от 96 (для среднего диаметра) до 79 % (для суммы площадей сечений) и для фитомассы хвои составил 74 %.

Сопоставление уравнений (6) и (8), соответствующих двум методам моделирования первичной продукции, по коэффициенту R^2 показывает преимущество (6) (его величина в среднем на 9 % выше, чем для (8)), а по величине ошибки, рассчитанной в процентах к фактическим значениям, напротив, очевидно преимущество модели (8) (ошибка в этом случае ниже в среднем на 40 % по сравнению с (6)). Поэтому при составлении таблицы возрастной динамики первичной продукции культур в диапазоне 15-35 лет (табл. 3) за основу взяты уравнения (8), которые биологически обоснованы, поскольку в них первичная продукция ставится в зависимость от массы ассимиляционного аппарата. При составлении таблицы (3) последовательно табулировали по задаваемым значениям возраста древостоя с шагом 5 лет вначале уравнения (9) для таксационных показателей и массы хвои, а затем – (8) для первичной продукции. Из таксационных показателей протабулированы лишь H , D , G и M , а показатели текущей густоты N получены расчетным путем по известным значениям G и D . Таким образом установлено, что максимум первичной продукции приходится на возраст 25 лет, что соответствует возрасту полного формирования полога и начала интенсивного самоизреживания. Доля хвои в формировании первичной продукции наибольшая по отношению к стволу и ветвям, она составляет в возрасте 15 лет 47 % к общей надземной и постепенно снижается к возрасту 35 лет до 37 %.

Квалиметрические показатели (плотность и содержание сухого вещества) фракционного состава фитомассы древостоя служат в качестве экологической меры концентрации органического вещества в единице объема или свежей массы той или иной фракции фитомассы (Shipley, Vu, 2002). Эти показатели в одних случаях очень изменчивы (Молчанов, 1971; Усольцев, 1988), в других, напротив, совпадают в разных регионах (Габеев, 1976; Усольцев, 1985). Определение квалиметрических показателей – необходимый этап оценки биопродуктивности насаждений, причем очень трудоемкий, и необходимо знать область их применения. Наше сопоставление квалиметрических показателей в культурах сосны Сухоложского, Саргатского (омская лесостепь) и Семиозерного (кустанайская степь) лесхозов показало, что на статистически достоверном уровне они отличаются на 11-28 % и поэтому должны специально определяться в каждом конкретном случае.

Таксационные показатели и первичная продукция фракций фитомассы по результатам измерений на пробных площадях

№ последовательн. ности измерения	Кореек ционтериа блокац.	Блокир. етер ментария	Средний диаметр, м	Диаметр, см	Численн. ое количест. во, шт/га	Фитомасса хвоя, т/га	Фитомасса корней, т/га	Корни хвоя, т/га	Берес кча, т/га	Хвойа корней, т/га	Первичная продукция, т/га
1	1	10C	15	5,55	7,2	13,03	3200	34,8	6,0	1,36	0,22
2	1	10C	18	7,71	7,4	26,33	6045	107	10,6	3,06	0,44
3	II	10C	26	8,60	10,0	26,55	3396	166	10,4	2,59	0,31
4	I	9C1B	29	12,2	12,1	31,58	2733	207	8,5	3,22	0,22
5	Ia	10C	32	16,6	12,5	48,41	3944	452	9,4	3,66	0,30

Таблица 3
Таблица возрастной динамики первичной продукции по надземной фитомассе в культурах сосны разнотравного типа леса Сухоложского лесхоза

Метр иета блокац.	Блокир. етер ментария	Диаметр, см	Численн. ое количест. во, шт/га	Фитомасса хвоя, т/га	Фитомасса корней, т/га	Корни хвоя, т/га	Берес кча, т/га	Хвойа корней, т/га	Первичная продукция, т/га
15	5,59	6,82	15,37	4210	43,4	6,4	1,51	0,25	1,27
20	7,93	8,56	22,31	3877	96,0	10,5	2,85	0,36	1,55
25	10,4	10,2	29,79	3637	178	11,1	3,43	0,34	1,69
30	13,0	11,8	37,73	3452	293	9,3	3,26	0,27	1,74
35	15,7	13,3	46,07	3303	449	6,9	2,71	0,19	1,73

