

630*5
+ A 92

УКРАИНСКАЯ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

АТРОЩЕНКО Олег Александрович

УДК 630*566:681.31

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗА РОСТА ДРЕВОСТОЕВ
/на примере БССР/

06.03.02 - Лесоустройство и лесная таксация

Стор

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора сельскохозяйственных наук

Киев 1986.

Диссертационная работа выполнена на кафедре лесоустройства
и таксации Белорусского ордена Трудового Красного Знамени техно-
логического института имени С.М.Кирова

Официальные оппоненты:

доктор сельскохозяйственных наук, профессор	СВАЛОВ Н.Н.
доктор сельскохозяйственных наук, профессор	ЧУЕНКОВ В.С.
доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник	КОЖЕВНИКОВ А.М.

Ведущее предприятие - Всесоюзное объединение "Леспроект"

Защита состоится " _____ " _____ 1986 г. в _____ часов
на заседании специализированного Совета Д.120.71.02 в Украин-
ской ордена Трудового Красного Знамени сельскохозяйственной
академии /г.Киев-41, Голосеево, I учебный корпус, аудитория 94/.

Просим принять участие в работе Совета или выслать Ваш отзыв на
автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу:
252041, Киев-41, ул.Героев Оборона-15, сектор защиты диссертаци-
ций.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1986 г.

Ученый секретарь *М. Головащенко*
специализированного Совета ГОЛОВАЩЕНКО В.П.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В Постановлениях ЦК КПСС и Совета Ми-
нистров СССР указывается на ускорение научно-технического прогрес-
са, дальнейшее совершенствование планирования и управления в на-
родном хозяйстве страны путем широкого внедрения автоматизирован-
ных систем и вычислительной техники. Переход в лесном хозяйстве к
автоматизированным системам управления (ОАСУ) и плановых расчетов
(АСПР) предопределяет необходимость углубленного исследования про-
цессов роста леса, своевременного получения достоверной информа-
ции о состоянии лесного фонда, его динамике во времени, разработ-
ки лесотаксационных нормативов, математического и программного
обеспечения автоматизированных систем. В решении поставленных за-
дач особое значение имеет проблема теоретического и методического
обоснования, практической реализации унифицированной системы мо-
делирования и прогноза роста древостоев, позволяющей по данным
лесоинвентаризации, материалам выборочной и перечислительной так-
сации лесов периодически получать математические модели и лесо-
таксационные нормативы в виде таблиц (моделей) роста и производи-
тельности насаждений, динамики стресса древостоев и их сорти-
ментной структуры, нормативов для актуализации и прогноза динами-
ки лесного фонда, лесоустроительного проектирования и разработки
долгосрочных программ ведения лесного хозяйства.

Исследование выполнено как составная часть тематики плана
НИР и ОКР по отрасли "Лесное хозяйство" на XI пятилетку, планов
НИР лесохозяйственного факультета БТИ им. С.М.Кирова (номера ре-
гистрации 76095822, 81023166), по непосредственным заданиям Бе-
лорусского лесоустроительного предприятия В/О "Леспроект", свя-
занными с задачами реализации подсистем ОАСУ-лесхоз (номера гос-
регистрации 78009781, 81006497).

Цель и задачи исследования. Диссертация посвящена решению
научной проблемы теоретического обоснования и экспериментального
обоснования системы моделирования и прогноза роста древостоев с
позиций системного подхода, имеющей важное народнохозяйственное
значение в совершенствовании учета лесов, планирования и управле-
ния в лесном хозяйстве. Конкретными задачами исследования явились:
1) теоретически и экспериментально обосновать структуру, основные
принципы и методы разработки системы; 2) обобщить и представить
статистическую теорию роста древостоев как основу моделирования
их строения и роста; 3) выполнить исследование таксационного стро-



ения, роста и производительности древостоев Белоруссии; 4) разработать алгоритмы, математические модели и программы на ЕС ЭВМ для системы моделирования строения древостоев, системы моделирования роста и производительности насаждений, системы прогноза роста древостоев; 5) получить выход системы в виде таблиц производительности древостоев по классам бонитета, типам леса и почвенно-типологическим группам (по режимам ухода и уровням производительности), таблиц продуктивности модальных насаждений: по типам леса, моделей производительности эталонных древостоев и таблиц динамики их строения по диаметру, лесотаксационных нормативов для актуализации и прогноза динамики лесного фонда; 6) оценить точность и надежность математических моделей и системы в целом.

Метод и объекты исследования. Теоретические и экспериментальные исследования проведены с применением системного подхода к решению проблемы в целом и частных задач, современных методов лесной таксации в изучении строения и хода роста насаждений, методов математической статистики, теории случайных процессов и математического моделирования. В исследовании использован экспериментальный материал, включающий: банк данных "Лесной фонд БССР" (около 1,5 млн. таксационных выделов), создаваемый в Белорусском лесохозяйственном предприятии; данные выборочной и перечислительной таксации сосновых, еловых и березовых насаждений на 1215 пробных площадях с рубкой и обмером 1500 модельных деревьев; материалы инвентаризации лесов Беловежской пущи; данные стационарных наблюдений на постоянных пробных площадях и местные таблицы хода роста насаждений.

Научная новизна и обоснованность результатов. Автором научно обоснованы и выдвинуты следующие положения:

- впервые обобщена и представлена статистическая теория роста древостоев; с позиций системного подхода даны структура и научные основы создания системы лесохозяйственной информации, системы обработки лесотаксационных данных, системы моделирования и прогноза роста древостоев в условиях ОАСУ-лесхоз;

- разработан новый метод и методика имитационного моделирования строения и роста древостоев на ЭВМ, создания моделей эталонных насаждений, нормативов для актуализации и прогноз за динамики лесного фонда на основе массовых материалов инвентаризации лесов;

- создана унифицированная система моделирования и прогноза роста древостоев, реализованная в комплексе алгоритмов и программ

на ЕС ЭВМ, позволяющая периодически получать лесотаксационные нормативы для практики лесного хозяйства;

- разработаны математические модели и лесотаксационные нормативы для информационного и математического обеспечения автоматизированных систем в лесном хозяйстве Белоруссии, лесоустroительного проектирования, актуализации лесного фонда, кадастровой оценки лесных земель, долгосрочного прогноза лесосырьевых ресурсов.

Обоснованность результатов исследования следует из обширного экспериментального материала, охватывающего насаждения различных лесорастительных районов Белоруссии, пород, возрастов, типов леса и т.д.; системного подхода к решению задач; последовательного применения современных лесотаксационных и математико-статистических методов познания; обработки данных и моделировании процессов на ЭВМ; практической реализации результатов.

Практическая ценность. По результатам исследования разработаны лесотаксационные нормативы, которые использованы при решении следующих народнохозяйственных задач: актуализации лесного фонда республики; таксации лесов и оценке продуктивности насаждений объекта лесоустройства; в лесоустroительном проектировании при долгосрочных прогнозах динамики лесного фонда лесхозов; прогнозе лесосырьевых ресурсов в Минлеспроме БССР.

Теоретические и методические разработки диссертации, программы на ЕС ЭВМ применяются в учебном процессе, научно-исследовательской работе студентов и сотрудников лесохозяйственного факультета, других научных подразделений республики.

Практическая ценность диссертационной работы подтверждается актами внедрения и справками.

Апробация работы и публикации. Основные теоретические положения, методики, результаты и практические рекомендации докладывались и получили положительную оценку на научных конференциях лесохозяйственного факультета БТИ им.С.М.Кирова (1970-1985 гг.), на Международных симпозиумах (Хельсинки, 1977; Псков, 1982), на Всесоюзных конференциях и совещаниях (Рига, 1972; Минск, 1975; Каунас, 1979; Красноярск, 1982; Москва, 1983; Львов, 1983; Свердловск, 1983; Рига, 1984; Минск, 1985), на Республиканских и региональных конференциях (Минск, 1974; Минск, 1978; Каунас, 1978; Каунас, 1980; Гомель, 1983; Каунас, 1985).

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 46 научных работах и статьях.

Личный вклад автора. Автору принадлежит теоретическое обобщение и постановка проблемы, разработка теоретических и методических положений ее решения, сбор и анализ основного экспериментального материала, разработка алгоритмов и программ на ЕС ЭВМ, обработка данных на ЭВМ, исследование и математическое моделирование строения, роста и производительности древостоев, обобщение результатов и разработка системы, создание лесотаксационных нормативов, перевод представленной иностранной литературы с английского на русский язык. Помощь в организации сбора полевых материалов и обработки данных на ЭВМ оказали сотрудники и студенты лесохозяйственного факультета БТИ им. С.М.Кирова, Минлесхоза БССР и Белорусского лесохозяйственного предприятия, за что им выражаем искреннюю благодарность.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав и заключения, списка литературы и приложения, содержит 300 страниц машинописного текста, 55 рисунков и 92 таблицы. Список литературы включает 416 наименований, в том числе 107 на иностранных языках. В приложении приведены основные исходные материалы, результаты статистической обработки данных, таблицы роста и производительности насаждений, нормативы для актуализации лесного фонда, программы на ЕС ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И СОВРЕМЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА НАСАЖДЕНИЙ

Лесная экологическая система представляет собой большую динамическую диффузную систему, которая является одной из самых трудных для изучения и математического описания. В диффузных системах трудно разграничить действия отдельных факторов, в больших системах необходимо учитывать много факторов, задающих различные по своей природе, но тесно взаимодействующие друг с другом процессы. Современным направлением научного познания сложных больших систем является системный подход, получивший конкретные воплощения в работах В.И.Вернадского, Л.фон Берталанфи, У.Росс Эшби, Н.А. Бернштейна.

