

А  
К 61

\*

графия и регион. IX. Природопользование и экологический мониторинг: Материалы Междунар. научн.-практ. конф. – Пермь, 2002. – С. 129–132. (Галако В. А.).

49. Geographical Gradients of Annual Biomass Production from Larch Forests in Northern Eurasia // Eurasian J. For. Res. – 2002. No. 5. – P. 55–62. (Usoltsev V. A., Kajimoto T., Osawa A., Koike T.).
50. Моделирование роста и строения древостоев на примере сосняков Казахского мелкосопочника. – Деп. в ВИНТИ 15.04.2003., № 714 – 2003. – 212 с.
51. Экологическая продуктивность древостоев в пригородных лесах г. Екатеринбурга // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. – С. 54 – 60. (Галако В. А.)
52. Эколого-биологические особенности устойчивости пригородных лесов // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири. Томск: ТГУ, 2003. – С. 109–112. (Мамаев С. А.)
53. Оценка запасов углерода и углеродно-кислородного бюджета в лесных экосистемах Уральского региона // Региональный конкурс РФФИ "Урал – 2001" / Аннотационный отчет. 2002. – С. 235 – 236. (Усольцев В. А., Грибенников А. Н., Антропов А. И., Марковский В. И. и др.).

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

*Александр Колтунова*

Колтунова Александра Ивановна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА И ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ  
(НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД  
СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ)**

06 03.02. – Лесоустройство и лесная таксация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора сельскохозяйственных наук

Работа выполнена в Уральском государственном  
лесотехническом университете

- Научные консультанты: доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор, заслуженный деятель науки РФ  
Н. А. Луганский
- доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
В. А. Усольцев
- Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
Л. И. Аткина
- доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
С. Л. Шевелев
- доктор сельскохозяйственных наук,  
Р. А. Зиганшин
- Ведущая организация ГУПР по Свердловской области

Защита диссертации состоится 10 июня 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 Уральского государственного лесотехнического университета по адресу: 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета

Автореферат разослан 14 апреля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор, заслуженный лесовод РФ

С. В. Залесов

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** На рубеже тысячелетий человеческое общество столкнулось с глобальным экологическим кризисом, спровоцированным бездумной эксплуатацией природных ресурсов, малоэффективными экологически "грязными" технологиями, господством антропоцентрического принципа в отношениях цивилизации и природы. Парниковый эффект, вызвавший огромное число противоречивых прогнозов о будущем биосферы и человечества (Глобальное потепление..., 1993; Межжерин, 1994; Яблоков, 1995; Уткин, 1995; Сунн и др., 2001; Борисов, Страхов, 2001; Иваненко, 2001; Карнаухов, 2001; Карнаухов, Шаров, 2001; Тарко, 2001; Яншин, 2001; Котляков, 2001; Адушкин и др., 2001; Иноземцев, 2002; Кондратьев, 2002; Башмаков, 2002 и др.), произвел одно неоспоримое на сегодняшний день воздействие, причем не на климат планеты, а на сознание не только представителей научной общности, политической элиты, но и рядовых граждан, которые таким нетривиальным способом были поставлены перед безальтернативной необходимостью признания экологического "императива" (Моисеев, 1988).

Парадигма устойчивого развития однозначно определила биосферостабилизирующие функции бореальных лесов, их роль и значение для выживания человечества (Горшков, 1990; Горшков, Кондратьев 1990; Лосев и др., 1993; Моисеев, 1999, 2001; Степин, 2000; Малхазова, 2001; Кондратьев, Лосев, 2002; Демирчян и др., 2002; Тарко, 2002; Лосев, 2002; Яншин, 2002; Усольцев, 2003; Резолюция..., 2003). Лесной пояс Северной Евразии – гигантская "фабрика" биовещества в масштабах всей планеты – это, прежде всего, леса России, которые составляют более 25% мировых лесных ресурсов (Лесной фонд..., 1999), простираясь от лесотундры и стланиковых тундролесий на севере до лесостепи на юге. Наибольшие площади в бореальных лесах Северной Евразии заняты хвойными породами, в первую очередь это лиственница, затем – сосна и другие хвойные; среди лиственных пород – лидирующие позиции занимает береза. Ареалы этих лесообразователей очень обширны и, в связи со значительными различиями условий произрастания в отдельных регионах, изученность особенностей роста и продуктивности основных лесобразующих пород Северной Евразии, особенно на границах их естественного распространения, все еще недостаточна.

Небывалый информационный всплеск в исследованиях углеродного цикла в биосфере и биопродукционного процесса в лесах выявил необходимость повышения точности оценок фитомассы растительности, совершенствования методов сбора и обработки эмпирических данных. Высокая трудоемкость и протяженность во времени измерительного этапа в исследованиях биопродуктивности лесов закономерно приводит к необходимости исполнения огромного массива количественной информации о лесном фонде, нако-

Научная библиотека  
УГЛТУ  
г.Екатеринбург

пленного в процессе лесоустроительных работ. Изучение биопродуктивности лесных фитоценозов объективно выдвигает в разряд первоочередных задач детальные исследования роста и развития древостоев – доминантных составляющих биогеоценозов.

Эмпирическое моделирование роста и продуктивности древостоев – один из методов познания и выявления закономерностей функционирования этих сложнейших биологических систем, позволяет с известной осторожностью прогнозировать их развитие и пределы возможного хозяйственного их использования. Познание общих закономерностей лесообразовательного процесса, динамики продуктивности лесных фитоценозов базируется на оценке таксационных показателей древостоев при исследовании их роста, строения и структуры. Эмпирические модели этих процессов имеют не только общетеоретическое значение, но позволяют получить широкий спектр практических приложений, в частности, обеспечить лесоустройство необходимыми и крайне актуальными в нынешней ситуации лесотаксационными нормативами для перехода от оценки сырьевых функций лесов к определению показателей их биопродукционного процесса.

Исследования автора проводились в 1970–1999 годах в рамках научно-исследовательских работ Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации в качестве ответственного исполнителя разделов, тем, и руководителя темы согласно темплана НИР (№№ госрегистрации тем: 72006080; 72006056; 76062018; 76062020; 81045783; 81045782; 0068523; 0195РК00470; 0196РК00974), а также в Уральском государственном лесотехническом университете и Ботаническом саду Уральского отделения РАН при выполнении научно-исследовательских работ по грантам: РФФИ "Урал-2001" № 01-04-96424 и РФФИ № 00-05-64532.

**Цели и задачи исследований.** Целью работы явилась дальнейшая разработка на основе системного подхода прикладных и методических положений теории роста и продуктивности древостоев, создание соответствующих эмпирических моделей и таксационных нормативов.

Эта цель достигалась решением следующих задач:

1. Изучить рост и строение сомкнутых древостоев и разработать статистическую модель и нормативы их продуктивности
2. Исследовать товарную и сортиментную структуру древостоев и разработать необходимые нормативы и модели для их таксации.
3. Установить закономерности динамики таксационных показателей модальных древостоев и разработать эмпирическую модель для прогноза их продуктивности.
4. Осуществить прогнозные расчеты биопродуктивности древостоев под воздействием рубок.
5. Исследовать особенности линейного прироста растительных объектов

листьев, побегов, деревьев и древостоев, а также текущего накопления фитомассы в древостоях и осуществить моделирование этих процессов.

6. Изучить возможность индикации почвенных условий по морфометрическим признакам и показателям продуктивности древостоев.

**Научная новизна.** Впервые доказана возможность использования распределений Пирсона для моделирования роста растений и их сообществ на примере сосняков Казахского мелкосопочника, что позволяет обобщить применяемые математические зависимости, аппроксимирующие рост биологических объектов. Разработана методика моделирования роста и строения древостоев с позиций теории распределений, обеспечивающая получение полномасштабного пакета нормативов для таксации леса, включающего таблицы хода роста (ТХР) с сопряженными рядами распределения числа стволов по диаметру в процентном выражении и фактического их количества в соответствующем классе высоты (бонитета) и возрасте таблиц хода роста. На основе рядов распределения разработаны товарные таблицы и их модели для сосны, лиственницы, пихты, березы и осины Северного и Восточного Казахстана, а также таблицы динамики товарной структуры, динамики стоимостной оценки, стандартные таблицы с входами по верхней и средней высоте, дополненные регрессионными коэффициентами надземной фитомассы, сомкнутых сосновых древостоев Казахского мелкосопочника.

Впервые изучена форма и полндревесность стволов осокоря и ветлы поймы р. Иртыш и разработаны нормативы и модели для количественного и качественного учета их древесного запаса.

Осуществлена попытка прогноза динамики продуктивности разногустотных модальных древостоев с учетом характера изменения их относительной полноты на базе рекурсивного принципа построения многофакторных регрессионных моделей. Полученные модели роста и прогнозные таблицы динамики продуктивности разногустотных модальных древостоев позволили на основе совмещения их с моделями оценки фитомассы разработать таблицы биологической продуктивности древостоев.

Впервые показано, что относительная скорость изменения не только основных таксационных показателей древостоев – средних высоты, диаметра, суммы площадей сечений, запаса стволовой древесины, но и их фитомассы, не зависит от древесной породы, географического района и локальных условий местопроизрастания, ее возрастная динамика с высокой точностью аппроксимируется дифференциальным уравнением Пирсона.

Впервые предпринята попытка индикации локальных почвенных условий по запасу надземной фитомассы древостоев с разработкой соответствующих таксационных нормативов.

**Обоснованность и достоверность результатов исследований** обоснована большим объемом экспериментального материала, современными ме-

тодами статистического анализа данных, системным подходом к разработке эмпирических моделей, применением нескольких статистических критериев для оценки достоверности моделей при их верификации, проверкой нормативов в полевых условиях и их многолетним практическим использованием в производстве.

На защиту выносятся следующие основные положения: многофункциональные модели роста и продуктивности древостоев и методы их разработки; методика моделирования строения древостоев и линейного прироста, а также относительной скорости роста фитомассы в древостоях на основе системы кривых Пирсона.

**Практическая значимость.** Результаты работы имеют определенную теоретическую, а также методическую и нормативно-справочную значимость. Для практического использования разработаны "Таблицы хода роста сомкнутых сосновых древостоев Казахского мелкосопочника"; "Таблицы сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0"; "Таблицы динамики товарной структуры сосновых древостоев Казахского мелкосопочника"; "Товарные таблицы" для древостоев сосны Казахского мелкосопочника, березы и осины Северного Казахстана, лиственницы, пихты и осины Восточно-Казахстанской области; сортиментные таблицы для древостоев осокоря и ветлы поймы р. Иртыш, а также ряды распределения числа стволов по ступеням толщины с соответствующими им высотами; модели товарных и сортиментных таблиц. Все эти таблицы включены в: "Справочник по таксации лесов Казахстана" (1980), "Нормативы для таксации лесов Казахстана" ч. I кн. I и кн. II (1987), "Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана" (1987) и в "Основные положения организации и развития лесного хозяйства" Кокчетавской (1976, 1988), Кустанайской (1976) Карагандинской (1981), Целиноградской (1985), Северо-Казахстанской (1987), Павлодарской (1990), Восточно-Казахстанской (1989) областей и внедрены Казахским лесоустроительным предприятием при проведении лесоустроительных работ в лесхозах этих областей (документы о внедрении прилагаются). Таблицы биологической продуктивности сомкнутых сосняков Казахского мелкосопочника и нормальных лиственничников низовьев р. Пур включены в международную сводку нормативов фитомассы лесов Северной Евразии (Усольцев, 2002).

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и практические результаты исследований представлялись и обсуждались на Международных (Брянск, 2000; Пермь, 2002), Всесоюзных и Всероссийских (Пушкино, 1980; Петрозаводск, 1985; Каунас, 1986; Гомель, 1994; Томск, 1995; С.-Петербург, 2000; Новосибирск, 2000; Екатеринбург, 2002) и Региональных (Алма-Ата, 1972, 1973, 1990; Кокчетав, 1978; Щучинск, 1980, 1981; Целиноград, 1991; Караганда, 1993; Томск, 1995, 2003; Кокшетау 1996; Красноярск, 2000; Уфа, 2000) конференциях и совещаниях.