Глава 5. Географические закономерности распределения первичной продукции культур сосны на территории Северной Евразии

Материалы по 215 определениям первичной продукции фитомассы культур сосны Северной Евразии, распределенные по 12 регионам, обработаны по программе многофакторного регрессионного анализа с включением в структуру моделей блоковых фиктивных переменных (Дрейпер, Смит, 1973). По каждому из двух выше упомянутых методов рассчитаны следующие системы уравнений общего вида:

по методу 1

$$\begin{aligned} Z_g/M &= f(1/A, X_0, \dots, X_{11}); \\ Z_B/M &= f(1/A, X_0, \dots, X_{11}); \\ Z_F/M &= f(1/A, X_0, \dots, X_{11}); \\ Z_R/M &= f(1/A, X_0, \dots, X_{11}); \\ Z_U/M &= f(1/A, X_0, \dots, X_{11}) \end{aligned} \quad (10)$$

и по методу 2

$$\begin{aligned} \ln Z_S &= f(\ln P_F, \ln A, \ln H, \ln N, X_0, \dots, X_{11}); \\ \ln Z_{SB} &= f(\ln P_F, \ln Z_S, \ln A, \ln H, \ln D, X_0, \dots, X_{11}); \\ \ln Z_B &= f(\ln P_F, \ln Z_S, \ln A, \ln D, \ln N, X_0, \dots, X_{11}); \\ \ln Z_F &= f(\ln P_F, \ln A, \ln D, \ln H, \ln N, X_0, \dots, X_{11}); \\ \ln Z_R &= f(\ln P_F, \ln Z_S, X_0, \dots, X_{11}); \\ \ln Z_U &= f(\ln P_U, X_0, \dots, X_{11}), \end{aligned} \quad (11)$$

где Z_S , Z_{SB} , Z_B , Z_F и Z_R – соответственно первичная продукция стволов в коре, коры стволов, ветвей, хвои и корней; P_U и Z_U – соответственно фитомасса и первичная продукция фитомассы нижних ярусов, т/га.

Сопоставление результатов, полученных по двум методам, свидетельствует о преимуществе метода 2 по сравнению с 1, как по величине R^2 (в среднем на 12, а по продукции корней и хвои соответственно на 32 и 28 %), так и по величине ошибки, в процентах к фактическим значениям (в среднем в 3, а по продукции ветвей и хвои, соответственно в 10 и 20 раз).

Поэтому в последующих расчетах используются только уравнения (11).

Уравнения (11) применены далее для приведения фактических определений первичной продукции согласно базе данных к сопоставимому по регионам виду, т.е. по регионам сопоставляются не совокупности данных пробных площадей, а возрастные тренды первичной продукции фитомассы, полученные путем совмещения (наложения) моделей (11) на возрастные тренды таксационных показателей и показателей фитомассы. Последние рассчитаны по материалам 880 определений, вошедших в соответствующую базу данных о фитомассе культур сосны 25 регионов Северной Евразии (Усольцев, 2001, 2002; Максимов, 2003).

Последовательность расчета возрастных трендов первичной продукции культур (их фрагмент для Уральской провинции приведен в табл. 4) следующая: а) таксационные показатели, рассчитанные с помощью системы рекур-

сивных многофакторных зависимостей, б) показатели фитомассы, рассчитанные с помощью системы многофакторных зависимостей и в) показатели первичной продукции фитомассы, рассчитанные по уравнениям (11), протабулированным по результатам первых двух этапов. По этим данным для возраста 100 лет составлена карта-схема распределения первичной продукции культур по регионам Северной Евразии, иллюстрирующая закономерности изменения общей первичной продукции (Z_T , т/га) по провинциальному и зональному градиентам. Количественно она описана уравнением

$$Z_T = 7,046 - 0,1305 IC + 0,3448 T - 0,00293 T^2; R^2 = 0,510, \quad (12)$$

где IC - индекс континентальности климата, по Ценкеру (Борисов, 1967); T - среднемесячная сумма эффективных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$, по Тукканену (Tuukkanen, 1984). Таким образом, общая первичная продукция культур сосны на статистически достоверном уровне снижается по мере увеличения индекса континентальности по провинциальному градиенту и возрастает с увеличением суммы эффективных температур по зональному градиенту.