С позиций системного подхода систему лесохозяйственной информации для принятия управленческих решений в ОАСУ - лесхоз можно представить в виде систем информации, планирования и принятия ре-

шения. Лесная экосистема развивается в условиях окружающей среды. Информация о состоянии лесного фонда объекта (лесного предприятия) собирается в лесной экосистеме путем различных изменений (глазомерно-измерительная, выборочная, перечислительная таксация леса, материалы аэрофотосъемки и т.д.) накапливается и обрабатывается в системе информации. Результаты поступают в систему планирования, где разрабатываются альтернативные варианты решения задачи (программы) как законченный во времени (на долгосрочный период) и в пространстве (по территории объекта) комплекс лесохозяйственных мероприятий, проводимых в объекте для достижения поставленной цели лесопользования. В системе принятия решения, исходя из анализов ограничений (например, размера лесопользования и объема лесовосстановления), с учетом определенной степени самостоятельности в принятии решения и принципов устойчивости системы, получают допустимые альтернативы, из которых отбирают оптимальные программы с точки зрения практической реализации и критериев принятия оптимальных решений.

Создание системы лесохозяйственной информации требует разработки моделей сбора и обработки данных, имитационных моделей строения, роста древостоев и рубок ухода, моделей прироста и экономической спелости насаждений, моделей принятия решений и других (В.В. Антанайтис, 1971; А.З.Швиденко, 1981; J.Cutter, B.Allison, 1973; P.Kilkki, R.Pökälä, 1975; C.Goulding, 1979).

Моделирование роста леса на ЭВМ является новым научным направлением в лесной таксации. Первоначальное внимание было сконцентрировано на решении узких, специальных вопросов, а не в широком смысле на перспективу применения моделей в системе контроля и управления лесными ресурсами. Системный подход к моделированию роста леса на ЭВМ связан с пересмотром идей и способов моделирования.

Современное направление в моделировании роста насаждений характеризуется тремя основными подходами. Первый принцип предполагает, что основной единицей моделирования является отдельное дерево. Таблицы хода роста составляются на основе детальной информации о росте деревьев в насаждении: данные таксации растущих деревьев, анализа хода роста древесного ствола, оценка биологической конкуренции между деревьями и их положения в системе координат. Полученная информация используется для имитации хода роста насаждений. Это направление получило развитие в Северной Америке (F.Negy, 1973; D.Muljo, 1973; A.Ek, 1974; B.Elfving, 1974; R.Alan, 1979)

и в Скандинавских странах (Y. Vuokila, 1967, 1972). Модели данного типа дают весьма детальную информацию о строении и росте насаждений. Главное их назначение - проверить влияние различных лесохозяйственных мероприятий (схем посадки, рубок ухода, удобрений и т.д.) на рост леса. Второй подход предполагает, что основной единицей моделирования является древостой, и модели строятся для совокупности насаждений по их средним таксационным показателям. Такие модели широко используются в различных странах в виде таблиц хода роста (В.В. Антанайтис, 1971; Н.Н. Свалов, 1975, 1978; В.В. Загребев, 1978), имитационных моделей роста. Преимущество этих моделей в возможности использовать массовые материалы лесоинвентаризации, в их простоте и меньшем объеме вычислений на ЭВМ. Третий подход моделирования - представление роста насаждения в виде модели случайного процесса. Информация собирается по данным периодической таксации древостоев на постоянных пробных площадях в процессе лесоинвентаризации. Распределение деревьев по диаметру и качественным категориям (деловые, растущие, сухостойные, отпад) рассматриваются как первоначальная матрица вероятностей. Процесс роста насаждений представляется в виде марковского случайного процесса как непрерывно-временная модель описания вероятностей перехода дерева из одного состояния в другое (Т. Suzuki, 1971, J. Mosca, 1973). Основное назначение моделей - прогнозирование роста насаждения.

2. МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Система моделирования и прогноза роста древостоев разработана по массовым материалам инвентаризации лесов Белоруссии (банк данных "Лесной фонд БССР"), данным перечислительной таксации сосновых насаждений на 655 пробных площадях, выборочной и перечислительной таксации сосновых, еловых и березовых насаждений естественного происхождения на 560 пробных площадях с рубкой и обмером 1500 модельных деревьев, материалов инвентаризации лесов Беловежской пуши, таксации древостоев на стационарах.

Исследование выполнено с применением системного подхода к решению проблемы и метода имитационного моделирования. Структура системы состоит из систем информации, планирования и принятия решения (рис. 1.1). Система информации включает сбор данных (данные лесоинвентаризации и исследовательские материалы) и их обработку. В системе планирования разрабатываются имитационные системы: строения древостоев, роста и производительности насаждений, прогноза роста древостоев и т.д. В системе принятия решения выполняется

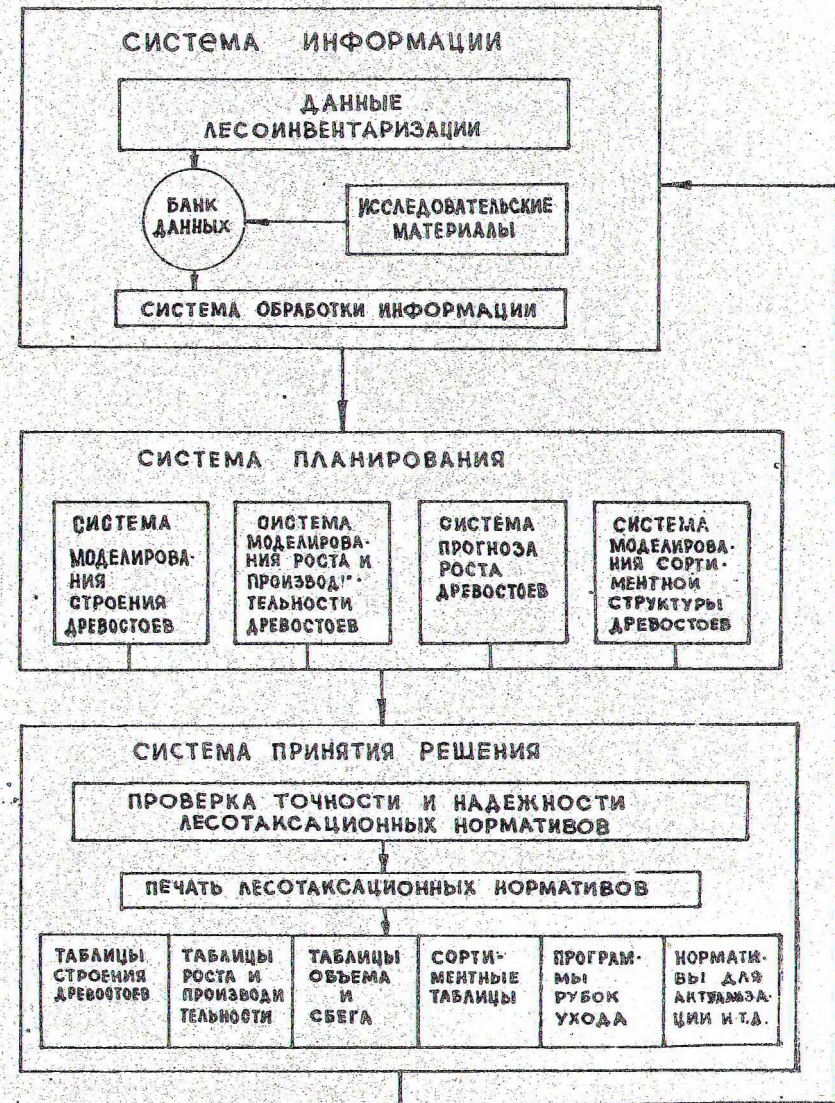


Рис. 1.1. Система моделирования и прогноза роста древостоев

проверка точности и надежности лесотаксационных нормативов (моделей). Система моделирования и прогноза роста древостоев разработана на ЕС ЭВМ, программы написаны на ФОРТРАНЕ-IV.

При планировании выборочных наблюдений по массовым материалам лесоустройства применялась стратифицированная (послойная) выборка. Элемент выборки — чистый, одновозрастной древостой одного класса возраста, типа леса (класса бонитета, почвенно-типологической группы), полнот. В пределах лесорастительных районов Белоруссии тип леса (М.Д. Юркевич, В.С. Гельтман, 1965) представлен с вероятностью пропорциональной площади насаждений в формации. Для каждого класса возраста и типа леса производится простая случайная выборка с равной вероятностью и объемом.

Совокупность насаждений разделялась на три группы полнот: 1) М — малая интенсивность рубок ухода (насаждений с относительной полнотой 0,8–1,0); 2) С — средняя интенсивность рубок ухода (полнота 0,6–0,7, т.е. средняя по БССР); 3) Т — сильная интенсивность (полнота 0,5–0,4). В пределах каждого режима ухода (М, С, Т), класса бонитета, типа леса и класса возраста совокупность древостоев подразделялась на три уровня производительности: высший, средний и низший. Средний уровень производительности устанавливался как наиболее вероятный средний уровень запасов древостоев с учетом их среднеквадратического отклонения ($M \pm \sigma$). К высшему уровню производительности относились насаждения с запасами выше среднего уровня на значение двух среднеквадратических отклонений (от $M + \sigma$ до $M + 3\sigma$). Низший уровень производительности ниже среднего на две сигмы (от $M - \sigma$ до $M - 3\sigma$). Таким образом для каждого класса бонитета или типа леса получено 9 временных рядов роста древостоев.