**Личный вклад** автора заключается в постановке проблемы, разработке теоретических и методических ее положений. Часть экспериментального материала была собрана лично автором или под его руководством, некоторая доля (в пределах 20% от общего числа) пробных площадей любезно предоставлена автору А. А. Макаренко, В. М. Кричуном, А. П. Романовым, В. Н. Бирюковым, А. Д. Токаревым – сотрудниками КазНИИЛХА, а также проф. УГЛТУ В. А. Усольцевым, что отражено в совместных публикациях научно-исследовательских работ. Анализ экспериментального материала, разработка моделей и нормативов, обобщение полученных результатов, внедрение законченных НИР выполнены лично автором.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 53 работы, удовлетворяющих п. 11 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, в том числе 4 монографии.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и 17 приложений. Общий объем составляет 480 страниц, основной текст изложен на 296 страницах, иллюстрирован 16 рисунками и сопровождается 67 таблицами. Список литературы включает 727 наименований, в том числе 38 на иностранных языках.

## 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ

**1.1. Динамика роста.** Процесс роста дерева, рост и развитие во времени и пространстве древостоя – проблемы, которым посвящены многочисленные исследования (Орлов, 1925; Тюрин, 1937; Третьяков, 1937; Хильми, 1955; Матвеев-Мотин, 1962; Никитин, 1966; Захаров, 1967; Зейде, 1970; Старков, 1971; Анучин, 1971; Швиденко, 1975; Карманова, 1976; Кузьмичев, 1977; Лиела, 1977; Матузанис, 1977; Загреев, 1978; Свалов, 1979; Терсков, Терскова, 1980; Юдицкий, 1982; Антанайтис, 1985; Казимиров, 1985; Усольцев, 1985; Атропенко, 1986; Кофман, 1986; Хлостов, 1986; Кивисте, 1991; Луганский, Нагимов, 1994; Макаренко, 1996; Зиганшин, 1999; Ильчуков, 1999; Шолохов, 2000; Шевелев, Кузьмичев, 2003 и др.). Выразить рост как функцию времени, внешней среды и вида (Thomasius, 1963) пока еще не представляется возможным, и в таксации по сей день преобладает изучение хода роста как функции времени на основе уравнений роста.

Детальный обзор большого количества функций роста приведен во многих работах (Лир, Польстер, Фидлер, 1971; Карманова, 1976; Кузьмичев, 1977; Свалов, 1978; Römish, 1979; Лиела, 1980; Четвериков, 1985; Кивисте, 1988 и др.). Наличие большого числа различных кривых роста указывает на отсутствие оптимального, всеобъемлющего решения проблемы математического моделирования роста, поэтому предпринимаются попытки идентификации, обобщения ряда функций (Richards, 1959). В этом плане следует считать перспективной аппроксимацию процессов роста с позиций теории

распределений.

**1.2. Биологическая продуктивность.** Изучению продукционного процесса в лесных сообществах в XX веке посвящено значительное количество разномасштабных по значению работ. На конец XX века пришелся поистине лавинообразный поток информации по оценке фитомассы как на локальном, так и на биосферном уровнях, обусловленный глобальным экологическим кризисом.

Значительные методические и обобщающие разработки выполнены А. А. Молчановым (1949, 1971, 1967); Н. П. Ремезовым (Ремезов и др., 1959); А. И. Уткиным (1969, 1970, 1975, 1995; Уткин и др., 1966, 1988, 1994, 1997, 2003); Л. Е. Родиным, Н. И. Базилевич (1965); Л. К. Поздняковым (1967, 1968, 1973, 1975, 1980); В. А. Усольцевым (1972, 1985, 1988, 1997, 1998, 2001, 2002) и др. Значительный вклад в исследования фитомассы лесов основных лесообразующих пород Северной Евразии во второй половине XX и начала XXI веков внесли: В. В. Смирнов (1961, 1963, 1971); В. М. Протопопов, В. М. Горбатенко (1967); В. Н. Габеев (1968, 1976, 1990); Р. Кылли, Р. Кяхрик (1970); В. Д. Луганская, Н. А. Луганский (1970); Н. И. Казимиров, Р. М. Морозова (1973); Н. В. Дылис, Л. М. Носова (1977); А. С. Аткин (1978, 1984); А. И. Бузыкин, Л. С. Пшеничникова (1978); А. И. Марченко, Б. Ф. Рокьянис (1978); М. Г. Семечкина (1978); С. Г. Рождественский (1979); К. Н. Манаков, В. В. Никонов, (1981); Д. Т. Митрофанов (1983, 1984); Я. К. Палуметс (1988, 1990); Н. А. Бабич (1989); Н. А. Луганский, З. Я. Нагимов (1995); А. З. Швиденко, С. Нильссон (1997, 2000); Д. Г. Замолотчиков и др. (1998); А. С. Аткин, Л. И. Аткина (1999); Р. А. Зиганшин (1999); Э. А. Курбанов (2003) и многие другие.

Несмотря на значительную библиографию по проблеме продуктивности лесов, методические аспекты повышения точности учета фитомассы, полномасштабные исследования особенностей накопления всех ее компонентов в лесах различных зон и районов столь же актуальны в наши дни, как и в первой половине двадцатого века.

**1.3. Стрoение и товарная структура.** Динамичность строения древостоев, как неотъемлемое свойство лесного фитоценоза, определяется особенностями его формирования. Форма кривых распределения деревьев по различным таксационным признакам непостоянна, она меняется с возрастом, а кривая нормального распределения характеризует строение древостоев лишь при наличии целого ряда определенных условий. Это положение убедительно проявилось в исследованиях закономерностей строения древостоев во второй половине XX века (Макаренко, 1963, 1967, 1970, 1972, 1982; Никитин, 1963, 1966; Лебков, 1967, 1973; Дыренок, 1969, 1973; Мойсеев, 1971; Гурский, 1973; Свалов, Свалов, 1973; Мошкалев, 1974; Верхунов, 1976; Зиганшин, 2000 и др.). Кривые Пирсона наиболее полно описывают динамику рядов распределения деревьев в древостоях по их размерам с возрастом (Макарен-

ко, 1966, 1967; Никитин, 1966; Дыренок, 1969, 1973, 1977; Мойсеев, 1971; Остромогильская, 1974; Кузьмичев, 1977; Мамаев, 1985; Богачев, Свалов, 1978 и др.). Создание модели строения древостоя – решающий момент для полномасштабного изучения динамики товарной структуры древостоя. А. Г. Мошкалев (1974; Мошкалев и др., 1982), П. М. Верхунов (1976, 1980) однозначно констатируют, что структура запаса древостоев во многом определяется распределением в них деревьев по таксационным признакам.

К настоящему времени в применении математического моделирования при изучении лесных фитоценозов прошла эйфория начала эпохи компьютеризации лесных исследований, выявились определенные проблемы, требующие своего решения. И одним из возможных путей моделирования закономерностей роста и развития древостоев является применение функции распределения вероятностей.

## 2. РАЙОНЫ, МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**2.1. Природные условия.** Самый большой материк Земли (37% поверхности суши) – Евразия, традиционно разделяется на две части света – Европу и Азию, границей которых считается Уральский хребет. Огромные размеры материка определяют наличие в Евразии всех географических поясов Северного полушария. Лесостепная и степная зоны континента – это южная граница Северной Евразии (Физическая..., 1963; Ефремов, 1961; Н. И. Базилевич 1993; Swidenko et al., 1996; В. А. Усольцев, 2001). На рельеф Северной Евразии значительное влияние оказало древнее оледенение (Гроссвальд, 1999). Около 11 млн. км<sup>2</sup> (главным образом в Сибири) заняты многолетней мерзлотой.

Климат Северной Евразии формируется под воздействием таких мощных сезонных центров действия атмосферы как зимний Азиатский антициклон с центром над Монголией и летняя депрессия над Южной Азией (Ефремов, 1961). Огромные размеры Евразии определяют обширное распространение континентальных и резко континентальных типов климата.

**2.2. Лесная растительность.** Обширные территории Северной Евразии заняты лесами, в частности в России, а это основная составляющая указанной природно-ландшафтной части материка; леса произрастают на 719 млн. га (по данным на 01.01.1998 г.), и более 70% площади занято хвойными лесами, при этом на долю лиственницы приходится 37, сосны – 16, пихты – 2, березы – 14, осины – 3% (Лесной..., 1999).

Сосна обыкновенная – один из главных лесообразователей Северной Евразии – по Уральскому меридиану распространяется от тундры до степных просторов Казахстана, меняя продуктивность и морфоструктуру древостоев с изменением широты местности (Мамаев, 1973; Санников, 1992). Исследования были сосредоточены преимущественно в сосновых лесах Казахского

мелкосопочника, березовых и осиновых колках Северного и Восточного Казахстана, осокорниках и ветловниках поймы Иртыша, а также в лиственничных и пихтовых древостоях Восточного Казахстана; кроме того, использована база данных по другим регионам Северной Евразии (Усольцев, 2001, 2002) поэтому более подробно рассмотрены природные условия Северного Казахстана и, прежде всего, Казахского мелкосопочника.

**2.3. Методика и объекты исследований.** Выполнение поставленных программой исследований задач осуществлялось методами эмпирического моделирования с позиций системного анализа (Блауберг, Юдин, 1972).

Закладка пробных площадей, все работы по отбору, обмеру и обработке учетных деревьев проводились в соответствии с общепринятыми в лесной таксации методиками (Горский, 1962; Третьяков и др., 1965; Захаров, 1967; Анучин, 1974; ОСТ 56-69-83). Форма и полнодревесность стволов в древостоях осокоря и ветлы изучалась по методике В. К. Захарова (1967). Составление объемных и сортиментных таблиц проведено в соответствии с существующими требованиями (Составление..., 1977; Требования..., 1980). Разработка моделей сортиментных таблиц (Сортиментные..., 1987) осуществлена с учетом методических положений А. Г. Мошкалева (1974; Мошкалев и др., 1982).

В основе методического подхода к изучению роста древостоев использованы ключевые моменты статистического метода Баура (Орлов, 1925, 1931; Анучин, 1974), дополненного методическими положениями Ф. Корсуня (1935, 1967) и Н. Н. Свалова (1967, 1979). Моделирование динамики стросния одновозрастных сомкнутых древостоев проводилось с учетом методических разработок А. А. Макаренко (1967, 1970, 1972, 1975), базирующихся на теории распределений (Слуцкий, 1912; Лахтин, 1922; Эльдертон, 1924; Кендалл, Споарт, 1966). Динамика товарной структуры исследована по данным пробных площадей о количестве дровяных и деловых стволов и полученным рядам распределения числа стволов таблиц хода роста по ступеням толщины и их высотам.

Построение эмпирической модели роста и продуктивности разногустотных сосняков осуществлено по материалам постоянных пробных площадей, заложенных в чистых одновозрастных сосновых древостоях различной полноты, густоты и производительности. Для аппроксимации сгруппированных экспериментальных данных применялся множественный регрессионный анализ, полученные уравнения зависимости использованы в качестве базовых при моделировании динамики продуктивности разногустотных сосняков. Таблицы биологической продуктивности сомкнутых и разногустотных модельных древостоев сосны Казахского мелкосопочника получены путем совмещения разработанных таблиц их хода роста с моделями В. А. Усольцева (1998) для запасов фитомассы по фракциям древостоев и деревьев сосны этого региона. Биологическая продуктивность приполярных лиственничных дре-

востоев изучалась по методике В. А. Усольцева (1998).

Моделирование продуктивности древостоев в режиме рубок ухода проведено по данным постоянных пробных площадей с учетом методических положений С. Н. Сеннова (1977); А. А. Кайрюкшгиса, А. И. Юодвалькиса (1979) и в соответствии с Наставлением по рубкам ухода в лесах Казахской ССР (Макаренко, Смирнов, 1973). Динамика биологической продуктивности этих древостоев рассчитана по моделям В. А. Усольцева (1998). Моделирование биологической продуктивности древостоев сосны Среднего Урала при различных вариантах рубок главного пользования осуществлено на основе соответствующих таблиц биологической продуктивности этих древостоев (Усольцев, 2002). При оценке биологической продуктивности древостоев в зеленой зоне г. Екатеринбурга использованы материалы лесоустройства.

Исследование моделей роста выполнено по данным хода роста по высоте модельных деревьев, для чего дополнительно закладывались пробные площади в спелых древостоях наиболее распространенных хозяйственных групп типов леса. Закладка пробных площадей и взятие модельных деревьев осуществлены в соответствии с существующими стандартами (ОСТ56-69-83) и методиками, общепринятыми при проведении таких работ (Захаров, 1967; Анучин, 1974).

Моделирование текущего накопления фитомассы в древостоях сосны, березы и лиственницы на территории Северной Евразии выполнено по материалам базы данных пробных площадей о фитомассе древостоев этих пород и сводки таблиц их биологической продуктивности (Усольцев, 2001, 2002).