Известно, что на каждом этапе роста древостоя имеется некоторый биологический предел густоты, выше которого древостой как лесной биоценоз существовать уже не может (Лосицкий, Чуенков, 1980). Количественная характеристика этого предела определяется условиями роста, а время достижения предела – ходом самоизреживания древостоев. При исследовании траекторий самоизреживания древостоев внимание исследователей на протяжении ряда лет концентрировалось на правиле $3/2$ ($1/2$), согласно которому предельная линия самоизреживания по показателю фитомассы в логарифмических координатах имеет угловой наклон $3/2$ для деревьев и $1/2$ – для древостоев. Исследованиями последних лет показано, что предельная линия самоизреживания, во-первых, не является прямой в логарифмических координатах и, во-вторых, угол ее наклона для древостоев не равен $1/2$ (Кофман, Гуревич, 2001). Более того, для массы крон, например, эта линия является либо колоколообразной, либо горизонтальной, т.е. практически параллельной оси абсцисс (Усольцев, 1998; Нагимов, 2000).

Известно, что зависимость фитомассы от текущей густоты в древостоях одного возраста и типа леса имеет колоколообразный характер (Бузыкин, 1982). Возрастные наборы таких колоколообразных кривых сдвинуты относительно оси густот. В результате возрастного сдвига кривых в координатах *фитомасса* – *густота* правые ветви густотных кривых пересекаются, и точки пересечения при $\Delta A \rightarrow 0$ образуют огибающую кривую, которая является *пределной* для данного диапазона густот.

На основе методики В.А. Усольцева (1998; 2003) С.В. Максимов по данным о фитомассе культур сосны, полученным на временных пробных площадях на территории Северной Евразии, разработал специальную систему

Таблица 4
Фрагмент таблицы возрастных трендов в таксационных показателей, показателей фитомассы и показателей первичной продукции культуры сосны, построенных по системе уравнений (11) на основе базы данных о фитомассе и ее первичной продукции для подзоны южной тайги Уральской провинции

Воз- раст- ный пер- иод год года, год/га	Сред- ний гус- тота, тыс. шт./га	За- пас, м ³ /га	Фитомасса, т/га	Первичная продукция, т/га														
				Стволы		корни	ниж- ние ярусы	стволы		кора	хвоя	ветви/корни						
				всего	кора			всего	кора									
10	3,6	3,7	8,518	30,8	12,4	1,59	4,47	4,7	0,17	26,5	1,60	0,27	2,14	1,28	0,85	0,17	6,05	
20	8,2	7,5	5,135	120,7	48,7	4,90	5,76	8,5	14,8	0,38	78,2	2,45	0,29	2,30	1,39	0,98	0,38	7,50
40	15,4	14,3	2,321	295,5	122,5	10,32	6,25	12,7	30,1	0,53	172,0	2,40	0,23	2,19	1,10	1,14	0,53	7,37
60	20,5	19,8	1,392	417,9	177,8	13,93	6,12	14,6	38,7	0,53	237,8	2,02	0,17	2,00	0,84	1,24	0,53	6,63
80	24,3	24,4	0,962	501,5	218,2	16,45	5,90	15,7	43,6	0,50	283,9	1,68	0,14	1,83	0,66	1,32	0,5	5,99
100	27,0	28,0	0,741	556,3	246,8	18,26	5,66	16,3	46,1	0,46	315,3	1,40	0,11	1,68	0,53	1,38	0,46	5,46
120	29,1	31,1	0,600	594,3	268,1	19,62	5,44	16,7	47,3	0,43	338,0	1,19	0,09	1,56	0,44	1,44	0,43	5,06
140	30,7	33,6	0,511	621,7	284,7	20,73	5,24	16,8	47,9	0,39	355,1	1,03	0,08	1,46	0,37	1,50	0,39	4,73
160	32,0	35,7	0,450	644,0	298,8	21,71	5,07	16,9	48,2	0,36	369,3	0,90	0,07	1,36	0,31	1,55	0,36	4,48