Для отбора насаждений из банка данных "Лесной фонд БССР" составлены программы "Выбор". Программа ВЫБОР-1 производит отбор насаждений по породам, ярусам, составу и происхождению. Программа ВЫБОР-2 выполняет отбор древостоев по полнотам, классам бонитета, типам леса, классам возраста любой градации. Программа ВЫБОР-3 предназначена для случайного отбора насаждений, организации выборочных совокупностей, проверки их однородности, статистической обработки данных и разделения совокупности на три уровня производительности. Простая случайная выборка осуществлялась объемом 500 древостоев для каждого 10-летия, т.е. около 5000 насаждений для одного типа леса. В работе выполнен отбор из банка данных сосновых насаждений естественного происхождения по типам леса и классам бо-

тета.

Корректировка данных лесоинвентаризации производилась сопоставлением их с материалами перечислительной таксации сосновых древостоев на 655 пробных площадях. Временные ряды хода роста выравнивались с возрастом древостоев по функции Г. Баюмана.

Систематическая ошибка глазомерного способа таксации определялась по формуле $S_T = 100 (T_r - T_n) T_n$, где S_T — систематическая ошибка в процентах; T — таксационный показатель, оцененный глазомерно (T_r) или перечислительным методом (T_n).

Средневзвешенные значения (вес наблюдений — значение таксационного показателя) систематических ошибок глазомерного способа таксации сосновых насаждений Белоруссии: высот от -4 до -10%, диаметров от +4 до -15%, запасов от -3 до -15%. Аналитическое описание систематических ошибок в связи с возрастом (А) и индексом класса бонитета (Н100) выполнено по регрессионным моделям вида

$$S_T = \delta_0 + \delta_1 A + \delta_2 H100 + \delta_3 (H100 \cdot A).$$

Согласно описанному алгоритму составлены программы "Ошибка" и "Коррект", по которым выполнялась оценка систематических ошибок глазомерного способа таксации насаждений и корректировка данных. Скорректированные данные использовались для разработки моделей роста и производительности древостоев, моделей прогноза роста и нормативов для актуализации лесного фонда. Исследование строения древостоев выполнено по материалам выборочной и перечислительной таксации сосновых, еловых и березовых древостоев. Для каждого древостоя оценивались статистические показатели распределений числа деревьев и сумм площадей сечений по диаметру, параметры нормального, логарифмически нормального, гамма- и бета-распределений. При разработке регрессионных моделей связи основное внимание обращалось на соблюдение предпосылок регрессионного анализа (детерминация, достоверность модели, анализ распределения остатков от регрессии и т.д.), на оценку точности, надежности и практической простоты модели.

3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ

Общая математическая модель временного ряда хода роста древостоев может быть представлена в виде

$$Y(t) = \psi(t) + u_t, \quad (3.1)$$

где $\psi(t)$ — детерминированная компонента; u_t — случайная составляющая.

Детерминированную компоненту или систематическую составляющую

можно рассматривать как некоторый уровень роста по высоте, диаметру, запасу и т.д., к которому стремится древостой в данных лесорастительных условиях. Случайная составляющая U_t , подчиняющаяся определенному вероятностному закону распределения, представляет колебания (отклонения) в росте от этого уровня, возникающие ввиду влияния окружающих объектов, биологической конкуренции деревьев в древостое, ошибок измерений и т.д. В принципе при повторении ситуации целиком функция $\Psi(t)$ должна была бы оставаться одной и той же в однородных условиях, а случайные составляющие оказались бы различными реализациями случайного процесса.

Существующие таблицы хода роста насаждений представляют собой модель, где влияние временного фактора проявляется только в систематической составляющей. При этом предполагаются, что математическое ожидание (среднее значение) остатков U_t от регрессии равно нулю, постоянная дисперсия, отсутствие автокорреляции в остатках и их нормальное распределение. Это положение не всегда выполняется при составлении таблиц хода роста насаждений.

Для математического описания детерминированной составляющей $\Psi(t)$ временного ряда роста древостоев применяются различные функции роста. Я.А.Юдицкий (1982) выполнил детальный анализ функций роста, разделив их на эмпирические функции и функции, полученные из дифференциальных уравнений. Он показал, что общее дифференциальное уравнение $y' = \beta (n^x - y^x) y$ включает как частные случаи модели роста: экспоненциальную, логистическую, Хильми, Мичерлиха, Шарфа, Ричардса. Решениями дифференциального уравнения $y' = (\alpha/t^{m+1} - \beta) y$ являются ростовые функции Шмальгаузена, Корфа, Терзаки, Коллера, Шимека. Я.А.Юдицкий предложена новая обобщенная функция роста:

$$y = v_1 \varphi [v_2 (t - v_3)] + v_4, \quad (3.2)$$

где $\varphi(x)$ - функция Маркова; v_1, \dots, v_4 - параметры.

Обобщенной S-образной функцией роста насаждений является функция Чэпмена-Ричардса:

$$W = A (1 - v e^{-kt})^{1/m}, \quad (3.3)$$

где W - значение таксационного признака в возрасте t ; A - максимальное значение признака; v, k, m - параметры, имеющие биологическую интерпретацию и значимую корреляцию с возрастом древостоев.

В работе показано, что функция (3.3) является обобщением многих известных функций роста: Мичерлиха, логистической, Гомперца,

Дракина-Буевского. Г.Бакман (1925) проанализировал функции роста и выявил, что симметричная S-образная кривая роста не отражает биологическую особенность роста организмов - период снижения скорости роста обычно более длителен, чем период ее возрастания. Предполагая, что логарифм скорости роста пропорционален квадрату логарифма времени (биологическое время - логарифмическая функция физического), Г.Бакман предложил функцию роста:

$$\lg y = v_0 + v_1 \lg A + v_2 \lg^2 A. \quad (3.4)$$

Временные ряды роста древостоев относятся к нестационарным случайным процессам, как изменение с возрастом функций распределения таксационных показателей деревьев древостоя, их математического ожидания и дисперсии. В работе представлены теория и методы статистического анализа временных рядов роста древостоев, оценки характеристик случайного процесса: автокорреляционной функции и спектральной плотности для стационарного, матрицы переходных вероятностей для марковского процессов.

Одним из значительных вкладов в статистическую теорию роста древостоев является использование дифференциальных уравнений для описания процессов (Бакман, 1962; Клуфтер, 1963; Мозер и Холл, 1969). Сложная система динамики древостоя разделяется на отдельные компоненты: $Y_{i,1}$ - число деревьев в древостое в i -ой ступени толщины в начальный момент $[t_0]$; $Y_{i,2}$ и $Y_{i,3}$ - сумма площадей сечений и запас деревьев $Y_{i,1}$; $Y_{i,4}$ - число деревьев, перешедших в i -ую ступень толщины из предыдущих ступеней за период времени $[t_0, t_n]$; $Y_{i,5}$ и $Y_{i,6}$ - сумма площадей сечений и объем деревьев $Y_{i,4}$; $Y_{i,7}$; $Y_{i,8}$; $Y_{i,9}$ - соответственно число деревьев, сумма площадей сечений и запас деревьев отпада в i -ой ступени толщины за период $[t_0, t_n]$; $Y_{i,10}$, $Y_{i,11}$ - общая сумма площадей сечений и общий запас (с учетом отпада и перехода) деревьев. В любой момент времени число деревьев в i -ой ступени толщины равно:

$$Y_{i,t} = Y_{i,1}(t_0) + Y_{i,4} - Y_{i,7} - Y_{i,9}. \quad (3.5)$$

Подобные выражения записываются для всех компонентов системы. Взяв производные в уравнениях, получим систему для описания динамики роста насаждения:

$$\left. \begin{aligned} dY_{i,1}/dt &= dY_{i,4}/dt - dY_{i,7}/dt - dY_{i,9}/dt \\ dY_{i,3}/dt &= dY_{i,6}/dt - dY_{i,9}/dt - dY_{i,11}/dt \\ dY_{i,5}/dt &= dY_{i,6}/dt - dY_{i,7}/dt + dY_{i,11}/dt \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Т. Suzuki и Т. Umemura (1974) использовали модель случайного вероятностного процесса для прогнозирования динамики распределений деревьев в древостое по диаметру. Допустим, $P(t, x; \tau, y)$ обозначает вероятность роста (перехода) диаметра дерева (x) во время (t) к диаметру (y) во время (τ) и назовем это переходной вероятностью. Если $\varphi(t, x)$ и $\varphi(\tau, y)$ представляют распределения диаметров деревьев в древостое в возрасте (t) и (τ) соответственно, то переходная вероятность равна

$$\varphi(\tau, y) = \int_0^{\infty} \varphi(t, x) P(t, x; \tau, y) dx. \quad (3.7)$$

Отсюда динамика распределения числа деревьев по диаметру в процессе роста древостоя описывается дифференциальным уравнением А.Н. Колмогорова:

$$\frac{d\varphi(\tau, y)}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dy^2} [\alpha(\tau, y) \varphi(\tau, y)] - \frac{d}{dy} [\beta(\tau, y) \varphi(\tau, y)] - \gamma(\tau, y) \varphi(\tau, y), \quad (3.8)$$

где $\alpha(\tau, y)$, $\beta(\tau, y)$, $\gamma(\tau, y)$ – вероятностные оценки дисперсии, среднего диаметра и отпада деревьев древостоя. W. Fzayez установил, что ошибки в прогнозе диаметров деревьев в рассмотренной модели случайного процесса роста древостоя были более серьезными, чем в оценке первоначальных таксационных показателей насаждения.