Оценка биологической продуктивности древостоев сосны и березы в зависимости от почвенных факторов в Боровском лесном массиве осуществлена на основе совмещения таксационной характеристики 617 выделов из материалов лесоустройства с моделями накопления запасов фитомассы по фракциям (Усольцев, 1988) и данных почвенного картирования лесного фонда.

Всего в исследовании задействованы данные 591 пробной площади и 3847 выделов глазмерной таксации различных лет лесоустройства за период с 1926 по 1987 годы. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программ, разработанных в КазНИИЛХА, и программных пакетов *Statgraphics Plus for Windows 2.1*, *Statistica '99 Edition*, *Mathcad 2001 Professional*.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СОМКНУТЫХ ДРЕВОСТОЕВ

**3.1. Рост сомкнутых древостоев.** Опытным материалом, положенным в основу изучения хода роста сосняков Казахского мелкосопочника, послужили данные, сформированные в выборку, в которой одна пробная площадь представляет 1,1 тыс. га, при норме репрезентативности – одна пробная пло-

щадь на 75 тыс. га покрытой лесом площади, занятой древостоями с преобладанием изучаемой породы (Свалов, 1979). Классификационной основой таблиц хода роста был избран класс бонитета. Для построения базовой кривой бонитетной шкалы использованы групповые средние высоты по десятилетиям возраста, по которым рассчитаны индексы кривой с модулем в 100 лет.

Выбор модульного возраста для сосняков в 100 лет обоснован основоположником бонитетных шкал (Орлов, 1931), поэтому в целях унификации таксационных нормативов (Загреев и др., 1975) этот возраст в качестве модуля принят и в наших исследованиях. Аппроксимация индексного ряда осуществлялась аналитически. Наилучшие результаты были получены при использовании дробно-рациональной функции Госфельда, предложенной Ф. Корсунем (Korsun, 1935; Корсунь, 1967) для моделирования процессов роста древостоев. Указанная функция применялась при моделировании роста древостоев достаточно широко (Кивисте, 1988). Она является частным случаем более общих закономерностей, объединяемых дифференциальным уравнением системы кривых Пирсона (Колтунова, 1996).

Уравнение для аппроксимации индексов высот сосняков Казахского мелкосопочника имеет вид

$$H_m = \frac{A_m^2}{0,1796 + 0,1696A_m + 0,6502A_m^2}, \quad (3.1)$$

где  $A_m$  – возраст в относительных величинах;  $H_m$  – индексы высот.

Параметры уравнения найдены способом наименьших квадратов, точность выравнивания составила  $R = 0,996$ .

Следующим этапом была отбраковка пробных площадей по высоте ( $\pm 5\%$ ), кроме того, в сформированной выборке были представлены все классы возраста в пределах класса высоты, и в них насчитывалось не менее 3-4 пробных площадей. Затем для каждого класса оценочной шкалы вычислялись групповые частные средние значения (Свалов, 1979) эмпирических сумм площадей сечений, по которым рассчитывались средние индексы сумм площадей сечений сосняков Казахского мелкосопочника. Уравнение для аппроксимации индексов сумм площадей сечений сосновых древостоев Казахского мелкосопочника, рассчитанное методом наименьших квадратов, имеет вид:

$$\Sigma g_m = 2,8030A_R^{(1,4735-0,3388 \lg A_R)}, \quad (3.2)$$

где  $\Sigma g_m$  – индексы сумм площадей сечений;  $A_R$  – расчетный возраст, значение которого получено как разность между фактическим возрастом древостоев и временем, необходимым для достижения ими высоты 1,3 м. В наших расчетах этот период принят равным 10-ти годам на основании анализа данных пробных площадей. Точность выравнивания данных по уравнению (3.2) составила:  $R = 0,998$ . Рассчитанный по уравнению (3.2) индексный ряд сумм площадей сечений имеет модуль в возрасте 70-ти лет. Обоснованием этого

выбора послужило максимальное количество пробных площадей в IV классе возраста (60-80 лет) и непосредственно в возрасте 70 лет. Значения сумм площадей сечений в указанном возрасте рассчитывались по классам высот на основе функции

$$\Sigma g_n = 17,3724 + 0,8937h_n + 0,0139h_n^2, \quad (3.3)$$

где  $\Sigma g_n$  – сумма площадей сечений класса высоты, м<sup>2</sup>;  $h_n$  – средняя высота класса высоты, м. Точность выравнивания по уравнению (3.3) составляет  $R = 0,996$ . Вычисленный таким образом индексный контур, "кривая-гид" (Корсунь, 1967) в относительных величинах, сопряженная с абсолютными значениями сумм площадей сечений древостоя по классам высот оценочной шкалы в модульном возрасте (своеобразный "скелет" таблиц в виде "креста"), позволяет учесть ход роста древостоя по исследуемому интегральному таксационному показателю, как по возрасту, так и по условиям произрастания.

Аппроксимация видовых высот древостоев сосны Казахского мелкосопочника проведена по уравнению прямой

$$HF = 1,2 + 0,4H, \quad (3.4)$$

где  $HF$  – видовая высота древостоя, м;  $H$  – средняя высота древостоя, м. Точность выравнивания данных по уравнению (3.4) составила:  $R = 0,998$ .

Аппроксимация индексов диаметров осуществлена по уравнению

$$D_m = \frac{A_{Rm}^2}{0,001 + 0,498A_{Rm} + 0,419A_{Rm}^2}, \quad (3.5)$$

где  $D_m$  – индексы диаметров;  $A_{Rm}$  – расчетный возраст в относительных величинах.

Уравнение для выравнивания таксационных диаметров в зависимости от средней высоты классов высот в возрасте 70 лет имеет вид

$$D_m = -1,9033 + 1,1322h_n - 0,0007h_n^2, \quad (3.6)$$

где  $D_m$  – таксационный диаметр, см;  $h_n$  – средняя высота класса высоты, м. Точность выравнивания  $R = 0,996$ .

Полученный таким образом индексный контур, развернутый по времени и сопряженный с условиями местопроизрастания, отражаемыми высотой классов оценочной (бонитетной) шкалы, позволил рассчитать таксационные диаметры сосняков мелкосопочника по классам высот. Запас, среднее и текущее его изменение, число стволов рассчитаны традиционными способами. Все полученные таксационные показатели были сведены в эскизы таблиц хода роста сосняков Казахского мелкосопочника.

**3.2. Динамика строения.** Исследование строения в сосняках мелкосопочника базировалось на использовании кривых Пирсона (Лахтин, 1922; Эльтертон, 1924; Кендалл, Стюарт, 1966; Митропольский, 1971), причем целью этой работы было построение модели распределения числа стволов таблиц хода роста по диаметру и высоте, с тем, чтобы получить комплексные модели

роста и структуры древостоев, отражающие динамику их роста, строения и товарности и позволяющие получить полный комплект лесотаксационных нормативов. Изучение особенностей строения сосняков проведено на основе данных пробных площадей, прошедших отбраковку по высотам и суммам площадей сечений.

В первую очередь анализировались результаты статистической обработки названных пробных площадей, изучались связи основных моментов рядов распределения стволов по таксационным признакам. Аналитическое выравнивание третьего основного момента распределения ( $r_3$ ) – меры асимметрии ряда, четвертого основного момента ( $r_4$ ) – определяющей величины меры крутости ряда ( $E = r_4 - 3$ ), именованного основного отклонения ( $\bar{\sigma}$ ) – показателя рассеяния вариант относительно среднего, проведено по уравнению полинома третьей степени

$$y_i = a_0 + a_1 \bar{x} + a_2 \bar{x}^2 + a_3 \bar{x}^3, \quad (3.7)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение ряда распределения, либо  $r_3$  – в случае выравнивания  $r_4$ . Характеристика параметров уравнений связи приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Характеристика уравнений связи основных статистик рядов распределений деревьев по диаметру и высоте

Ряды распределения	Статистики распределения	Константы				Показатели точности аппроксимации
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	
по диаметру	$\bar{\sigma}$	0,582477	0,593907	-0,022866	0,000353	0,983
	$r_3$	1,604436	-0,167737	0,008545	-0,000165	0,981
	$r_4$	2,575923	-1,042542	2,708749	-0,454115	0,995
по высоте	$\bar{\sigma}$	-0,505000	0,683800	-0,053200	0,001200	0,982
	$r_3$	0,980400	-0,174500	0,012600	-0,000400	0,980
	$r_4$	2,241700	-0,523500	1,980000	-0,156700	0,996

Необходимо отметить, что анализ данных статистической обработки пробных площадей показал, что распределение стволов по таксационным признакам может быть аппроксимировано кривыми типа I Пирсона. Таким образом, фундаментом модели строения древостоев являются полученные по данным пробных площадей уравнения взаимосвязи основных статистик и среднего арифметического значения распределения численностей. Конструируемая модель носит, в известной степени, абстрактный характер по отношению к данным пробных площадей, но, в то же время, достоверно сопряжена с данными таблиц хода роста, так как взаимосвязи ее статистик установлены по материалам пробных площадей, лежащих в основе составленных таблиц и

прошедших жесткую отбраковку по высоте и сумме площадей сечений, а величины среднего арифметического предопределены масштабами ТХР. Таким образом, проведенные расчеты позволили разработать математические модели процентного распределения деревьев по десяти классам толщины и высоты, а затем – ряды распределения сосны Казахского мелкосопочника по ступеням толщины. Полученные ряды строго соответствуют данным таблиц хода роста, т. е. являются их закономерным продолжением. Для них были найдены все основные статистики распределения, что позволило проконтролировать правильность вычислений. Отклонения между статистиками распределения на входе и выходе модели строения практически несущественны:  $\chi^2_{факт.} = 0,054 < \chi^2_{0,5} = 18,3$ , при  $f = 10$  для показателя асимметрии, и  $\chi^2_{факт.} = 0,002 < \chi^2_{0,5} = 23,7$ , при  $f = 14$  для меры рассеяния вариант. Также в целях контроля для рядов распределения деревьев по ступеням толщины были вычислены суммы площадей сечений, которые затем сравнивались с соответствующей суммой площадей сечений из таблиц хода роста. Отклонения расчетных данных таблиц хода роста не превышают  $\pm 5\%$ .

Обработка полученных рядов распределения деревьев на пробных площадях по высоте идентична системе расчета для рядов распределения по диаметру. Контроль точности расчетов осуществлялся сопоставлением величин статистик распределения на входе и выходе модели строения по высоте. Отклонения, как и в случае модели по диаметру, практически несущественны ( $\chi^2 = 0,0002 < \chi^2_{0,5} = 16,9$  при  $f = 9$  для  $r_3$ ).

Кроме изучения кривых распределения был проведен анализ строения древостоев при помощи редукционных чисел. Рассмотрение приведенных данных показывает, что редукционные числа не стабильны, они изменяются с возрастом, и, таким образом, в определенной степени зависят от среднего диаметра древостоя. Эта тенденция отмечена многими исследователями (Никитин, 1966; Лебков, 1967; Макаренко, 1967, 1967; Гурский, 1974; Верхунов, 1976; Зиганшин, 2000).

Изменчивость высот по сравнению с диаметрами меньше в 1,5-2 раза, коэффициент вариации в рядах распределения по высоте вначале (до высоты 3-4 м) возрастает, а затем снижается с повышением средней высоты древостоя. На основе полученных рядов распределения вычислены редукционные числа по среднеарифметическим высотам (Нормативы..., 1987), которые явились базой расчета верхней высоты древостоев, в свою очередь обеспечившей составление местной стандартной таблицы.

Наилучшие результаты при аппроксимации сумм площадей сечений таблиц хода роста в зависимости от их верхней высоты обеспечила парабола 3 порядка

$$\Sigma g = 1,19110 + 2,00543H_a + 0,01104H_a^2 - 0,00094H_a^3, \quad (3.8)$$



точность выравнивания данных по модели  $R = 0,992$ .

Моделирование запаса осуществлено по уравнению полинома четвертой степени

$$M = 5,68100 + 5,04588H_{cp} - 0,52143H_{cp}^2 + 0,09472H_{cp}^3 - 0,0021H_{cp}^4, \quad (3.9)$$

точность выравнивания составила  $R = 0,996$ .