рекурсивных регрессионных моделей и построил на ее основе предельные линии средних высот и диаметров, а также запаса древостоев и фитомассы по полному фракционному составу. Поскольку наша база данных о первичной продукции совмещена с данными о фитомассе насаждений, наши модели первичной продукции протабулированы по значениям, полученным С.В. Максимовым (2003) для линий самоизреживания таксационных показателей и массы хвои, по рекурсивно-регрессионному принципу. В результате получены предельные траектории первичной продукции культур сосны по регионам Северной Евразии.

Значения предельной общей (надземной + подземной) первичной продукции ($Z_{tot,lim}$, т/га) культур проанализированы в связи с суммой эффективных температур (T , $^{\circ}\text{C}$) и с индексом континентальности климата, по Ценкеру (IC , %), и получено уравнение

$$Z_{tot,lim} = 9,6757 - 0,1488IC + 0,3445 T - 0,00317 T^2; R^2 = 0,593, \quad (13)$$

согласно которому предельная первичная продукция культур сосны, как и продукция, полученная выше по возрастным трендам, на статистически достоверном уровне закономерно снижается как по широтному градиенту с юга на север, так и по меридиональному – от Атлантического и Тихоокеанского побережий к Средней Сибири.

Полученные выше возрастные тренды и соответствующая карта-схема территориального распределения первичной продукции имеют в своей основе только данные пробных площадей. Более надежную количественную основу для региональных расчетов биопродуктивности лесопокрытых площадей дает совмещение (стыковка) регрессионных моделей первичной продукции с региональными таблицами хода роста (TXP) древостоев, которые составлялись их авторами на массовом экспериментальном материале. Связующим звеном для подобной стыковки и составления таблиц первичной продукции (ТПП) служат таблицы хода роста фитомассы (TXРФ) культур сосны по регионам Северной Евразии (Максимов, 2003).

За основу взяты TXРФ нормальных древостоев культур сосны, полностью приведенные в диссертации С.В. Максимова (2003). Регрессионные модели первичной продукции (11) при соответствующих значениях блоковых фиктивных переменных протабулированы по значениям A , N , H , D и M базовых TXP и по значениям P_F и $P_{t,0}$ взятым из TXРФ. В результате получены 17 ТПП культур сосны для всей лесной зоны России, представляющие собой результат наложения моделей (11) на TXP и TXРФ.

Заключение

1. Для поддеревной таксации первичной продукции в культурах сосны 15-35-летнего возраста в разнотравном типе леса Сухоложского лесхоза составлены трехходовые таблицы, согласно которым первичная продукция равновеликих деревьев изменяется с возрастом на статистически зна-

чимом уровне и в значительно большей степени, нежели структура валовых показателей фитомассы. Например, 35-летние деревья диаметром 12 см и высотой 10 м по сравнению с 15-летними имеют годичный прирост массы ствола, меньший почти в 4 раза, а прирост массы хвои, меньший в 2,6 раза в связи с разным ранговым положением дерева одного и того же размера в молодняках (деревья-лидеры) и древостоях старших возрастов (утягнутые деревья).

2. При составлении таблицы возрастной динамики первичной продукции древостоев для культур сосны разнотравного типа леса Сухоложского лесхоза сопоставлено два метода моделирования: (а) установление зависимости относительной (по отношению к запасу стволов) величины первичной продукции от возраста древостоя (Замолодчиков, Уткин, 2000) и (2) первичная продукция ставится в зависимость не только от возраста, но и от массы ассимиляционного аппарата (массы хвои) (Усольцев, 1997). Второй метод дал случайную ошибку определения, на 40% меньшую по сравнению с первым.

3. Согласно составленной таблице максимум первичной продукции приходится на возраст 25 лет, что соответствует возрасту полного смыкания полога и начала интенсивного самоизреживания. Доля хвои в формировании первичной продукции наибольшая по отношению к стволу и ветвям и составляет в возрасте 15 лет 47% к общей надземной, постепенно снижаясь к возрасту 35 лет до 37 %.