Случайный процесс роста древостоя описывается n -мерной функцией распределения вероятностей. Модель с такой сложной связью разработать практически трудно, поэтому применяют модель Маркова с простой связью, в которой прогноз системы зависит от состояния системы в настоящий момент.

Случайный процесс роста древостоев в виде марковского процесса описывается матрицами переходных вероятностей. Общее число растущих деревьев древостоя в i -ой степени толщины в начале периода роста (t) равно.

$$W_{t,i} = W_{t-1,i-1} + \bar{W}_{t-1,i}. \quad (3.9)$$

Процесс роста древостоя представлен четырьмя основными уравнениями для растущих, вырубленных, усохших и отпавших деревьев. Задача состоит в определении вероятностей событий P_i , \bar{P}_i , ... для соответствующих состояний деревьев $W_{t,i}$, $\bar{W}_{t,i}$, ... Тогда получим:

$$W_{t,i} = \sum_{k=0}^{t-1} N_{0,i-t+k} \left[\prod_{j=1}^{t-k} P_{i-j} \right] < k, \bar{P}_i \dots \bar{P}_{i-t+k} > t \geq 0, i \geq 1, \quad (3.10)$$

где $W_{t,i}$ – число растущих деревьев в i -ой степени толщины в период (t), которые переходят в ($i+1$) степень толщины в течение года; $\bar{W}_{t,i}$ – число растущих деревьев в i -ой степени в период (t), которые не переходят в следующую ($i+1$)

ступень; $N_{0,i}$ - начальное число деревьев; P - произведение вероятностей; индекс t, i, j - переход от i -ой ступени в j -ую ступень толщины в период $[0, t]$.

Динамика роста древостоя описывается системой дифференциальных уравнений с частными производными, полученной на основе моделей вида 3.9-3.10 (L. Peden, T. Williams, W. Fryer, 1973).

Сложность аналитического представления вероятностного процесса роста древостоев повлекла широкое применение имитационных моделей строения и хода роста. В совместных моделях строения и роста древостоев (H. Valiaho, Y. Vuokila, 1973; G. Hamilton, J. Christie, 1974; B. Allison, J. Clutter, 1974) используются регрессии связи для предсказания среднего диаметра и дисперсии распределения диаметров деревьев, по которым вычисляются параметры функции распределения числа деревьев по диаметру в древостое. Модели позволяют разработать систему имитации рубок ухода.

В моделях роста и производительности древостоев (П.В. Воробьев, 1966; J. Clutter, 1963; Н.Н. Свалов, 1974) используются регрессии связи текущего прироста с таксационными показателями. Модели применяются при построении таблиц хода роста насаждений.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ДРЕВОСТОЕВ

Основоположники учения о закономерностях строения насаждений А.В.Тюрин и Н.В.Третьяков создали научное направление, которое было развито советскими учеными А.И.Тарашкевичем, А.И.Кищенко, В.К.Захаровым, Ф.П.Моисеенко, М.В.Давидовым, К.Е.Никитиным, П.В.Горским, Н.П.Анучиным, В.И.Левиным, Э.Н.Фалалеевым, С.С.Шаниным, Н.Н.Сваловым, В.С.Моисеевым, А.А.Макаренко, В.М.Иванюта, А.Г.Мошкалевым, П.М.Верхуновым, Н.Н.Гусевым, А.З.Швиденко и другими.

Особое значение в строении древостоев занимают модели распределения деревьев по диаметру, на основе которых можно получить распределения других таксационных показателей. Распределения деревьев по диаметру в насаждениях характеризуются тремя типами: 1) одновершинным унимодальным, которое наблюдается в чистых одновозрастных древостоях; 2) убывающим J -образным, характерным для смешанных насаждений; 3) многомодальным (многовершинным) распределением, имеющим место в разновозрастных и многоярусных насаждениях. Известно три подхода к аналитическому описанию одновершинных распределений деревьев по диаметру: 1) применение функций теоретических распределений (нормального, логнормального, гамма- и

бета-распределений и т.д.); 2) представление плотности опытного распределения в виде ряда производных нормального распределения (ряды Грама-Шарлье, Эдхворта); 3) обобщенные методы описания (кривые Пирсона и Джонсона).

Исследование строения чистых одновозрастных сосновых, еловых и березовых насаждений выполнено по данным перечислительной таксации древостоев на 450 пробных площадях в возрасте от 10 до 160 лет, I^a-У^a классов бонитета с относительной полнотой 0,5-1,0.

В работе выполнен статистический анализ выборочных показателей опытных распределений числа деревьев и площадей сечений по диаметру (среднеквадратического отклонения, показателей асимметрии и эксцесса), параметров теоретических распределений, разработаны регрессионные модели связи выборочных показателей и параметров со средним диаметром древостоев.

Статистический анализ опытных распределений показал, что среднеквадратические отклонения ($\sigma = 30-33\%$) зависят от минимального и максимального диаметров деревьев в древостое, значения которых изменяются с возрастом, условиями местопроизрастания, способом и интенсивностью рубок ухода. Для березняков наблюдается достоверное превышение среднеквадратических отклонений на +10-20% в сравнении с сосновыми древостоями. При одинаковых среднем диаметре, числе деревьев и размахе распределения ($d_{\max} - d_{\min}$) среднеквадратические отклонения достоверно не различаются по типам леса. Составлены таблицы значений среднеквадратических отклонений в зависимости от среднего диаметра древостоя.

Оценки показателей асимметрии и эксцесса распределений варьируют в значительных пределах ($\sigma = 90-400\%$). Значения показателей зависят не только от таксационных признаков древостоев, но и от числа, величины ступеней толщины, количества деревьев в крайних ступенях толщины и т.д. При этом изменяются статистические модели распределений (тип кривой Пирсона, члены ряда обобщенного нормального распределения). Корреляция между средним диаметром древостоя и показателями асимметрии и эксцесса слабая ($r = 0,3 - 0,4$).

Исследования показывают, что функции теоретических распределений наиболее приемлемы для создания системы моделирования и прогноза динамики строения древостоев. Применение статистических моделей распределения, имеющих показатели асимметрии и эксцесса, от которых зависят не только члены уравнения (ряд Грама-Шарлье), но и тип модели (кривые Пирсона), является ненадежным ввиду низ-

кой точности оценки асимметрии и эксцесса по регрессионным моделям связи с таксационными показателями древостоев (относительная ошибка моделей 20-40%).

Статистическая оценка моделей теоретических распределений показала, что из 450 опытных распределений 71% согласуются с бета-распределением, 11% - нормальным, 6% - логнормальным, 12% - с гамма-распределением. Логнормальное распределение хорошо описывает распределения с невысокими показателями положительной асимметрии и эксцесса ($As; E \leq 0,5$). При отрицательной асимметрии распределений диаметров эта модель значительно преуменьшает число маломерных деревьев. Гамма-функция согласуется с распределением диаметров деревьев в насаждениях, не пройденных рубками ухода, и во многих случаях дает результаты, подобные логнормальному распределению. Составлены таблицы значений параметров логнормального и гамма-распределений в зависимости от среднего диаметра древостоя.

Наиболее гибким является бета-распределение, имеющее два параметра формы:

$$f(d) = c (d - d_{\min})^{\alpha} (d_{\max} - d)^{\beta}, \quad (4.1)$$

где α, β - параметры формы; c - коэффициент соответствия площади под кривой распределения числу деревьев древостоя; d_{\min} , d_{\max} - минимальный и максимальный диаметры деревьев в древостое.

При $\alpha > 1$ и $\beta > 1$ имеем одновершинное унимодальное распределение, характерное для чистых одновозрастных древостоев. Если $\alpha \geq 1$; $\beta < 1$ наблюдается J-образная форма для смешанных насаждений. При $\alpha < 1$ и $\beta \geq 1$ распределение имеет вид убывающей функции. Параметр формы (α) бета-распределения изменяется от -0,25 до 5,2 ($\sigma = 60-65\%$). Параметр формы (β) варьирует от -0,5 до 11,0 ($\sigma = 60-63\%$). Распределения параметров характеризуются значительной положительной асимметрией и эксцессом. Корреляция между параметрами достоверна ($r = 0,4-0,6$).

Система моделирования строения древостоев создана на основе установленных закономерностей строения, применения функции бета-распределения, регрессионных моделей связи, алгоритма вычисления таксационных показателей древостоя. Выборочными или глазомерно-измерительными методами таксации без сплошного перечета деревьев оцениваются таксационные показатели древостоя: возраст (A), сумма площадей сечений (G) или число деревьев на 1 га (N), средний диаметр (d) и высота (H), класс бонитета ($H100$), минималь-

ный ($d_{\text{мин}}$) и максимальный ($d_{\text{мак}}$) диаметры деревьев. По регрессионным моделям связи оценивается среднеквадратическое отклонение распределения числа деревьев по диаметру в древостое. Параметры формы бета-функции вычисляются через среднеарифметический диаметр (\bar{D}) и дисперсию (σ_d^2) распределения по алгоритму, предложенному F. Zöhlre (1970). Алгоритм программы "Строение" составлен таким образом, что площадь под кривой теоретического распределения равна числу деревьев древостоя, центром распределения является среднеарифметический диаметр (\bar{D}). Последовательной итерацией путем изменения формы и размаха кривой распределения выбирается теоретическая бета-функция, лучше подходящая опытному распределению (рис. 4.1).