Разработанная таблица сумм площадей сечений и запасов сосняков Казахского мелкосопочника при полноте 1,0 дополнена конверсионными коэффициентами фитомассы:

$$\frac{P_{abo}}{M} = \frac{1,115080 + 0,260756H_{cp}}{0,935221 + 0,695764H_{cp} - 0,000024H_{cp}^2}, \quad (3.10)$$

где  $P_{abo}$  – запас надземной фитомассы, т/га;  $M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;  $H_{cp}$  – средняя высота, м. Точность выравнивания  $R = 0,963$

Разработанная эмпирическая модель роста и строения древостоев обладает широким диапазоном возможностей, в частности, полученные ряды по диаметру и высоте числа стволов таблиц хода роста позволяют рассчитать ряды распределения деревьев отпада по толщине и установить их запас.

Вычисленные по рядам отпада суммарная численность его стволов и запас были введены в таблицы хода роста и использованы для расчета общей производительности древостоев, по которой определены величины текущего и среднего прироста.

**3.3. Товарная структура.** Следующим этапом исследования динамики древостоев на базе разработанной модели является установление их качественной структуры. Для этих целей использовались полученные процентные ряды распределения и данные пробных площадей о наличии деловых стволов в ступенях толщины. Последние послужили основой для расчета процентов деловых деревьев по ступеням толщины в зависимости от среднего диаметра древостоя и позволили установить распределение числа стволов в ступенях толщины по категориям технической годности. Полученные процентные ряды распределения деловых и дровяных деревьев сосны Казахского мелкосопочника подвергнуты сортиментации по местным сортиментным таблицам (Макаренко, 1965).

Товарные таблицы для березы Северного Казахстана, лиственницы и пихты Восточно-Казахстанской области, а также осины Северного и Восточного Казахстана разрабатывались в той же последовательности, что и для древостоев сосны. Моделирование выхода сортиментов по категориям крупности, сортам и видам, в классах товарности товарных таблиц осуществлено в зависимости от среднего диаметра древостоя по полиномам 2-4 порядков. Сравнивая составленные товарные таблицы с нормативами для других регионов, можно отметить, что: древостои основных лесообразующих пород Северного и Восточного Казахстана имеют меньший диапазон средних диаметров, выход деловой древесины в них несколько ниже. По

ров, выход деловой древесины в них несколько ниже. По особенностям товарной структуры леса основных лесообразующих пород Северного Казахстана ближе всего к соответствующим древостоям Северо-Запада европейской части России. Если сопоставлять товарную структуру основных древесных пород Казахстанского Алтая с древостоями из районов произрастания равнинных лесов (Сортиментные..., 1987; Лесотаксационный..., 1991; Сортиментные..., 2002) то следует отметить что по основным показателям товарности эти древостои, за исключением осинников, не имеют особенных отличий. Осинники Казахстанского Алтая имеют самый низкий показатель выхода деловой древесины по всем районам сравнения, включая Северный Казахстан.

**3.4. Сортиментная структура.** Форма стволов представляет собой важный объект исследований в лесной таксации. Она всегда имеет некоторые различия в зависимости от биологических свойств лесных пород, от влияния многочисленных факторов внешней среды, которые трудно учесть. Для установления формы столов обычно применяются приближенные методы (Захаров, 1956, 1964, 1967; Кофман, 1986). В основе методики составления объемных таблиц В. К. Захарова лежат результаты изучения формы древесных стволов по относительным высотам и установленные закономерности изменения среднего относительного сбега отдельных древесных пород в зависимости от диаметра на 0,1 высоты стволов. При изучении нормальных видовых чисел для тополя черного поймы р. Иртыш были получены следующие их значения в коре –  $f_n = 0,462 \pm 0,003$ ; без коры –  $f_n = 0,477 \pm 0,003$ . Для ветлы соответственно:  $f_n = 0,484 \pm 0,003$ ;  $f_n = 0,500 \pm 0,004$ . Установлено, что нормальные видовые числа ветловников и осокорников поймы р. Иртыш практически не зависят от диаметра и высоты деревьев. Данное положение подтверждает гипотезу В. К. Захарова (1964), а также согласуется с выводами В. М. Бедика (1695) и А. С. Головачева (1966) для сосны. Коэффициент изменчивости нормальных видовых чисел осокоря равен в коре – 6,9%, без коры – 7,3%; ветлы соответственно: 9,4% и 9,8%. Полученные данные явились основой сортиментных таблиц осокоря и ветлы (Макаренко, Колтунова, 1972; Сортиментные..., 1987). Моделирование параметров сортиментных таблиц проведено по полиномам 2-4 степени в зависимости от диаметра на высоте 1,3 м (Нормативы..., 1987).

Опытно-производственной проверкой составленных таблиц установлено, что при учете ликвидной древесины систематическая ошибка для осокоря составила +2,55%, для ветлы +2,65%; случайная ошибка после исключения систематической составила соответственно  $\pm 1,34\%$  и  $\pm 2,01\%$ . Систематическая ошибка при определении запаса деловой древесины осокоря равна +7,45%, ветлы +7,40%; случайная соответственно:  $\pm 2,33\%$  и  $\pm 0,28\%$ .

**3.5. Таблицы биологической продуктивности.** Таблицы биологической продуктивности – закономерное развитие таблиц хода роста, составляются на основе моделей роста и биологической продуктивности древостоев. Наиболее детально проработанной является методика В. А. Усольцева (1985, 1988, 1998, 2002), основанная на рекурсивном принципе и многофакторных регрессионных моделях, которые позволяют совмещать таблицы хода роста с данными о накоплении фитомассы. Для расчета фитомассы в рядах распределения стволов Казахского мелкосопочника по ступеням толщины использованы модели, разработанные В. А. Усольцевым (1988) для этих сосняков. Для рядов отпада стволов сосны применен аналогичный подход, в результате которого получены "полные" таблицы биологической продуктивности сосны Казахского мелкосопочника

При моделировании весовых показателей генеративных органов древостоев березы по данным пробных площадей анализировались взаимосвязи массы почек с морфометрическими признаками деревьев. Для целей аппроксимации выявленных связей использовано следующее уравнение

$$P_i = -1,3585 + 0,6774d_i^2 + 1,1946h_i, \quad (3.11)$$

где  $P_i$  – масса почек, г.;  $d_i$  – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см;  $h_i$  – высота дерева, м. Точность аппроксимации данных составила:  $R = 0,974$ .

Таблицы биологической продуктивности традиционно создаются совмещением регрессионных моделей динамики фитомассы с таблицами хода роста. Поскольку для приполярных лиственничников Западной Сибири таких таблиц нет, была осуществлена попытка совместного составления таблиц хода роста и таблиц биопродуктивности древостоев лиственницы (Усольцев, Колтунова 2000). Исследования выполнены в Ямало-Ненецком национальном округе (Тюменская обл.) и в Тарко-Салинском лесхозе, где было заложено 17 пробных площадей, из них 4 на плакорях по правому берегу р. Пур и в сомкнутых древостоях надпойменных террас (Усольцев и др., 1999), на которых по ступеням толщины взято на фитомассу 111 модельных деревьев. Таблицы биопродуктивности древостоев лиственницы получены табулированием рекурсивных многофакторных регрессионных уравнений.

Разработанные таблицы биологической продуктивности древостоев предоставляют возможность учета биосферных функций лесов при проведении лесоинвентаризационных работ, что в современных условиях позволяет считать их создание безусловно актуальным как с научных, так и с практических позиций.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ МОДАЛЬНЫХ ДРЕВОСТОЕВ

**4.1. Взаимосвязь полноты и густоты древостоев с их продуктивностью.** Густота – число стволов на единице площади, и полнота – степень плотности заселения деревьями местообитания, в значительной мере опреде-

ляют продуктивность насаждений (Кайрюкштис, 1969; Луганский, 1974; Рубцов и др., 1976; Сеннов, 1977, 1984; Атрохин, 1980; Нагимов, 1984, 1986; Луганский, Залесов, 1993; Бузыкин и др., 2002 и др.).

Полнота древостоев столь же существенный фактор их продукционного процесса, что и густота. Исходя из установленной В. К. Хлюстовым (1986) закономерности изменения текущего прироста в зависимости от полноты в сосняках Казахского мелкосопочника и уровней критической полноты (Assman, 1961), можно установить в первом приближении критическую полноту спелых древостоев сосны Казахского мелкосопочника, которая составляет 0,937.

Процесс отпада деревьев в древостоях, так же как и текущий прирост, существенно влияет на динамику их продуктивности (Тарашкевич, 1935; Сеннов, 1971, 2001; Макаренко, 1996). По нашим данным, в сосняках мелкосопочника в возрасте от 20 до 150 лет соотношение средних диаметров стволов отпада и древостоя не превышает 73%, т. е. выражен преимущественно низовой отпад. Распределение деревьев отпада по ступеням толщины в возрасте от 20 до 50 лет в зависимости от класса бонитета имеет спадающую форму, а затем колоколообразную. Возрастная динамика отпада стволов характеризуется вогнутой кривой. С достаточной точностью особенности этого процесса отражает дифференциальное уравнение системы кривых Пирсона, так, для сомкнутых сосняков Казахского мелкосопочника IV класса бонитета оно имеет следующий вид

$$\frac{dy}{y} = \frac{0,725 - 14,497x}{47089 - 4,113x + 0,100x^2} dx, \quad R^2 = 0,998, \quad (4.1)$$

где  $\frac{dy}{y}$  – отпад стволов в относительных величинах;  $x$  – возраст, лет.

**4.2. Прогнозные таблицы хода роста разногустотных модальных древостоев.** Моделирование продуктивности древостоев различной полноты и густоты в сосняках Казахского мелкосопочника осуществлено на базе множественного регрессионного анализа взаимосвязей таксационных показателей. Реализован подход "что будет, если ..." и рекурсивный принцип эмпирического моделирования, детально разработанные В.А. Усольцевым (1998).

Анализ взаимосвязей таксационных показателей по данным наблюдений на постоянных пробных площадях, дополненных сведениями 221 временной пробной площади, позволил установить, что основные таксационные показатели древостоя, а так же прирост и отпад стволов, зависят от возраста, условий произрастания – класса бонитета, густоты и относительной полноты насаждения. Эти показатели и были выбраны в качестве независимых переменных при разработке эмпирической модели роста и продуктивности древостоев различной густоты и полноты. Полнота в прогнозных расчетах пока-

затель динамичный, она изменяется по мере увеличения возраста – в приведенном варианте моделей полнота возрастает к возрасту спелости. Такая тенденция изменения этого показателя соответствует фактическим данным пробных площадей. При разработке эмпирических прогнозных моделей продуктивности класс бонитета принят стабильным, варианты его возможных изменений с возрастом не рассматривались. Все полученные показатели группировались в матрицы по классам бонитета, в пределах последнего – по возрасту, по полноте и густоте. Составленные матрицы явились исходным материалом для расчета уравнений связи основных таксационных показателей: среднего диаметра и высоты, а так же отпада по числу стволов и запасу и т. д. На основе матриц рассчитывались математические модели статического состояния древостоев в исходном возрасте. Затем проводился расчет коэффициентов текущего прироста по запасу на основе модели, разработанной для сосняков мелкосопочника В. К. Хлюстовым (1986), которая несколько видоизменена, поскольку расчет осуществлялся в зависимости от полноты наращивания (Тарашкевич, 1935) и отпада по числу стволов и запасу. Полученные модели позволяли приступить непосредственно к моделированию хода роста древостоев различной полноты, густоты и производительности. Стартовыми данными являются исходные показатели моделируемого древостоя – как заданные: класс бонитета, возраст, полнота, густота, запас, так и вычисленные – средние диаметр и высота.

Средние высота и диаметр статических состояний древостоев вычисляется по уравнению

$$Y = \exp(-a_0 + a_1 \ln A - a_2 \ln N_{исх} - a_3 \ln H_{40} - a_4 \ln P_{об} - a_5 \ln^2 A), \quad (4.2)$$

где  $A$  – возраст, лет;  $N_{исх}$  – исходное число стволов, шт.;  $H_{40}$  – высота класса бонитета в 40-летнем возрасте, м;  $P_{об}$  – исходная полнота древостоя.

Параметры моделей исходных (статических) состояний древостоев приведены в таблице 4.1.

По исходным данным проводится расчет всех показателей прогнозных таблиц хода роста; вначале вычисляется число стволов отпада по уравнению множественной регрессии:

$$N_{омн} = \exp(a_0 + a_1 \ln(A - n) + a_2 \ln H_{40} + a_3 \ln N + a_4 \ln P_{об}), \quad (4.3)$$

где  $n$  – период прогноза, принят равным 10 годам, густота и полнота берутся в возрасте  $(A-n)$ ; Константы уравнения (4.3) по классам бонитета приведены в таблице 4.2.