4. Сравнительный анализ содержания сухого вещества и условной (базисной) плотности фракций фитомассы культур сосны в таежной, лесостепной и степной природных зонах показал, что названные квадратометрические показатели варьируют в зависимости от возраста и ценотического положения дерева в древостое и значительно отличаются в насаждениях одной морфоструктуры, но в разных зонах, и использование усредненных показателей при оценках первичной продукции может привести к их смешиванию.

5. В нашем исследовании географических закономерностей распределения первичной продукции культур сосны предпринята первая систематическая попытка приведения собранных экспериментальных данных к сопоставимому по регионам виду специальными математико-статистическими приемами: а) сравниваются не региональные совокупности фактических данных, а регрессионные модели первичной продукции, в которые в качестве регрессоров включены основные таксационные показатели и значения фитомассы древостоев; б) применен рекурсивный принцип, обеспечивающий внутреннюю согласованность уравнений, описывающих фракционную структуру первичной продукции насаждений, и в) для приведения названных систем уравнений к сопоставимому по регионам виду в упомянутые уравнения введены блоковые фиктивные перемен-

ные, характеризующие принадлежность локального массива данных к тому или иному региону.

6. Поскольку база данных о первичной продукции культур сосновы в 4 раза меньше базы данных о фитомассе, при моделировании регионального распределения первичной продукции использованы не только таксационные показатели древостоев пробных площадей, но и показатели фитомассы насаждений. Тем самым точность моделей первичной продукции поставлена в зависимость от точности моделей фитомассы.

7. Значения первичной продукции культур сосновы, приведенные в сопоставимое по регионам состояние, нанесены на карту-схему и выполнен их географический анализ в связи с климатическими показателями. Установлено статистически достоверное снижение первичной продукции с повышением континентальности климата по провинциальному градиенту и со снижением суммы эффективных температур – по зональному градиенту.

8. Одно из фундаментальных положений теоретической биологии – правило 3/2 – впервые интерпретировано в терминах первичной продукции культур сосновы и численно установлена предельная (по условию самоизреживания)гибающая кривая первичной продукции на уровне совокупности древостоев по полному фракционному составу.

9. Применение в технологии ГУЛФ составленных для России 17 таблиц возрастной динамики первичной продукции культур сосновы дает возможность оценить степень использования ресурсного потенциала на инвентаризуемых территориях, а их применение в расчетах углеродного цикла позволяет оценить потенциально возможный сток атмосферного углерода в культурах сосновы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Ефименко О. А., Петелина О. А., Щукин А. В., Платонов И. В., **Белоусов Е. В.**, Терентьев В.В. Распределение запасов органического углерода на территории Свердловской области // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 104-115.
2. Усольцев В. А., Петелина О. А., Аткина Л. И., Платонов И. В., **Белоусов Е. В.**, Терентьев В.В., Ненашев Н. С. Таблицы биопродуктивности естественных сосновых насаждений Северной Евразии и их географический анализ // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 122-134.
3. Усольцев В. А., Залесов С. В., Усольцева Ю. В., Платонов И. В., **Белоусов Е. В.**, Терентьев В.В., Кириллова В. В. Таблицы биопродуктивности естественных бересняков Северной Евразии и их географический анализ // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 135-150.
4. Усольцев В.А., Терехов Г.Г., Филиппов А. В., Крапивина О. А., Усоль-

цева Ю. В., Терентьев В. В., Щукин А. В., **Белоусов Е. В.**, Ненашев Н. С., Азаренок М.В. Оценка углерододепонирующей емкости лесных экосистем Урала в связи с ожидаемым глобальным потеплением // Вестник БГТУ. 2004. № 8, часть 1. Белгород. С. 42-44.