Регрессионные модели связи среднеквадратического отклонения σ_d с возрастом ($z = 0,65-0,66$), суммой площадей сечений ($z = 0,57-0,59$), средними высотой ($z = 0,81-0,86$) и диаметром ($z = 0,84-0,90$) древостоя, размахом распределения диаметров ($z = 0,88-0,94$) разработаны в виде: $\sigma_d = f(A, G, d_{\text{мин}}, d_{\text{мак}})$; $\sigma_d = f(A, G, H, d_{\text{мак}} - d_{\text{мин}})$; $\sigma_d = f(\bar{D}, d_{\text{мак}} - d_{\text{мин}})$; $\sigma_d = f(A, d_{\text{мак}} - d_{\text{мин}})$. Проверкой моделей на 35 контрольных пробных площадях получены максимальные отклонения $\pm 1,5$ см, среднеквадратическая ошибка $\pm 10,9\%$.

Модели связи диаметров и высот деревьев получены по данным таксации 1500 модельных деревьев. Исследованы уравнения параболического, логарифмического и экспоненциального типов. Особое внимание уделялось соблюдению предпосылок регрессионного анализа. Уравнения параболического типа характеризуются автокорреляцией в остатках ($R_1 = 0,4-0,6$), распределение которых значительно отличается от нормального. Уравнения логарифмического типа имеют нормальное распределение остатков и меньшую относительную ошибку. Лучшие результаты получены по уравнениям Корсуна и Г.Бакмана, а также моделям вида: $h = f(d, \bar{D}, H, H/100)$; $h = f(d, \bar{D}, H, \bar{D}/H)$;

$$h = f(\lg d, \bar{D}, H, \bar{D}/H, \lg H/100); \quad \lg h = f(\lg d, \bar{D}, H, \bar{D}/H, \lg H/100),$$

где h, d - высота и диаметр дерева; $H/100$ - индекс класса бонитета или высота в 100 лет для хвойных насаждений. Среднеквадратическая ошибка моделей высот $\pm 3\%$.

Модель видовой высоты (HF) разработана по данным перечислительной таксации сосновых древостоев на 655 пробных площадях в виде $HF = f(H, H \bar{D}^{-2}, H/100)$ с относительной ошибкой $\pm 10\%$.

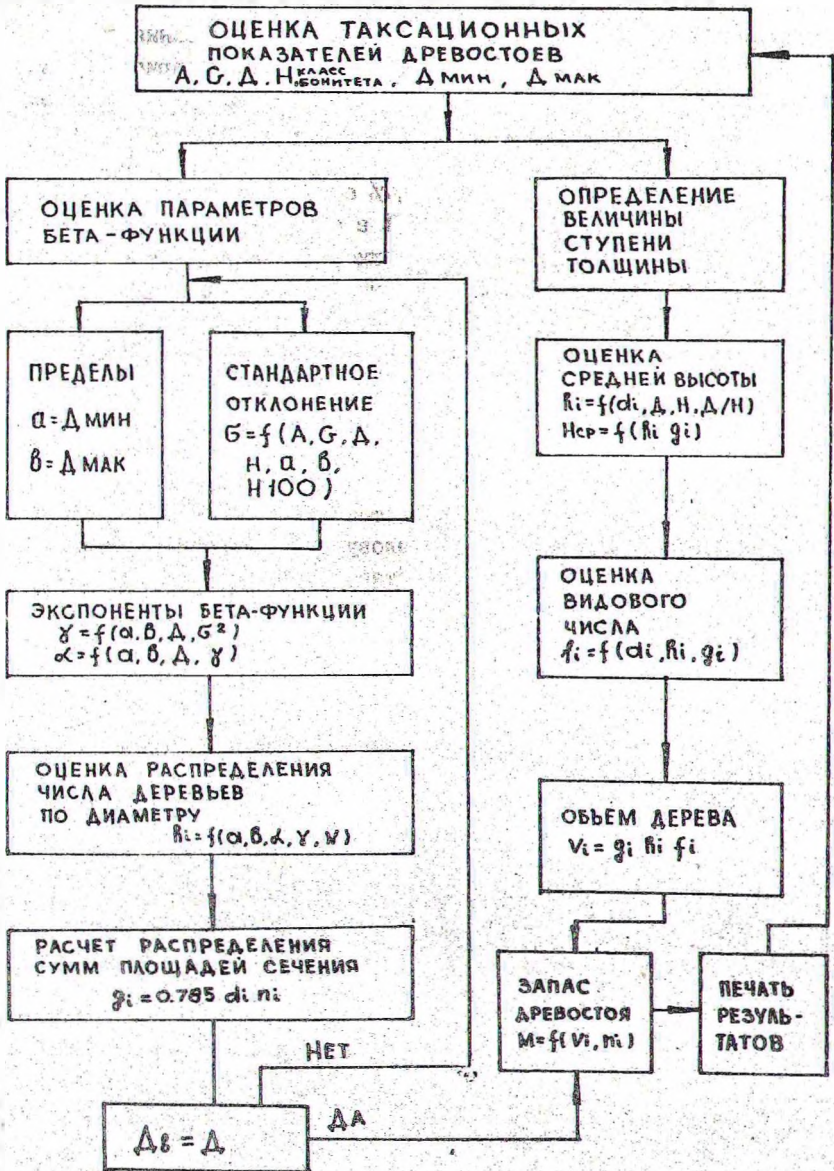


Рис. 4. I. Структура системы моделирования строения древостоев

Проверка точности и надежности системы моделирования строения древостоев выполнена имитацией на ЭВМ различных вариантов точности таксации древостоев. При $\pm 5\%$ точности оценки суммы площадей сечений древостоя, среднеквадратические ошибки составили: по диаметру $\pm 0,2\%$, высоте $\pm 2,8\%$, запасу $\pm 5,9\%$. Точность таксации G м²/га $\pm 10\%$ дает ошибку по запасу $\pm 10,7\%$ с максимальными отклонениями $\pm 11-16\%$. Относительная ошибка $\pm 10\%$ в оценке стандартных отклонений по модели меньше влияет на погрешность оценки запаса древостоя ($S_M = \pm 3,1\%$). Сравнение выхода имитационной модели "Строение" с данными перечислительной таксации сосновых древостоев показало относительные ошибки оценок средних диаметров древостоев от $+0,9$ до $-0,5\%$, средних высот от $+7,8$ до $-4,8\%$, сумм площадей от $+2,0$ до $-0,8\%$, запасов от $+5,3$ до $-4,4\%$.

Создана имитационная модель "Лесосека" для материально-денежной оценки запаса древостоя. Вводом в модель являются данные выборочной или глазомерной таксации древостоев без перечета деревьев. Выход - распределение древесины на деловую по категориям крупности, дрова и отходы. Основу модели составляют алгоритм программы "Строение" и регрессии связи объема крупной ($V_{кр}$), процента средней ($P_{ср}$) и мелкой ($P_{м}$) деловой древесины с диаметром (d), высотой (h) и объемом (V) ствола, полученные по данным сортиментных таблиц Ф.П.Моисеенко в виде $V_{кр} = f(V, l_g, d)$; $P_{ср} = f(d, h, l_g, V)$; $l_g P_{м} = f(d, h, l_g, V)$. Для оценки надежности имитационной модели сравнивались результаты перечислительной таксации в сосновых лесах 10 лесосек главного пользования общей площадью 9,3 га и сортиментации запаса по таблицам Ф.П.Моисеенко (100%) с данными модели на ЭВМ. Погрешности в оценках запасов деловой древесины составили от $-12,7$ до $+3,0\%$, ликвидной от $-8,9$ до $+12,1\%$. Среднеквадратические ошибки для 10 лесосек по выходу крупной деловой $\pm 7,9\%$, средней деловой $\pm 9,1\%$, общему объему деловой $\pm 8,7\%$, ликвидной $\pm 4,9\%$, общего запаса древесины $\pm 2,9\%$. Общдая таксовая стоимость древесины различается на $-0,3\%$, в том числе деловой $-0,7\%$.

Разработана имитационная модель "Диаметр" для составления таблиц распределения числа деревьев по ступеням толщины применительно к таблицам хода роста насаждений. Входом являются данные таблиц хода роста. Основу модели составляют алгоритм программы "Строение" и регрессионные модели связи: $d_{макс} = f(A, G, D, H)$; $l_n(d_{макс} - d_{мин}) = f(l_n A, l_n G, l_n(D+20), l_n H, 100)$.

Моделирование на ЭВМ показало, что результаты по модели практически совпадают с данными таблиц хода роста; 1) число деревьев совпадает точно, так как это заложено в алгоритме программы; 2) средний диаметр различается на $0,1-0,2$ см; 3) максимальные отклонения по средней высоте $\pm 0,5-1,0$ м; 4) сумма площадей сечения совпадает до $0,1-0,3$ м²; 5) отклонения по запасу до $\pm 5\%$.

Система моделирования строения и сортиментной структуры древостоев (имитационные модели "Строение, Лесосека, Диаметр") предназначена для исследования и анализа таксационного строения древостоев, составления таблиц распределения деревьев по таксационным показателям, материально-денежной оценке запасов, товарности насаждений на оборот рубки. Система может расширяться другими практическими задачами.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

Исследование продуктивности, хода роста и общей производительности насаждений, выполненное по данным глазомерно-измерительной, выборочной и перечислительной таксации лесов Белоруссии, является основой создания системы моделирования роста и производительности древостоев.