Затем рассчитывается запас отпада на период прогноза:

$$M_{омн} = f(A - n, N_{омн}, P_{об}, H_{40}). \quad (4.4)$$

Таблица 4.1

Характеристика уравнения множественной регрессии (4.2)

Показатель	Класс бонитета	Константы						R <sup>2</sup>	SE
		A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>		
Высота	III	-0,44216	3,90364	-0,05661	–	–	-0,38808	0,998	0,112
	IV	-53,96130	3,92613	-0,05561	22,259	–	0,39031	0,993	0,187
	V	2,20499	3,83427	-0,06378	–	0,00657	-0,38094	0,995	0,154
	Va	-5,36563	3,88487	-0,05972	–	0,00082	-0,38634	0,998	0,089
Диаметр	III	-7,47168	1,19088	-0,49442	4,7232	0,43447	-0,11819	0,998	0,103
	IV	-12,29650	1,21145	-0,49796	7,4103	0,45729	-0,12079	0,998	0,090
	V	-2,17614	1,47762	-0,49837	2,6636	0,32544	-0,15293	0,990	0,217
	Va	2,17970	1,33433	-0,49972	0,6265	0,52320	-0,13759	0,998	0,115

Уравнение множественной регрессии имеет вид (константы уравнения – табл. 4.2):

$$M_{омн} = a_0 + a_1(A - n) + a_2 P_{об} + a_3 N_{омн} + a_4 P_{об} (A - n)^2 + a_5 N_{омн} (A - n)^2 + a_6 P_{об} H_{40} + a_7 P_{об} N_{омн} \quad (4.5)$$

Остальные показатели рассчитываются общепринятыми способами с учетом методических подходов А. И. Тарашкевича (1935) и В. К. Хлюстова (1986).

Таблица 4.2

Характеристика уравнений множественной регрессии (4.3) и (4.5)

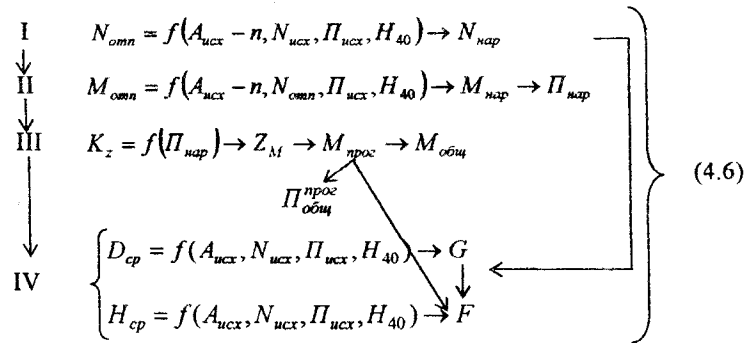
Константа	Показатель по классам бонитета							
	Число стволов отпада $N_{омн}$				Запас отпада $M_{омн}$			
	III	IV	V	Va	III	IV	V	Va
A <sub>0</sub>	-4,37779	-0,57135	-1,16780	23,57690	0,57138	7,28803	7,66124	8,38914
A <sub>1</sub>	-0,21791	0,15810	0,16690	0,07435	-0,00905	-0,11577	-0,12670	-0,14852
A <sub>2</sub>	0,42788	-4,07120	-4,41277	–	0,97307	0,74257	0,26000	0,38551
A <sub>3</sub>	0,48308	1,67452	1,69394	1,60496	-0,07495	-0,07144	-0,08525	-0,05161
A <sub>4</sub>	1,87513	0,56204	0,41401	0,47192	0,00011	0,00128	0,00151	0,00160
A <sub>5</sub>	–	–	–	–	0,00004	0,00003	0,00002	0,00002
A <sub>6</sub>	–	–	–	–	-0,13627	-0,70071	-0,88500	-1,15116
A <sub>7</sub>	–	–	–	–	0,15922	0,16338	0,21413	0,13110
R <sup>2</sup>	0,975	0,985	0,987	0,974	0,854	0,843	0,842	0,852
SE	0,153	0,142	0,134	0,181	0,213	0,311	0,313	0,283

Общий вид системы рекурсивных зависимостей эмпирической модели хода роста древостоев сосны Казахского мелкосопочника различной исходной густоты и полноты представлен системой уравнений (4.6). Проведенные по данной системе уравнений расчеты динамики роста и продуктивности древостоев сосны Казахского мелкосопочника, отправной точкой которых были, кроме данных постоянных и временных пробных площадей, таблицы хода роста сомкнутых древостоев, позволили получить прогнозные таблицы роста

модальных древостоев различной полноты, в пределах последней – широкого диапазона густоты и производительности, учитывающие в определенной мере типы формирования древостоев, поскольку полнота в этих таблицах динамична.

Представленная в данной работе методика расчетов обеспечивает необходимую точность прогноза, она проверена на данных таблиц хода роста сомкнутых древостоев сосны Казахского мелкосопочника, а также по данным наблюдений за динамикой продуктивности древостоев различной полноты на 12 постоянных пробных площадях, на которых в течение 20–40 лет проводились повторные перечеты и учет естественного отпада.

Для ТХР IV класса высот сомкнутых древостоев систематическая ошибка для запаса составила 0,6%; числа стволов – 14,5%; случайная – соответственно 1,1 и 6,3%. Для постоянных пробных площадей пределы ошибок при определении запаса и числа стволов оказались следующими: при прогнозе на 20 лет по данным 4-х постоянных пробных площадей систематическая ошибка в определении запаса составила от -10,1 до +0,6%, случайная – 0,2–3,7%; при прогнозе запаса на 30 лет по данным 8-ми постоянных пробных площадей соответственно от -20,9 до +4,4%, и 3,2–11,1%. При прогнозе числа стволов на 20 лет по данным 4-х постоянных пробных площадей систематическая ошибка составила от -14,2 до +11,3%, случайная – 4,6–13,6%; при прогнозе на 30 лет по данным 8 постоянных пробных площадей соответственно –



от -1,3 до +14,9%, и 1,1–8,4%. Полученные данные указывают на высокую точность длительного точечного прогноза динамики продуктивности насаждений по предлагаемой методике. Для практического использования предложены минимальные (критические) значения полноты молодых, средневозрастных и приспевающих древостоев сосны Казахского мелкосопочника, обеспечивающие в возрасте 100 лет полноту 0,9 и более. Они могут применяться при корректировке интенсивности изреживания древостоев и составлении программ рубок ухода.

**4.3. Таблицы биологической продуктивности модальных древостоев.**

Оптимальная стратегия природопользования в лесном комплексе возможна лишь при детальном учете особенностей продукционного процесса в древостоях и его долгосрочном прогнозировании. Эту задачу в отечественном лесоводстве призваны решить традиционные таблицы хода роста, в настоящее время активно трансформируемые в таблицы биологической продуктивности насаждений (Усольцев, 2002). Для составления таблиц биологической продуктивности модальных древостоев сосны Казахского мелкосопочника использованы разработанные прогнозные ТХР. Запасы фитомассы по фракциям в таблицах биологической продуктивности рассчитаны по моделям В. А. Усольцева (1988) для сосняков данного региона. Анализируя составленные таблицы биологической продуктивности, можно констатировать (рис. 4.1), что продуцирование хвои и скелета кроны к возрасту спелости утрачивает связь с относительной полнотой древостоя и зависит только от густоты. Характерное для возраста 20 лет нарастание фитомассы хвои с увеличением густоты в древостоях с полнотой 0,6 – 0,8 сменяется к 30-летнему возрасту стабилизацией показателей, начиная с густоты 8000 экземпляров на гектаре, повторяя характер кривой высокополнотных древостоев. наибольшие запасы фитомассы кроны отмечены (кроме возраста 20 лет) в древостоях с густотой, меньшей 2000 экземпляров на гектаре.

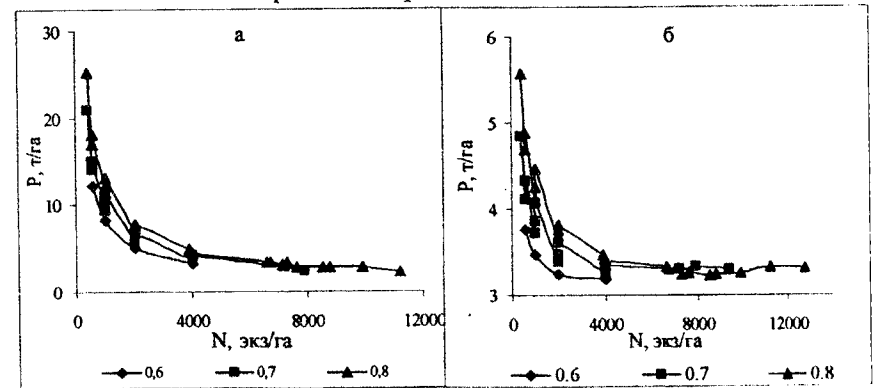


Рис. 4.1 Зависимость фитомассы ветвей (а) и хвои от густоты для различной полноты в возрасте 80 лет (III бонитет)

**5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ В РЕЖИМЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**5.1. Рост и продуктивность древостоев под воздействием рубок ухода.** На современном этапе развития науки о лесе в разряд первоочередных выдвигается задача количественного описания роста древостоев, формирующихся в режиме антропогенного воздействия. Выявлению пороговых уровней

воздействия на древостой, оптимальных целевых режимов ухода посвящены усилия нескольких поколений лесоводов, начиная с А.Т. Болотова и А. Теплоухова, А.Ф. Рудзкого и А.П. Молчанова (Ткаченко, 1956). На протяжении всей истории лесоводства сосновые насаждения были объектом активного хозяйствования, однако разработка научно обоснованной системы мер хозяйственного воздействия на древостой в значительной степени обусловлена географическими особенностями условий местопроизрастания, поскольку ареал сосны очень обширен.

Исследования по разработке системы рубок ухода в сосняках Казахского мелкосопочника проводятся в течение более 50 лет (Юновидов, 1952; Макаренко, 1965; Макаренко, Смирнов, 1975; Макаренко, Муканов, 2002). Необходимое дополнение к существующим нормативным документам по формированию древостоев представляют собой программы рубок ухода, регламентирующие проведение разреживаний и оптимизирующие их режим с учетом биологических особенностей древостоя. Базой составленной программы послужили таблицы хода роста загущенных сосновых древостоев Казахского мелкосопочника (Макаренко, Смирнов, 1973), и результаты наблюдений за ростом древостоев в различных режимах разреживаний на постоянных пробных площадях. Моделирование исходных таксационных показателей (без ухода) хода роста древостоев осуществлено по уравнению Бакмана-Корсуня, моделирование рубок – графоаналитическим методом.

Производительность и прирост древостоев в течение всего периода лесовыращивания сохраняются на уровне контрольных участков без ухода, средний диаметр древостоя с изреживанием к моменту завершения программы возрастает в 1,5 раза, средняя высота – на 9%. Рассматриваемая программа рубок ухода является частью таблиц хода роста сухих сосняков Казахского мелкосопочника, формирующихся в режиме оптимального хозяйственного воздействия. Программа, кроме того, представлена графиком (рис. 5.1). Полнота 0,7 является пороговым уровнем изреживания, полнота 0,9 взята в качестве критерия для установления возраста очередного приема рубок ухода.

Таблица биологической продуктивности древостоев сосны Казахского мелкосопочника, формирующихся в режиме хозяйственного воздействия, разработана совмещением моделей В. А. Усольцева (1988) с таблицами хода роста древостоев в режиме рубок ухода на основе рекурсивного принципа моделирования. Прогноз по запасу фитомассы древостоев, формирующихся в режиме ухода обеспечивает достаточно близкое сходжение данных со сведениями о подеревной фитомассе в загущенных молодняках (Нормативы..., 1987), так в возрасте 15–30 лет расхождения по итоговым данным колеблются в пределах 0,7–4,2%, наибольшие отклонения характерны для запасов хвой, однако они не превышают 10%.