5. Усольцев В.А., Филиппов А. В., Крапивина О. А., Усольцева Ю. В., Терентьев В. В., Щукин А. В., **Белоусов Е. В.**, Азаренок М. В., Ненашев Н. С. Совмещение баз данных о запасах углерода и его годичном депонировании в лесных экосистемах Северной Евразии // Вестник БГТУ. 2004. № 8, часть 1. Белгород. С. 44-46.
6. Усольцев В.А., Максимов С.В., Петелина О.А., Ненашев Н.С., Крапивина О.А., **Белоусов Е.В.**, Терентьев В.В., Щукин А.В., Залесов С.В. Способ приведения фактических данных о фитомассе к сопоставимому по экорегионам виду и закономерности ее географии // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 24. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 124-137.
7. Усольцев В. А., Филиппов А.В., Крапивина О.А., **Белоусов Е.В.**, Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Платонов И.В., Щукин А.В. Углерододепонирующая емкость лесных экосистем Уральского региона и ее оценка в Евразийском масштабе // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Вологда: ВоЛГТУ, 2004. С. 91-93.
8. Усольцев В.А., Филиппов А.В., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., **Белоусов Е.В.**, Платонов И.В. Оценка некоторых методов определения первичной продукции ветвей деревьев // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 8. Брянск: Ин-т экологии МИА, 2004. С. 65-67.
9. Усольцев В.А., Петелина О.А., Ефименко О.А., Крапивина О.А., Щукин А.В., Платонов И.В., Терентьев В.В., **Белоусов Е.В.**, Ненашев Н.С. Формирование базы данных о фитомассе лесов, нормальная и предельная продуктивность, ее география // Научные труды. Выпуск 3. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 12-16.
10. Усольцев В.А., Марковский В.И., Крапивина О.А., Щукин А.В., Платонов И.В., Ненашев Н.С., **Белоусов Е.В.**, Терентьев В.В. Оценка запасов углерода и углеродно-кислородного бюджета лесных экосистем Уральского региона // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Результаты научных работ, полученные за 2003 г. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2004. С. 510-515.
11. Усольцев В.А., **Белоусов Е.В.**, Терехов Г.Г., Терентьев В.В., Платонов И.В., Терин А.А. Биологическая продуктивность культур сосновы в Сухоложском п-це Свердловской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 9. Брянск: БГИГА, 2004. С. 57-60.
12. Ненашев Н.С., **Белоусов Е.В.**, Терентьев В.В., Платонов И.В., Усольцев В.А. Сравнительный анализ годичной продукции сосновых насаждений Урала и Западной Сибири // Матер. Всероссийской п.-т. конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С. 164-165.



13. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., **Белоусов Е.В.**, Терентьев В.В. База данных о первичной продукции сосновых Евразии // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С. 212-213.
14. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., **Белоусов Е.В.**, Терентьев В.В., Петелина О.А. Сравнительный анализ фитомассы культур сосны Урала и Западной Сибири // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С. 213-214.
15. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Сопига В.А., **Белоусов Е.В.** Оценка двух способов эмпирического моделирования первичной продукции на примере северных лесов // Экологические проблемы Севера. Вып. 8. Архангельск, АГТУ, 2005. С. 98-100.
16. Усольцев В.А., **Белоусов Е.В.**, Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Сопига В.А. Плотность и влажность фракционного состава фитомассы как необходимые характеристики при оценке углеродного пульпа лесов // Лесопользование, экология и охрана лесов: фундаментальные и прикладные аспекты. Томск: ТГУСУР, 2005. С. 143-145.
17. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., **Белоусов Е.В.**, Залесов С.В., Терин А.А., Терехов Г.Г., Терентьев В.В. Сравнительный анализ надземной фитомассы культур сосны Урала и Западной Сибири // Изв. вузов. Лесной журнал. 2005. № 3. С. 34-42.
18. Усольцев В.А., Крапивина О.А., Залесов С.В., **Белоусов Е.В.**, Сопига В.А., Терентьев В.В.. Оценка запасов углерода в лесных экосистемах Уральского региона // Леса Урала и хозяйство в них. Вып. 26. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С. 40-43.
19. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., **Белоусов Е.В.**, Платонов И.В. Биологическая продуктивность сосновых естественного и искусственно происхождения в Тургайском прогибе // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 10. Брянск: БГИТА, 2005. С. 67-69.

1964-06

Подписано в печать 20.04.06. Заказ № 194. Тираж 100. Объем 1,0 п.л.
620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Уральский государственный лесотехнический университет.
Отдел оперативной полиграфии.