Разработана имитационная модель хода роста насаждений. В соответствии с целью моделирования (назначение таблиц хода роста) формируются задачи, требующие решения, производится сбор и обработка данных таксации древостоев.

По программам "Выбор" выполняется отбор древостоев из банка данных и их статистическая обработка, по программам "Ошибка" и "Коррект" - оценка систематических ошибок и корректировка данных глазомерно-измерительной таксации насаждений. Выдвигается ряд гипотез в отношении логической структуры и формы регрессионных моделей связи таксационных показателей древостоев с возрастом и классом бонитета, выполняется статистическая оценка параметров регрессий связи. Ход роста по высоте, диаметру, запасу древостоев получен по функции Г.Бакмана, а также модели $l_g Y = b_0 + b_1 l_g A + b_2 l_g H, 100$. Общая производительность древостоев установлена двумя способами: по моделям текущего прироста по запасу $l_g P_{м} = b_0 + b_1 l_g A + b_2 l_g M + b_3 l_g^2 A + b_4 l_g H, 100$; моделям таксационных показателей деревьев отпада $D^{отп} = f(D^2, H, 100, l_g A, l_g H)$; $H^{отп} = f(l_g D^{отп}, H, 100)$. Выполняются расчеты по моделям на ЭВМ, проверяя любые допущения в отношении логической структуры и формы регрессий связи, работы моделей в крайних режимах (при максималь-

ных и минимальных значениях высот, диаметров, числе деревьев древостоя). Проверка имитационной модели производится с целью оценки надежности и точности модели в решении поставленных задач. На основании эксперимента на ЭВМ с моделью дается анализ и интерпретация результатов, сравнивая их с данными в лесотаксационной литературе и стационарными наблюдениями, выбирается оптимальный вариант имитационной модели хода роста древостоев. Новые, более точные данные таксации лесов влекут перераспределение задач и этапы в разработке имитационной модели повторяются, т.е. это – непрерывный, повторяющийся процесс периодического обновления лесотаксационных нормативов.

По программе "Бонитет" составлены таблицы (модели) производительности чистых сосновых древостоев БССР по классам бонитета для трех режимов ухода (М,С,Т) и трех уровней производительности (высший, средний, низший) в пределах каждого режима ухода: I^a класс бонитета (С.кисличный, С.орляковый), I класс бонитета (С.орляковый, С.мшистый), II класс бонитета (С.брусничный, С.черничный), III класс бонитета (С.вересковый), IV класс бонитета (С.осоковый, С.багульниковый), V класс бонитета (С.осоково-сфагновый), V^a класс бонитета (С.сфагновый). Таблицы показывают фактическую производительность древостоев по классам бонитета. Для назначения лесохозяйственных мероприятий, оптимизации лесовыращивания и оценки степени использования лесных земель, состояния лесного фонда и лесоустроительного проектирования разработаны таблицы (программа "Тип леса") роста и производительности сосновых насаждений по типам леса. Из банка данных производилась случайная выборка сосновых древостоев по типам леса: С.липайниковый, С.вересковый, С.брусничный, С.мшистый, С.орляковый, С.кисличный, С.черничный, С.долгомощный, С.багульниковый, С.сфагновый и составлены таблицы по режимам ухода (М,С,Т) и уровням производительности.

Ход роста сосновых древостоев естественного происхождения различается по уровням производительности. Средние высоты древостоев от высшего к низшему уровню производительности уменьшаются на 20–40%, средние диаметры на 15–40%, запасы древесины на 25–50%, общая производительность древостоев в 1,5–2 раза.

Модели роста и производительности эталонных насаждений разработаны на основе исследования древостоев высшего уровня производительности, с максимальными запасами и текущим приростом, оптимизацией структуры, породного состава, продуктивности, густоты и сор-

тиментной структуры насаждений. Понятие эталона – различное и меняется в зависимости от цели хозяйства, экономических и лесорастительных условий.

Оптимизация породного состава и вертикальной структуры насаждения достигается оценкой среднего состава насаждений высшего уровня производительности по массовым материалам лесинвентаризации. Уровень оптимальной продуктивности древостоев определялся отбором насаждений с максимальными запасами, оптимизацией сортиментной структуры запаса насаждений с наибольшими средними диаметрами и таксовой стоимостью древесины на оборот рубки. Оптимальная абсолютная полнота или сумма площадей сечения древостоев получена делением оптимального запаса на видовую высоту (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Производительность эталонных насаждений по типам леса

Возраст лет	Средняя высота	Средний диаметр	Число деревьев	Сумма площадей сечения	Видовое число	Запас, м ³	Прирост, м ³		Сумма кубического полезного пользования, м ³	Общая производительность, м ³
	м	см		м ²			средний	текущий		
Сосняк черничный (древостой)										
20	10,3	8,5	4542	25,7	0,543	144	9,3	11,2	41	185
40	17,8	15,8	1647	32,3	0,492	284	10,5	11,6	138	422
60	22,9	22,5	893	35,6	0,476	388	10,5	10,0	242	630
80	26,5	28,9	576	37,7	0,468	467	10,1	8,3	337	804
100	29,2	34,9	409	39,1	0,463	529	9,5	6,9	420	949
Отпад (вырубемая часть)										
20	4,8	4,1	7021	9,2	0,680	29				
40	12,1	11,3	878	8,8	0,559	52				
60	17,5	17,0	284	6,5	0,502	51				
80	21,7	21,6	130	4,8	0,485	46				
100	25,0	25,3	72	3,6	0,475	40				

По программе "Эталон" составлены таблицы роста и производительности эталонных сосновых древостоев естественного происхождения по типам леса (табл. 5.1). Моделями критического уровня производительности приняты модели низшего уровня производительности насаждений. Таблицы дополнены моделями динамики строения древостоев по диаметру, позволяющими имитировать на ЭВМ рубки ухода, сортиментную структуру (табл. 5.2). Система позволяет составить таблицы производительности

эталонных насаждений по группам лесов и категориям защитности, лесорастительным районам Белоруссии. Такие таблицы на определенных этапах формирования эталонных лесов являются моделями хозяйственно-целесообразных насаждений (К.Б. Лосицкий, В.С. Чуенков, 1980).

Таблица 5.2

Динамика строения по диаметру эталонных насаждений

Возраст, лет	На-чалая ступень	Ве-ли-чина ступе-ни	Ступени толщины, см											
			8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52
Сосняк черничный (древостой)														
20	2	2	236	657	918	999	896	623	212	-	-	-	-	-
40	4	2	8	51	112	172	219	246	248	225	171	120	57	9
60	8	4	9	77	162	215	209	149	65	7	-	-	-	-
80	12	4	-	5	35	76	108	121	110	78	38	5	-	-
100	16	4	-	-	2	18	43	66	78	76	61	40	19	6
Отпад (вырубаемая часть)														
20	1	1	974	1283	1301	1184	984	727	435	133	-	-	-	-
40	4	2	29	99	153	179	174	140	83	21	-	-	-	-
60	8	4	1	76	111	77	19	-	-	-	-	-	-	-
80	12	4	-	10	29	36	32	19	4	-	-	-	-	-
100	12	4	-	1	8	15	18	16	10	4	-	-	-	-

Исследования показали, что выращивание перегушенных сосновых древостоев с большим числом тонкомерных деревьев отрицательно сказывается на выход крупнои деловой древесины. Средние диаметры древостоев в сосняках черничных критического уровня производительности в 1,5-2 раза меньше, чем в эталонных сосняках черничных, продуктивность и выход крупнои деловой древесины ниже на 20-60%. Оптимальное число деревьев в 20-летних эталонных сосновых насаждениях составляет 3000-4000 шт/га, т.е. при современной практике создания лесных культур в Белоруссии оптимальным является 5-10 тыс. шт/га посадочных мест.

При вовлечении в хозяйственный оборот природных ресурсов, в том числе лесных, необходимо следить за сохранением экологическо-

го равновесия в биосфере, изучать объективные законы взаимодействия между компонентами лесного биогеоценоза в лесах заповедников. Такие эталоны живой природы как бы дополняют эталонные леса, вовлеченные в эксплуатацию.

По материалам инвентаризации лесов Беловежской пуши - уникального заповедника живой природы - разработаны модели (таблицы) роста и производительности сосновых насаждений по почвенно-типологическим группам. Классификация почвенно-типологических групп применяется в лесоустройстве на лесотипологической основе с учетом степени влажности и богатства почвы, характера подстилающей породы. При инвентаризации лесов пуши в 1961 г. выделено 14 ПТГ от сосняков лишайниковых, произрастающих на дерново-подзолистых рыхлопесчаных автоморфных почвах до сосняков сфагновых, произрастающих на торфяно-болотных почвах верхового типа. По данным таксации 6896 сосновых насаждений пуши на ЭВМ вычислены средневзвешенные (вес наблюдений - площади таксационных выделов) значения состава, класса бонитета, диаметра, высоты, относительной полноты и запаса древостоев. Аналитическое выравнивание показателей с возрастом насаждений выполнено по функции Г.Бакмана. По программе "ПТ ГРУППЫ" составлены таблицы производительности сосновых насаждений по почвенно-типологическим группам для первого и второго ярусов. В таблицах представлена динамика состава, класса бонитета, высот, диаметров и других таксационных показателей древостоя в целом, в том числе характеристика отпада. Таблицы дополнены таблицами динамики строения древостоев по диаметру.