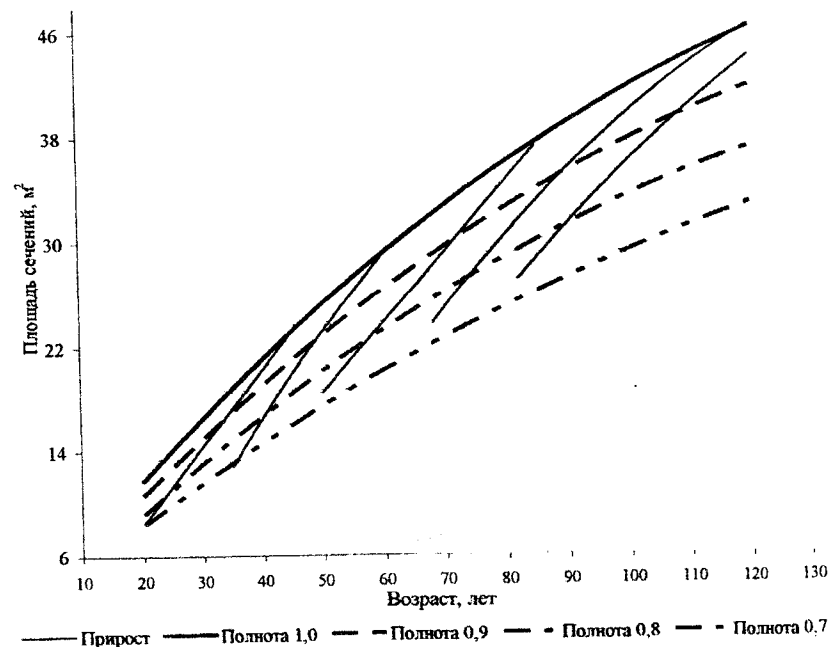


Рис. 5.1. Программа рубок ухода в сухих сосняках

**5.2. Прогноз продуктивности древостоев при различных вариантах рубок главного пользования.** Сырьевые функции лесов, приоритетное значение которых было бесспорным на протяжении всего периода существования человеческой цивилизации, в конце прошлого века закономерно отступили на второй план перед биосферной ролью лесных ресурсов. Ведение хозяйства в лесу в настоящее время требует детального экологического обоснования, поскольку всевозрастающая вырубка вносит весомый вклад в дисбаланс углерода в атмосфере и связанные с ним нежелательные изменения климата. Поэтому современные технологии рубок должны разрабатываться с учетом их влияния на углерододепонирующую и кислородопroduцирующую функции лесов.

Таблицы биологической продуктивности древостоев являются исходными данными для расчета изменения запасов и депонирования углерода после проведения рубок. Созданная база данных о фитомассе лесов по природным зонам для основных лесообразующих пород Северной Евразии, позволяет проводить верификацию разработанных моделей, обеспечивая контроль теоретических расчетов. В данной работе использованы таблицы биологической продуктивности сосновых древостоев I класса бонитета Среднего Урала

(Усольцев, 2002).

Анализ имеющихся сведений в базе данных по фитомассе лесов основных лесообразующих пород Северной Евразии позволяет констатировать, что текущее изменение запаса надземной фитомассы древостоев с относительной полнотой менее единицы, выраженное в долях прироста максимально сомкнутого древостоя, взаимосвязано с соотношением запасов стволовой древесины этих насаждений. Таким образом, установить величину текущего изменения запаса фракций фитомассы, а, соответственно, и величину приращения депонированного в фитомассе углерода, после проведения рубок возможно на основе следующего уравнения

$$\frac{Z_{Pi}}{Z_{P_{исх}}} = \left( \frac{M_i}{M_{исх}} \right)^U, \quad (5.1)$$

где  $Z_{Pi}$  – текущее изменение запаса фракции фитомассы после рубки, т/га в год;  $Z_{P_{исх}}$  – текущее изменение запаса фракции фитомассы до рубки, т. е. в исходном возрасте, т/га в год;  $M_i$  – запас древостоя после рубки, м<sup>3</sup>/га;  $M_{исх}$  – запас древостоя до рубки, м<sup>3</sup>/га.  $U$  – переменная, величина которой наиболее тесно коррелирует с долей выборки запаса при проведении рубки, %.

Для верификации прогнозной модели продуктивности сосновых древостоев после проведения различных вариантов несплошных рубок осуществлен расчет показателей текущего изменения запаса фракций фитомассы среднего дерева по данным контрольного варианта, таблиц биологической продуктивности сосняков Карелии при полноте 0,80 и 0,65 (Усольцев, 2002) и прогноза изменения продуктивности после различных по интенсивности выборки запаса рубок, который подтвердил достаточную адекватность прогноза. В частности, через 20 лет после рубки половины наличного запаса стволовой древесины в сосняках биопродуктивность оставшегося древостоя достигает 66,8% контрольных показателей общей надземной фитомассы и запасов углерода. Фитомасса подроста в этом случае составляет 2,6% от общей продуктивности древостоев, что почти в 2 раза больше, чем при выборке 20% запаса, и в 1,5 раза больше, чем при проведении первого приема постепенной рубки с выборкой 30% запаса.

**5.3. Оценка продуктивности древостоев в зеленой зоне г. Екатеринбург.** Леса зеленой зоны г. Екатеринбург имеют огромное экологическое и рекреационное значение, поэтому детальная их оценка должна включать исследование всех видов продуктивности. Более подробно вопросы оценки продуктивности лесного фонда рассмотрены на примере Верх-Исетского лесхоза.

Биологическая продуктивность лесного фонда Верх-Исетского лесхоза в целом составляет около 7 млн. т, возрастная динамика накопления фитомассы древостоями позволяет заключить, что наибольшие запасы сосредоточены

в приспевающих и спелых древостоях, что обусловлено возрастной структурой лесного фонда данного лесхоза, запасы углерода оцениваются в 3,2 млн. т, из них на долю сосны приходится 2,3 млн. т, березы – 0,8 млн. т, на остальные породы – 0,1 млн. т.

## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ НА ОСНОВЕ

### ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

**6.1. Рост деревьев.** Применение математических методов к анализу лесохозяйственной информации имеет своей целью построение моделей, адекватных фактическим данным и позволяющим оценивать состояние и прогнозировать развитие изучаемого объекта. В предыдущих главах на основе эмпирического подхода были проиллюстрированы широкие возможности системы распределений Пирсона при изучении динамики лесных объектов. Функции распределения и плотности вероятности – суть функции роста и прироста динамических систем (Кивисте, 1988), которыми и являются лесные фитоценозы и составляющие их особи. Гибкость функций плотности вероятности обеспечивает получение огромного разнообразия различных форм кривых, отражающих все возможные закономерности в процессе прироста древостоев. Являясь наиболее общим видом распределения случайной величины, четырехпараметрическое уравнение Пирсона относится к классу дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом (Эльсгольц, Норкин, 1971), позволяющим учитывать предысторию развития биосистемы (Жирмунский, Кузьмин, 1982).

Рост и прирост – взаимообусловленные процессы, и должны изучаться как единое целое (Кузьмичев, 1977). Нельзя рассматривать изолированно и рост деревьев, и рост древостоев, поскольку последние – совокупность первых, особенности ростовых процессов у них взаимоувязаны и имеют общий характер.

Оценка результатов моделирования роста деревьев по высоте на основе некоторых функций, включая кривые Пирсона, представлена в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Результаты попарного сравнения расчетных и эмпирических данных роста по высоте деревьев сосны

№ модели	Авторы уравнений	Остаточная дисперсия	Отношение дисперсий	Точность выравнивания
22	Пирсон	0,255	4,34	0,998
	Корсунь	0,750	12,74	0,991
	Корсунь, Бакман	0,674	11,44	0,983
	Дракин, Вуевский	0,503	8,54	0,996
	Вейбулл	0,021	6,96	0,997

Проведенные расчеты позволяют считать, что кривые Пирсона обеспе-

чивают достаточную адекватность расчетных кривых исходным замерам, в то время как широко известные ростовые функции не обладают столь безусловным преимуществом. Аналогичные результаты получены и при исследовании отдельных частей растительных объектов – листьев и побегов.

**6.2. Рост древостоев.** Значительный интерес представляет испытание названных кривых для моделирования роста растительных сообществ, в частности, древостоев. Для этих целей использованы данные 183 пробных площадей, которые группировались по классам высот (местным классам бонитета).

Исследование проводилось на основе связей таксационных показателей с возрастом как в пределах класса высот, так и без учета его влияния в целом для всей совокупности древостоев. Полученные в результате расчетов данные сравнивались с фактическими, для уменьшения разброса поля точек и более четкого выявления тренда изменения таксационного показателя в зависимости от возраста, необходимо проводить предварительное выравнивание эмпирических данных о росте по способу взвешенного скользящего среднего. Результаты попарного сравнения расчетных и эмпирических данных, подвергнутых такому выравниванию приведены в табл. 6.2, анализируя данные которой, можно заключить, что применение кривых Пирсона для выравнивания хода роста древостоев по высоте, диаметру, сумме площадей сечений дает удовлетворительные результаты.

Таблица 6.2

Результаты попарного сравнения сглаженных фактических и расчетных данных хода роста древостоев сосны Казахского мелкосопочника

Уравнение	Статистики	IV Класс высот			Древостой в целом		
		H	D	$\Sigma g$	H	D	$\Sigma g$
Пирсона	$\bar{\sigma}_z$	0,179	1,105	0,228	0,166	0,231	0,282
	$\bar{\sigma}_z/\bar{\sigma}_x \cdot 100\%$	5,710	2,450	4,890	10,64	5,250	13,30
	R	0,998	0,998	0,998	0,994	0,998	0,991
Корсуня	$\bar{\sigma}_z$	1,073	1,576	1,296	0,540	0,823	0,718
	$\bar{\sigma}_z/\bar{\sigma}_x \cdot 100\%$	31,91	34,75	27,47	31,31	18,56	31,36
	R	0,947	0,937	0,962	0,950	0,982	0,950
Корсуня-Бакмана	$\bar{\sigma}_z$	0,416	0,491	0,501	0,173	0,345	0,286
	$\bar{\sigma}_z/\bar{\sigma}_x \cdot 100\%$	13,31	11,46	10,72	11,07	7,840	13,47
	R	0,991	0,993	0,994	0,993	0,996	0,990
Дракина-Вуевского	$\bar{\sigma}_z$	1,113	1,571	1,362	0,549	1,097	-
	$\bar{\sigma}_z/\bar{\sigma}_x \cdot 100\%$	32,88	34,71	28,43	34,42	24,65	-
	R	0,943	0,938	0,958	0,948	0,968	-

Таким образом, применение системы кривых Пирсона для исследования роста различных растительных объектов, позволяет констатировать безусловную их приемлемость для этих целей

**6.3. Некоторые закономерности текущего накопления фитомассы в древостоях.** Определение текущего прироста фитомассы древостоев – один из самых сложных и трудоемких вопросов в исследовании продуктивности насаждений (Молчанов, Смирнов, 1967; Усольцев 1998). Наличие наиболее полной на сегодняшний день базы данных о фитомассе лесов Северной Евразии (Усольцев, 2001) и обширнейшего пакета таблиц биологической продуктивности (ТБП) основных лесобразующих пород этих лесов (Усольцев, 2002) предоставляет возможность анализа особенностей текущего изменения запасов их фитомассы. Для проведения указанного анализа были сформированы выборки из 24-х ТБП насаждений сосны естественного происхождения, без проведенных разреживаний, т. е. нормальных и сомкнутых, и 18 ТБП березы. Выборку по сосне составили ТБП со II по V класс бонитета, по березе – с Ia по V класс, что обусловлено наличием насаждений указанных классов бонитета в большинстве регионов Северной Евразии.

Расчет текущего изменения запаса фитомассы осуществлен традиционным в таксации способом – вычислялась средняя периодическая величина показателя за 10-летний период с отнесением полученных значений на конец периода. В данной работе анализировался только процесс накопления надземной (*Pabo*) и общей (*Ptot*) фитомассы, особенности изменения по фракциям и убыль ее не рассматривались. Для сравнения использованы показатели для лиственницы (Усольцев, 2002) и фактические данные текущего прироста фитомассы сосны, полученные на 155 пробных площадях, сведения о которых приведены в 25 источниках, включенных в базу данных о фитомассе лесов Северной Евразии (Усольцев, 2001). В выборку вошли пробные площади (ПП), в составе древостоев которых преобладает сосна (8–10С) с относительной полнотой 0,8–1,0, определенной по стандартным таблицам ЦНИИЛХа.

Полученные относительные показатели текущего изменения надземной и общей фитомассы в пределах класса бонитета по данным исследуемых ТБП не имеют существенных отличий во всех 89 случаях их сравнения по сосне и 73 – по березе (наибольшая величина  $\chi^2_{\phi} = 0,2030 \leq \chi^2_{0,5} = 22,4$  при 13 степенях свободы), поэтому основной анализ выполнен по надземной фитомассе. Сравнение данных относительного текущего изменения запасов надземной фитомассы по классам бонитета ТБП выявило, что величины этого показателя в различных условиях местопроизрастания очень мало отличаются друг от друга. Следует отметить, что видоспецифичность этого показателя также не проявляется, его величины для древостоев березы и лиственницы по данным предварительного анализа не имеют существенных отличий от сосны. Считается,

стическое сравнение рядов относительного текущего изменения надземной фитомассы по классам бонитета не выявило достоверных различий ни по критерию "хи-квадрат" Пирсона, ни при использовании более мощного критерия Колмогорова-Смирнова (Урбах, 1964) – во всех случаях сравнения (119 – по сосне, 139 – по березе) нулевая гипотеза о принадлежности сравниваемых рядов к одной генеральной совокупности не опровергается. Поэтому анализ данных географических закономерностей изменения исследуемых признаков выполнен для III класса бонитета сравниваемых ТБП.

Статистический анализ не выявил достоверных различий между рядами относительного текущего изменения запасов надземной фитомассы древостоев из ТБП различных географических регионов. Для всех случаев сравнения выборки из 24 ТБП древостоев сосны и 18 ТБП березы по критерию Колмогорова-Смирнова нулевая гипотеза о принадлежности рядов (231 – сосна, 153 – береза) к одной генеральной совокупности не была отвергнута. Таким образом, относительное изменение запасов надземной фитомассы древостоев не зависит от условий среды их произрастания, но зависит от времени, что позволяет аппроксимировать возрастной характер исследуемого признака. В качестве аппроксимирующей функции использовано уравнение системы кривых Пирсона

$$Z_{\text{отн}} = \frac{t + b}{c_0 + c_1 + c_2 t^2}, \quad (6.1)$$

где  $Z_{\text{отн}} = \frac{dP}{Pdt}$  – относительное текущее изменение запаса надземной фитомассы, %;  $t$  – время, лет. Анализ данных текущего прироста надземной фитомассы сосняков на пробных площадях выявил, что характер возрастного тренда относительного прироста аналогичен относительному текущему изменению запасов фитомассы из ТБП и также может быть аппроксимирован по уравнению (6.1). Параметры уравнений приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Характеристики моделей относительного изменения фитомассы древостоев

Порода	Параметры уравнений				
	$b$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$R$
Сосна (ТБП)	-176,3217	-6,60715	-1,06289	-0,0002466	0,984
Береза (ТБП)	-112,031	-2,090966	-0,7304346	0,0015135	0,978
Сосна (ПП)	-13,11295	-0,1929063	-0,0320928	0,0033562	0,864

Исследование динамики относительной скорости накопления запасов надземной фитомассы в древостоях сосны, березы и лиственницы из различных районов их произрастания в Северной Евразии доказывает наличие общих закономерностей в изменении с возрастом относительных показателей этого признака вне зависимости лесорастительных условий и района произ-

растания. Указанная закономерность с высокой точностью аппроксимируется дифференциальным уравнением системы кривых Пирсона.

### 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ

Существующая до настоящего времени система сбора информации о лесном фонде и проектировании лесохозяйственных мероприятий в процессе лесоустройства, проводимого с периодичностью в 10 лет, не отвечает современным требованиям и нуждается в коренном реформировании (Петров, 1990; Головихин, Кукуев, 1998).

В XXI веке определяющим в лесоустройстве должен стать экологический аспект. Кроме традиционно определяемых показателей лесных ресурсов, лесоустройство должно устанавливать наличие и динамику углерода в лесном фонде (Кобак, 1988; Исаев и др., 1993; Усольцев, 1995; Уткин и др., 1997; Замолодчиков и др., 1998; Усольцев, Сальников, 1998), поскольку ведение лесного хозяйства должно быть ориентировано на максимальное накопление углерода лесными экосистемами.

В лесной науке и практике выдел выполняет функции первичной информационной единицы, неоднородность выдела достаточно изучена (Атросенко, 1985), но гораздо меньше внимания обращалось на тот факт, что и границы выделов подвержены трансформации и не являются стабильными. Сложившаяся ситуация существенно снижает ценность информации, полученной в процессе лесоустройства, так как не позволяет следить за динамикой таксационных показателей конкретных древостоев. Разрешение данной ситуации возможно двумя путями: выделением в лесном фонде в пределах квартала стабильных единиц учета, обусловленных условиями местопроизрастания и выделением постоянных участков на формально-математической основе. Решение вопроса в первом случае требует исследования взаимовлияния условий среды и древесного яруса растительности. Из всего комплекса лесобразующих факторов почвенные условия являются одним из ключевых компонентов в развитии насаждений.

Чрезвычайная дробность почвенных условий в лесах Казахского мелкосопочника значительно усложняет задачу выявления их влияния на морфометрические показатели древесной растительности и закономерно приводит к необходимости объединения их по наиболее характерным признакам и степени распространения. Наиболее представлены здесь серые лесные почвы и их комплексы, подзолисто-бурые почвы и их комплексы, бурые лесные петроморфные почвы в комплексе с выходами горных пород в различных сочетаниях.

Выборка из 497 выделов высокополнотных чистых сосняков и 170 выделов высокополнотных чистых березняков была сгруппирована по укрупненным инди-



лее распространенным почвенным разностям, для каждой группы определены средние таксационные показатели, включая общую фитомассу, которая рассчитана по методике совмещения многофакторных моделей фитомассы В. А. Усольцева (1998) для древостоев данного региона с повидельной характеристикой лесного фонда. Сравнение полученных данных по критерию "хи-квадрат" Пирсона позволяет отличить группу бурых лесных петроморфных почв с выходами горных пород от подзолисто-бурых и серых лесных почв, последние также значительно различаются между собой по общей фитомассе:  $\chi^2_{\phi} = 24,3 > \chi^2_{0,5} = 18,3$  при  $f = 10$ ,  $\chi^2_{\phi} = 28,4 > \chi^2_{0,5} = 18,3$  при  $f = 10$ . Основная часть высокополнотных насаждений березы сосредоточена на двух почвенных разностях. Это серые лесные почвы и их комплексы и болотные лесные почвы и их комплексы, между которыми при сравнении данных запасов общей фитомассы по критерию "хи-квадрат" также получены статистически значимые различия:  $\chi^2_{\phi} = 24,3 > \chi^2_{0,5} = 18,3$  при  $f = 6$ .

Следует указать, что в определенном смысле индикатором почвенных условий можно считать лишь показатели общей фитомассы растительности, но в чистых сомкнутых сосняках и березняках Казахского мелкосопочника подлесок практически отсутствует, а травяно-кустарничниковый покров не имеет статистически значимых отличий по типам леса при одной полноте (Гурский и др., 1999). Поэтому использование фитомассы древостоев в качестве индикатора почвенных условий можно признать оправданным. Индексы фитомассы тесно коррелируют с относительным ее приростом ( $r = -0,887$ ), что позволяет рассчитать ее показатели в соответствии с возрастом для каждой из указанных групп почвенных разностей (табл. 7.1-7.2).

Таблица 7.1

Временные нормативы оценки условий местопроизрастания сомкнутых сосняков Казахского мелкосопочника

Возраст, лет	Запас фитомассы по группам почв, т/га		
	бурые лесные с выходами горных пород	подзолисто-бурые	серые лесные
20	35,6	45,0	52,7
60	100,5	126,7	148,6
100	141,6	178,5	209,3

Применение приведенных нормативов предполагает использование конверсионных коэффициентов для перехода от запаса стволовой древесины к запасу общей фитомассы на таксируемом выделе. Нормативы обеспечивают выявление почвенной разности в 52-70% случаев. Таким образом, в качестве критерия постоянства границ первичной информационной единицы лесного фонда – выдела (в данном случае его можно назвать эдафическим в отличие

от таксационного) – предлагается величина общей фитомассы на единицу площади.

Таблица 7.2

Временные нормативы оценки условий местопроизрастания сомкнутых березняков Казахского мелкосопочника

Возраст древостоев, лет	Запас фитомассы по группам почв, т/га	
	темно-серые лесные	болотные лесные
20	51,84	38,85
40	72,74	68,45
60	93,80	91,73

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осознание биосферной роли лесов, их ключевого значения в предотвращении глобальной экологической катастрофы ставит перед лесной таксацией задачу перехода от оценки сырьевого потенциала лесов к оценке всего комплекса их функций, и, в первую очередь, их биологической продуктивности. За более чем двухсотлетнюю историю своего существования лесная таксация прошла период первоначального накопления эмпирических данных о росте и развитии древостоев основных древесных пород и формулировании основополагающих гипотез и вступила в эпоху обобщения накопленных знаний и разработки теоретических основ. Последние закономерно базируются на математическом моделировании роста и продуктивности древостоев. Абсолютное большинство из огромного числа функций, предложенных для аппроксимации процессов роста биологических систем, имеют в своей основе закон нормального распределения Гаусса-Лапласа – строго симметричную кривую распределения численностей. Симметрия в распределении вариантов в живой природе – скорее исключение, чем правило, поэтому для целей моделирования роста и продуктивности древостоев более перспективны те функции, которые отражают асимметрию распределения вероятностей.

Проведенные исследования позволяют заключить, что использование распределений Пирсона для моделирования дифференциальных кривых прироста линейных размеров растительных объектов – осевой жилки листьев, осевых побегов, прироста по высоте деревьев и древостоев, обеспечивает необходимую адекватность расчетных и эмпирических данных.

Анализ возрастной динамики относительной скорости роста основных таксационных показателей высокополнотных древостоев – средних высоты, диаметра, суммы площадей сечений, запаса стволовой древесины и запаса фитомассы дает основание утверждать, что изменение указанного прироста во времени не зависит от географического района и локальных условий местопроизрастания и с высокой степенью точности аппроксимируется диффе-

ренциальным уравнением системы кривых Пирсона. Таким образом, относительная скорость изменения того или иного таксационного показателя отражает общие закономерности процесса роста древостоев, а дифференциальное уравнение распределений Пирсона – наиболее адекватная модель указанного процесса.

Система распределений Пирсона обобщает многие известные ростовые функции, и, в частности, предложенные Корсунем в качестве "законов роста" дробно-рациональную функцию Госфельда и логарифмический полином второй степени – функцию Бакмана, которые представляют собой, таким образом, частные случаи семейства стохастических кривых Пирсона.

Исследование характеристик роста древостоев в относительных величинах позволяет выявлять истинные тенденции этого процесса. Модель, сочетающая уравнение возрастной динамики индексного ряда таксационных показателей с уравнением связи исследуемого признака в базовом возрасте с условиями местопроизрастания, выражаемыми средней высотой класса бонитетной (или оценочной) шкалы позволяет моделировать ход роста древостоев с необходимой точностью.

Эмпирическое моделирование хода роста сомкнутых древостоев сосны Казахского мелкосопочника осуществлено на основе сочленения модели роста основных таксационных показателей с моделью строения по диаметру и высоте. Фундаментом модели строения явились выявленные связи основных статистик рядов распределения деревьев по диаметру и высоте по данным пробных площадей. Регрессионные уравнения связи второго и третьего основных моментов распределения со средним арифметическим значением ряда распределения и четвертого основного момента с третьим обеспечили расчет указанных показателей для средних диаметров и высот таблиц хода роста. Модель строения рассчитана по усовершенствованной схеме расчетов кривой типа I Пирсона. Корректирование модели строения осуществлено контрольным расчетом статистик распределения полученных модельных рядов, статистически достоверных расхождений на входе и выходе модели не выявлено. Кроме того, по полученным рядам распределения по диаметру и высоте проведен расчет высот в ступенях толщины, что позволило рассчитать не только суммы площадей сечений, но и запасы в ступенях толщины. Сравнение суммарных величин указанных таксационных показателей с данными таблиц хода роста убедительно свидетельствует о достаточной адекватности разработанной модели роста-строения, т.к. систематические отклонения по сумме площадей сечений не превысили 5%-ный уровень, а по запасу – 15%-ный. Таким образом, система распределений Пирсона и, в частности, кривая типа I, при использовании ее в качестве основы для создания модели строения древостоев обеспечивает необходимую точность расчетов и адекватность исходным данным.

Эмпирическая модель роста древостоев, представленная в виде таблиц хода роста в совокупности с сопряженными рядами распределения деревьев по ступеням толщины и соответствующим им высотам, позволяет сформировать полновесный пакет лесотаксационных нормативов, включающий таблицы динамики товарной структуры и товарные, таблицы сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0, таблицы отпада и прироста, таблицы оценки состояния древостоев и стоимостной оценки древесных запасов, которые внедрены в производство на площади в 1 873,2 тыс. га лесного фонда. Указанный пакет нормативов является базой для проведения оценки всей фитомассы древостоев, учета депонирования углерода лесными фитоценозами и оценки экологической значимости лесов.