Продуктивность и общая производительность сосновых древостоев различается по ПТГ в зависимости от влажности и богатства почвы. Так, сосняки черничные произрастают на временно увлажняемых песчаных почвах (общая производительность в 100 лет: $M_{\text{общ}} = 706 \text{ м}^3$), глееватых и глеевых почвах ($M_{\text{общ}} = 717 \text{ м}^3$) и на глееватых двухчленных почвах ($M_{\text{общ}} = 774 \text{ м}^3$). Наиболее продуктивные сосняки черничные произрастают на избыточно-увлажняемых супесчаных и суглинистых почвах ($M_{\text{общ}} = 824 \text{ м}^3$) и по общей производительности они близки к эталонным насаждениям в типе леса сосняк черничный. Исследование производительности древостоев по почвенно-типологическим группам позволяет получить более надежные лесотаксационные нормативы для экономической оценки лесных земель, как основного средства производства, так как производительность при этом устанавливается не только в целом от лесорастительных условий по типам леса, а

в зависимости от влажности и богатства почвы, характера подстилающей породы.

Система позволяет разрабатывать таблицы продуктивности модальных насаждений для оценки фактической продуктивности лесовобъекта лесоустройства, степени использования лесных земель, резервов повышения продуктивности лесов. По материалам инвентаризации лесов Беловежской пуши (14,4 тыс. таксационных выделов) вычислены средневзвешенные значения состава, класса бонитета, высоты, диаметра, относительной полноты, запаса древостоев по преобладающим породам, типам леса и классам возраста. Динамика состава, класса бонитета и относительной полноты устанавливалась по модели $lg Y = \alpha + \beta \cdot lg A$ других показателей — по функции Г. Бакова. Модели видовых высот разработаны на основе местных таблиц хода роста насаждений. По программе "Рост" составлено 49 таблиц продуктивности модальных насаждений Беловежской пуши, не затронутых интенсивной хозяйственной деятельностью, для сосновых, еловых, березовых, дубовых, осиновых и черноольховых насаждений по типам леса (табл. 5.3).

Таблица 5.3
Продуктивность модальных насаждений по типам леса

Возраст, лет	Состав	Класс бонитета	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Число деревьев, шт.	Сумма площадей, м ²	Относительная полнота	Высота, м	Запас, м ³ при полноте	Текущий прирост	Полнота
Сосняк черничный											
20	1	9С2Б	1 ^а 9	9,2	10,0	2419	19,2	0,82	0,558	99	121
	2	9Е1Б		6,6	6,1	2244	6,6	0,34	0,608	26	77
40	1	8С1ЕБ	1.1	16,7	18,2	917	23,8	0,75	0,496	197	276
	2	8Е2Б		10,6	10,6	789	7,0	0,25	0,539	40	158
60	1	8С1ЕБ	1.3	21,5	24,5	531	25,0	0,60	0,478	257	387
	2	8Е1СБ		13,2	13,6	525	7,6	0,24	0,516	52	218
100	1	8С1ЕБ	1.5	26,6	33,9	278	25,0	0,61	0,467	310	512
	2	8Е1СБ		16,2	17,2	393	9,1	0,25	0,498	68	277
150	1	9С1Б	1.7	29,1	42,0	172	23,8	0,56	0,462	321	569
	2	8Е2Б		18,1	19,5	374	11,2	0,30	0,489	94	331
200	1	9С1Б	1.9	29,7	47,8	125	22,4	0,53	0,461	308	575
	2	8Е2Б		19,0	20,7	399	13,4	0,35	0,486	119	355

Особое значение в ОАСУ-лесхоз имеет система актуализации и прогнозирования динамики лесного фонда. В работе предложена структура системы актуализации лесного фонда БССР, включающая банк данных "Лесной фонд БССР", систему внесения текущих изменений, систему прогноза роста древостоев.

Система прогноза роста древостоев разработана методом имитационного моделирования. Скорректированные данные глазомерно-измерительной таксации сосновых насаждений республики использованы для вычислений среднепериодического текущего прироста $Z_n^T = (N_{n+10} - N_n)/10$ (по высоте и диаметру), текущего изменения запасов и относительного прироста $P_n = (Z_n^T \cdot 100)/N_n$. В системе прогноза роста выполнена оценка более 1000 моделей связи таксационных показателей древостоев по классам бонитета, режимам ухода и уровням производительности в виде: $lg Y = f(lg A, lg^2 A, lg H 100)$; $Y = f(A, H 100)$; $lg Y = f(lg A, T, lg H 100)$; $lg Y = f(lg A, lg G, (1 - A_1/A_2) H 100)$; $lg G_2 =$ (или $lg M_2$) $= f(A_1, A_2, G_1, G_2, H 100)$, где Y — абсолютный или относительный среднепериодический текущий прирост по таксационному показателю древостоя (T); $A_1, A_2, G_1, G_2, M_1, M_2$ — возраст, сумма площадей сечения и запасы древостоев в настоящий момент и через 10 лет. По программе "Прирост" выполнена оценка прироста и моделей связи, программе "Прогноз" — проверка точности прогноза по моделям в сравнении с данными местных таблиц хода роста. Выбор рациональных моделей прогноза производился на основе структурных и функциональных анализов регрессионных моделей различного вида, их точности и надежности по массовым материалам таксации сосновых древостоев и местных таблиц хода роста.

Имитационная система прогнозирования роста древостоев представлена в виде системы математических моделей хода роста и регрессионных уравнений связи таксационных показателей древостоев, которые записываются в виде файлов в память ЭВМ и доступны в процессе вычислений. Ввод информации — древесная порода, коэффициент состава, индекс класса бонитета или типа леса, таксационные показатели древостоя. Для насаждений, пройденных рубками ухода, дополнительно вводятся: запас вырубленной древесины и число вырубленных деревьев. Рассматривается два варианта прогноза: 1) естественного роста насаждений; 2) динамики таксационных показателей древостоев в связи с рубками ухода. На ЭВМ имитируется ход

роста древостоя, обращаясь к моделям, записанным в файлах внешней памяти ЭВМ.

Актуализация лесного фонда выполняется: 1) повыведельная актуализация; 2) по итоговым таблицам классов возраста. Прогнозирование роста древостоев в имитационной модели прогноза роста насаждений для повыведельной актуализации выполняется: по высоте и диаметру $\lg P_n = b_0 + b_1 \lg A + b_2 \lg^2 A + b_3 \lg H_{100}$; по запасу $\lg P_n = b_0 + b_1 \lg A + b_2 \lg M + b_3 \lg H_{100}$.

Таблица 5.4

Процент текущего изменения запасов сосновых древостоев (за I год)

Запас, м ³	Возраст, лет					
	10	30	50	70	90	110
20	12,27	4,63	2,54	2,18	-	-
60	9,54	3,60	2,29	1,69	1,36	1,13
100	-	3,20	2,03	1,51	1,21	1,01
200	-	2,73	1,73	1,29	1,03	0,86
400	-	-	-	1,10	0,88	0,73
600	-	-	-	-	0,80	0,67

Для актуализации лесного фонда лесхоза по итоговым таблицам классов возраста используются модели связи процента среднепериодического текущего изменения запасов (P_n) древостоев (в коре) с возрастом (A) и запасом (M): $\lg P_n = b_0 + b_1 \lg A + b_2 \lg M$. Лесотаксационные нормативы разработаны в виде математических моделей и табличные для основных лесобразующих пород Белоруссии (табл. 5.4) и на 01.01.1983 г. по данным нормативам на ЕС ЭВМ выполнена актуализация лесного фонда республики. Подчеркивается, что для актуализации лесного фонда лесхозов необходимо создание более общих моделей, где независимой переменной является шифр древесной породы. Большое значение имеет сверстка (сжатие) лесоустроительной информации в виде функций распределений. Это сократит объем внешней памяти и время актуализации на ЭВМ.

Проверка надежности системы прогноза роста древостоев выполнена сравнением данных прогноза с 1970 г. (глазомерная таксация сосновых насаждений лесхоза) до 1980 г. с материалами выборочной таксации. Точность прогноза высот и диаметров древостоев от $\pm 1,0$ до $\pm 9,5\%$, запасов от $\pm 4,0$ до $13,8\%$. Модели прогноза роста

не исправляют систематических ошибок глазомерного способа таксации лесов. Повышение надежности системы связано с внедрением измерительных и выборочных методов таксации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследования подтверждают перспективность нового научного направления в лесной таксации в решении проблемы моделирования роста леса на ЭВМ с позиций системного подхода, имеющей важное народнохозяйственное значение в создании информационно-развивающихся автоматизированных систем, совершенствовании учета лесов, планирования и управления в лесном хозяйстве.

С позиций системного подхода представлены структура и научные основы создания системы лесохозяйственной информации, предназначенной для разработки многовариантных программ ведения лесного хозяйства в ОАСУ-лесхоз. Система должна быть дешевой (эффективность системы) и достаточно быстродействующей, чтобы непрерывно разрабатывать программы ведения лесного хозяйства, так как научно-технический прогресс предопределяет, что любая оптимальная программа является преходящей и недолговечной. Эффективность системы в значительной степени определяется наличием достаточно полной и надежной информации о росте и производительности лесов, состоянии и динамике лесного фонда.

2. Обобщена и представлена статистическая теория роста древостоев как теоретическая, методическая основа математического моделирования и разработки лесотаксационных нормативов. Рассмотрены случайный процесс роста древостоев, статистический анализ и модели временных рядов хода роста; вероятностные процессы роста деревьев в древостое, марковские модели роста и модели в виде системы дифференциальных уравнений, имитационные модели строения, роста и производительности насаждений. Выполнен анализ преимуществ и недостатков моделей, объем необходимой информации для решения поставленных задач.