Моделирование продуктивности сомкнутых древостоев, прогнозирование роста которых априори задано в рамках предельных значений полноты и густоты, вполне осуществимо на основе парных зависимостей, где аргументом применяемых уравнений является время. Однако прогнозирование динамики продуктивности модальных древостоев при таком методическом подходе не состоятельно, поскольку в этом случае обеспечивается лишь получение статичных характеристик древостоя в том или ином возрасте. Эмпирическое моделирование роста разногустотных модальных древостоев с учетом динамики их относительной полноты возможно на базе множественного регрессионного анализа и рекурсивного принципа построения прогнозных статистических моделей. Реализация рекурсивного принципа "Что будет, если...?" позволяет моделировать динамику роста и продуктивности, включая фракционный состав фитомассы, всего диапазона густоты и полноты древостоев, зафиксированного в процессе их таксации на пробных площадях. Методика обеспечивает приемлемую точность прогноза. Тем не менее, регрессионные зависимости, составляющие разработанную статистическую модель, являясь строго эмпирическими, не могут быть использованы на других объектах, а их применение требует преобразования исходного материала в целях приближения распределения численностей к нормальному, что, безусловно, вносит искажения в используемые данные и, в конечном итоге, может снижать адекватность моделей. В связи с чем задачей будущих исследований следует считать использование класса дифференциально-разностных уравнений с отклоняющимся аргументом для разработки эмпирических моделей динамики продуктивности древостоев.

Первая и, в известной мере, успешная попытка применения показателей запаса фитомассы древостоев для индикации локальных почвенных условий их произрастания позволяет определить ориентиры разработки будущей возможной количественной основы лесной типологии.

Широкий диапазон практического приложения предлагаемой методики статистического моделирования продуктивности древостоев позволяет счи

тать ее приемлемым подходом к разработке лесотаксационной нормативной базы современного лесного хозяйства, обеспечивающей необходимую точность учета лесных ресурсов, включая фитомассу и запасы депонированного углерода. Изложенные в настоящей работе приемы статистического моделирования роста древостоев и составляющих их деревьев, основанные на теории распределения и, в частности, – системе распределений Пирсона, которая обладает наибольшим диапазоном охвата информации, практически включая все возможные для лесных объектов варианты изменения случайных величин во времени и пространстве, являются схемой начального этапа разработки основ теории роста лесных фитоценозов.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сортиментные таблицы для осокоря и ветлы поймы р. Иртыша – Алма-Ата: Картпредприятие, 1972 – 66 с. (Макаренко А. А.).
2. Лесотаксационные таблицы // Основные положения организации развития лесного хозяйства Кустанайской области. – Алма-Ата, 1976. – С. 226–236.
3. Особенности роста сомкнутых сосняков Казахского мелкосопочника // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1978. №9. – С. 91–94.
4. О возможности применения семейства кривых Пирсона в лесоводственных исследованиях // Интенсификация лесного хозяйства Казахстана: Сб. науч. тр. КазНИИЛХА. – Алма-Ата: Кайнар, 1978. – С. 3–12. (Макаренко А. А., Рапш Я. А.).
5. Некоторые закономерности роста сомкнутых сосновых древостоев Казахского мелкосопочника // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1979. №1. – С. 86–88.
6. Опыт моделирования динамики древостоев // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1979. №11. – С. 79–81. (Макаренко А. А.).
7. Моделирование роста и строения древостоев с использованием статических зависимостей // Научные основы продуктивности лесов Казахстана: Сб. науч. тр. КазНИИЛХА. – Алма-Ата: Кайнар, 1980. – С. 215–235. (Макаренко А. А.).
8. Ход роста сомкнутых сосновых древостоев Казахского мелкосопочника // Лесное хозяйство. – 1980. №10. – С. 51–53.
9. Динамика товарной структуры сосняков Казахского мелкосопочника // Молодые ученые – лесному хозяйству Казахстана: Сб. науч. тр. Деп. в КазНИИТИ. – 1981. №196. – 10 с.
10. Программа рубок ухода для сухих сосняков Казахского мелкосопочника // Основы рационального ведения лесного хозяйства Казахстана: Сб. науч. тр. КазНИИЛХА. – Алма-Ата: Кайнар, 1982. – С. 97–105. (Макаренко А. А.).
11. Моделирование роста древостоев и составляющих их деревьев на основе

- семейства кривых Пирсона // Рациональные способы формирования насаждений и рубок главного пользования в лесах Казахстана: Сб. науч. тр. КазНИИЛХА. – Алма-Ата: Кайнар, 1983. – С. 177–199. (Макаренко А. А., Ахременков А. А.).
12. Новые справочно-нормативные материалы для лесов Казахстана // Рациональное использование и воспроизводство лесных ресурсов Казахстана: Сб. науч. тр. КазНИИЛХА. Депонир. науч. работы. – М., 1984. – №11. – 20 с.
  13. Изученность лесного фонда и справочно-нормативная база лесостроительства // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Целиноградской области. – Алма-Ата, 1985. – С. 423–451.
  14. Отвод и таксация лесосек современными способами в лесном хозяйстве и при лесостроительстве // Депонир. в КазНИИТИ. № 1109. Депонир. науч. работы. – М., 1986. – №3. – 23 с.
  15. Система ведения лесного хозяйства Северного Казахстана. – Алма-Ата: Кайнар, 1986. – 220 с. (Макаренко А. А., Гирлов В. А., Воробьев А. И. Харитонов Б. Е., Внучков В. Т. и др.).
  16. Нормативы для таксации лесов Казахстана – ч. I, кн. I. – Алма-Ата: Кайнар, 1987 – 240 с. (Макаренко А. А., Гурский А. А., Хлюстов В. К., Лагунов П. М., Харитонов Б. Е.).
  17. Нормативы для таксации лесов Казахстана – ч. I, кн. II. – Алма-Ата: Кайнар, 1987 – 324 с. (Макаренко А. А., Гурский А. А., Хлюстов В. К., Лагунов П. М., Харитонов Б. Е.).
  18. Сортиментные и товарные таблицы для лесов Кзылжарского района // Алма-Ата: Кайнар, 1987 – 228 с. (Макаренко А. А., Гурский А. А., Харитонов Б. Е.).
  19. Изученность лесного фонда и справочно-нормативная база лесостроительства // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Северо-Казахстанской области. – Алма-Ата, 1987. – С. 448–477.
  20. Побочные лесные пользования // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Кокчетавской обл. – Алма-Ата, 1988. – С. 361–393.
  21. Изученность лесного фонда и справочно-нормативная база лесостроительства // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Кокчетавской области. – Алма-Ата, 1988. – С. 469 – 475.
  22. Побочные лесные пользования // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Павлодарской области. – Алма-Ата, 1988. – С. 343–380.
  23. Изученность лесного фонда и справочно-нормативная база лесостроительства // Основные положения организации и развития лесного хозяйства Павлодарской области. – Алма-Ата, 1988. – С. 462–465.

24. Опыт прогнозирования продуктивности древостоев // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1989. №11. – С. 78–85. (Макаренко А. А., Сабанцев А.И.).
25. Побочные пользования в лесах Казахстана // Деп. в КазНИИНТИ, № 2763. Депонир. научн. работы. – М., 1989. – №11. – 24 с.
26. Применение кривых распределения при моделировании роста древостоев // Современные аспекты лесной таксации: Сб. науч. тр. ин-та леса АН Беларуси. – Гомель, 1994. – вып. 38. – С. 75–76.
27. Оценка состояния насаждений таксационными методами // Валихановские чтения-3: Материалы конф. – Кокшетау, 1996. – С. 114–122.
28. К вопросу о непрерывном лесоустройстве // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: СибГТУ, 1998. – С. 170–175. (Портянко А. В.)
29. Органическая масса культур сосны обыкновенной в разных природных зонах // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: СибГТУ, 1999. – С. 16–24. (Усольцев В. А., Габеев В. Н., Бабич Н. А., Евдокимов И. В.).
30. Структура надземной фитомассы лиственничников в низовьях р. Пур // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: СибГТУ, 1999. – С. 24–28. (Усольцев В. А., Нагимов З. Я., Фимушин А. Б., Логинов М. В., Азаренок М. В., Галако В. А.).
31. Географические закономерности распределения органической массы в искусственных фитоценозах сосны // Труды XI съезда РГО. – Т. 8. (II Мелеховские чтения). – С.-Петербург: АрхГТУ, 2000. – С. 115–118. (Усольцев В. А., Азаренок М. В., Бабич Н. А., Евдокимов И. В., Габеев В. Н.).
32. Биологическая продуктивность приполярных лиственничников Западной Сибири материалы Труды XI съезда РГО. – Т. 8. (III Мелеховские чтения). – С.-Петербург: АрхГТУ, 2000. – С. 118–122. (Усольцев В. А., Нагимов З. Я., Фимушин А. Б., Азаренок М. В.).
33. Опыт составления таблиц биопродуктивности лиственничников по регионам Евразии // Вестник СибГТУ. – 2000. №1 – С. 37–46. (Усольцев В. А.).
34. Ход роста надземной фитомассы приполярных лиственничников // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2000. №№ 5-6. – С. 13–18. (Усольцев В. А., Нагимов З. Я., Фимушин А. Б., Азаренок М. В.).
35. Зависимость фитомассы от высоты полога приполярных лиственничников по регионам Сибири // Проблемы региональной экологии. – Вып. 8: Матер. 2-й всероссийск. конф. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2000 – С. 97–98. (Усольцев В. А., Азаренок М. В., Фимушин А. Б., Кириллова В. В.).
36. Нормативы биопродуктивности лиственничников по регионам Евразии материалы Актуальные проблемы лесного комплекса: информ. матер. междунар. н.-т. конф. – Брянск: БГИТА, 2000 – С. 49–51. (Усольцев В. А., Азаренок М. В.).
37. Возрастная динамика органической массы культур сосны в разных природных зонах // Научн. труды: Сборник Екатеринбург: УГЛТА, 2000 – С. 36–42. (Усольцев В. А., Азаренок М. В., Габеев В. Н., Бабич Н. А., Евдокимов И. В.).
38. Распределение предельных показателей фитомассы лиственничников по регионам Северной Евразии // Химико-лесной комплекс – Научное и кадровое обеспечение в XXI веке. Проблемы и решения. – Красноярск: СибГТУ, 2000 – С. 55–58 (Усольцев В. А.).
39. Надземная фитомасса приполярных лиственничников Западной Сибири // Принципы формирования высокопродуктивных лесов. – Уфа: БашГАУ, 2000 – С. 128–131. (Усольцев В. А., Нагимов З. Я., Фимушин А. Б., Азаренок М. В.)
40. Оценка запасов углерода в фитомассе лиственничных экосистем Северной Евразии // Экология. 2001 №4 С. 258–266 (Усольцев В. А.).
41. Региональные особенности распределения годичной продукции фитомассы лиственничников // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: Сб. научн. статей. Вып. 1. Брянск: БГИТА, 2001 – С. 13–16. (Усольцев В. А., Фимушин А. Б.).
42. Estimating the Carbon Pool in the Phytomass of Larch Forests in Northern Eurasia // Russian Journal of Ecology. – 2001. Vol. 12. No. 4. P. 215–247 (Usoltsev V. A.).
43. Рекреационная оценка лесопарковых насаждений зеленой зоны г. Екатеринбурга // Екатеринбург: от завода-крепости к евразийской столице. Матер. всероссийск. н.-т. конф. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – С. 226–228. (Галако В. А.)
44. Совмещение моделей фитомассы лесобразующих пород Среднего Урала с данными лесоустройства // Леса Урала и хозяйство в них: Сб. научн. тр. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22 – С. 102–110. (Усольцев В. А., Галако В. А.)
45. Таблица биологической продуктивности модальных сосновых древостоев // Леса Урала и хозяйство в них: Сб. научн. тр. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22. – С. 116–118.
46. Рекреационная оценка зеленой зоны г. Екатеринбурга // Леса Урала и хозяйство в них: Сб. научн. тр. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22. – С. 152–159. (Галако В. А.)
47. Расчет приходной части углеродного баланса при разных способах рубок в сосновых и березовых древостоях // Леса Урала и хозяйство в них: Сб. научн. тр. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22 – С. 191–199. (Азаренок В. А., Усольцев В. А., Фимушин А. Б., Нагимов З. Я., Ефименко О. А., Котельникова И. Н.).
48. Кислородопроductивность насаждений зеленой зоны г. Екатеринбурга // Гео-