3. Исследовано строение сосновых, еловых, березовых древостоев и разработана система моделирования строения и сортиментной структуры древостоев. Система позволяет на основе данных выборочной или глазомерно-измерительной таксации насаждений без перечета деревьев получать: а) таблицы распределения числа деревьев, сумм площадей и запасов по ступеням толщин; б) таблицы динамики строения древостоев по диаметру и другим таксацион-

ным показателям к таблицам хода роста; в) данные для материально-денежной оценки лесосек и подготовки лесосечного фонда в виде таблиц распределения числа деловых и дровяных деревьев по ступеням толщины, выхода деловой древесины по категориям крупности, дров и отходов; г) таблицы динамики товарности древостоев по классам бонитета, типам леса и почвенно-типологическим группам.

4. Изучены закономерности хода роста древостоев и создана система моделирования роста и производительности насаждений по классам бонитета, типам леса и почвенно-типологическим группам. Система позволяет на основе массовых материалов лесоинвентаризации, данных выборочной и перечислительной таксации разрабатывать таблицы (модели) производительности древостоев по режимам ухода и уровням производительности, по классам бонитета, типам леса и почвенно-типологическим группам, таблицы продуктивности модальных насаждений по типам леса, модели нормальной, оптимальной и критической производительности.

5. Разработана система прогноза роста древостоев для кратко-срочных и долгосрочных прогнозов в лесохозяйственном планировании и лесоустроительном проектировании. Представлена структура системы актуализации лесного фонда БССР, лесотаксационные нормативы (математические модели и табличные) для поведельной актуализации лесного фонда и по итоговым таблицам классов возраста для основных лесобразующих пород республики.

6. Выход системы моделирования и прогноза роста древостоев получен в виде таблиц (математических моделей) производительности основных древостоев по классам бонитета и типам леса (режимам ухода и уровням производительности), таблиц продуктивности модальных насаждений Беловежской пуши по типам леса, моделей производительности эталонных сосновых древостоев и таблиц динамики их строения по диаметру, нормативов для актуализации и прогноза динамики лесного фонда.

7. Результаты исследований использованы при таксации лесов и оценке продуктивности насаждений, актуализации лесного фонда, прогнозе динамики лесного фонда и лесосырьевых ресурсов республики, в лесоустроительном проектировании в подсистеме "УЛР СССР". Система моделирования и прогноза роста древостоев, реализованная в программах на ЕС ЭВМ, является унифицированной и ее структура, методика создания, алгоритмы и программы могут быть использованы при решении подобных задач в других лесотаксационных районах страны.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Атрощенко О.А. Ход роста по высоте и диаметру березовых насаждений в типе леса березняк орляковый. - В сб.: Вопросы лесоведения и лесозащиты. Мн., 1967, с. 93-99.

2. Атрощенко С.А. Динамика березовых насаждений по высоте и диаметру. - В сб.: Тезисы докладов конференции молодых ученых Белоруссии. Мн., 1969, с. 214-216.

3. Атрощенко О.А. Зависимость между коэффициентом формы и высотой стволов березы. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1969, вып. 2, с. 154-159.

4. Атрощенко О.А. Исследование хода роста березовых насаждений. - В сб.: Тезисы докладов конференции по итогам научных работ за 1969 г. Мн., 1970, с. 116-117.

5. Атрощенко О.А. Исследование хода роста березовых насаждений в БССР. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1972, вып. 5, с. 96-101.

6. Атрощенко О.А. Динамика товарности березняков в БССР по типам леса. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1972, вып. 6, с. 99-102.

7. Мирошников В.С., Атрощенко О.А. Текущий прирост сосновых культур Белоруссии. - В кн.: Текущий прирост древостоев и его применение в лесном хозяйстве. Рига, 1972, с. 96-102.

8. Атрощенко О.А. Фауна березовых насаждений порослевого происхождения. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн.; 1973, вып. 7, с. 95-99.

9. Карышев В.Е., Атрощенко О.А., Пастернацкий В.А. Таксационная оценка участков узких снегозадерживающих лесополос, отводимых под рубки ухода. - В сб.: Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов. Мн., 1973, с. 143-146.

10. Атрощенко О.А. Закономерности распределения деревьев по диаметру и высоте в березовых молодняках. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1974, вып. 8, с. 95-98.

11. Забелло К.Л., Атрощенко О.А. Почвенно-грунтовые условия произрастания некоторых типов березовых лесов Белоруссии. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1974, вып. 8, с. 19-23.

12. Мирошников В.С., Атрощенко О.А. Текущий прирост и темп роста сосновых древостоев искусственного происхождения. - В кн.:

Текущий прирост древостоев. Мн., 1975, с. 76-79.

13. Атрощенко О.А., Блинцов И.К., Ипатьев В.А. Рост соснового подроста на мелиорируемых торфяных почвах. - В кн.: Текущий прирост древостоев. Мн., 1975, с. 72-74.

14. Атрощенко О.А., Михнюк Д.В. О таксационных показателях древостоя. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1975, вып. 9, с. 85-88.

15. Атрощенко О.А. Кривые распределения деревьев по диаметру в березовых древостоях. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1976, вып. 12, с. 104-110.

16. Атрощенко О.А. Актуализация лесного фонда и рациональное использование лесных ресурсов БССР. - В кн.: Рациональное использование, воспроизводство лесных ресурсов и охрана окружающей среды. Мн., 1978, с. 9-10.

17. Атрощенко О.А., Ражко А.М. Оптимальный состав сосново-березовых насаждений. - В кн.: Рациональное использование, воспроизводство лесных ресурсов и охрана окружающей среды. Мн., 1978, с. 54-55.

18. Атрощенко О.А. Планирование и стандартизация информации при актуализации лесного фонда по материалам лесоустройства. - В сб.: Лесное хозяйство и лесная промышленность. Каунас, 1978, с. 7-9.

19. Мирошников В.С., Ермаков В.Е., Труль О.А., Атрощенко О.А. Стандартизация учета лесного фонда при лесоустройстве. - В сб.: Лесное хозяйство и лесная промышленность. Каунас, 1978, с. 41-44.

20. Атрощенко О.А. Современные методы определения, интерпретации и оптимизации полноты насаждения. - В сб.: Эталонные насаждения, ч. I, Каунас, 1979, с. 66-68.

21. Атрощенко О.А. Аналитическое описание распределений деревьев по диаметру с помощью бета-функции. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1979, вып. 14, с. 70-75.

22. Атрощенко О.А., Костенко А.Г. Направление применения моделей роста леса (на примере БССР). - Мн., БелНИИЛТИ, 1980, - 45 с.

23. Атрощенко О.А. Математико-статистический анализ временных рядов роста древостоев. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1980, вып. 15, с. 70-76.

24. Атрощенко О.А., Майко И.П. Определение оптимальных па-

раметров эксплуатационных лесов БССР для расчета захватно-срезающих устройств. - В сб.: Механизация лесоразработок и транспорт леса. Мн., 1980, вып. 10, с. 26-29.

25. Атрощенко О.А. Автоматизированная система долгосрочного планирования лесопользования в Финляндии. - Лесное хозяйство, 1980, № 12, с. 68-71.

26. Атрощенко О.А., Костенко А.Г. Структура системы актуализации лесного фонда БССР. - В сб.: Вопросы контроля и воспроизводства лесных ресурсов. Каунас, 1980, с. 19-20.

27. Атрощенко О.А. Системный подход к проблеме контроля и управления лесными ресурсами. - В сб.: Вопросы контроля и воспроизводства лесных ресурсов. Каунас, 1980, с. 12-13.

28. Атрощенко О.А. Современное направление моделирования роста леса на ЭВМ. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1981, с. 79-83.

29. Атрощенко О.А., Костенко А.Г. Направление применения моделей роста леса (на примере БССР). - Новое в науке и технике лесного хозяйства, 1981, № 19, с. 7-9.

30. Атрощенко О.А. Регрессионные модели связи диаметров и высот деревьев в березовых древостоях. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1982, вып. 17, с. 77-80.

31. Асютин П.Ф., Блинцов И.К., Атрощенко О.А. Моделирование интенсивности фотосинтеза сосновых и еловых насаждений на дерново-палево-подзолистых почвах БССР. - В сб.: Проблемы физиологии и биохимии древесных растений. Красноярск, 1982, с. 76.

32. Атрощенко О.А., Ипатьев В.А. Планирование эксперимента и регрессионный анализ моделей связи в мелиорируемых насаждениях. - В сб.: Современные проблемы гидролесомелиорации. Ленинград, 1982, с. 119-122.

33. Атрощенко О.А., Костенко А.Г. Состав основных насаждений по типам условий местопроизрастания в Беловежской пуше. - В сб.: Комплексное ведение лесного хозяйства в сосновых лесах. - Гомель, 1982, с. 3-5.

34. Атрощенко О.А. Моделирование роста сосновых древостоев по уровням производительности и режимам ухода. - В сб.: Комплексное ведение лесного хозяйства в сосновых лесах. Гомель, 1982, с. 92-93.

35. Атрощенко О.А. Система лесохозяйственной информации в условиях ОАСУ-лесхоз. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство.

Мн., 1983, вып. 18, с. 107-110.

36. Атрощенко О.А. Система моделирования и прогноза роста древостоев в Белоруссии. - В сб.: Совершенствование методов наземной и аэрокосмической таксации и устройства лесов. - Свердловск, 1983, с. 53-55.

37. Петров В.Е., Романов В.С., Атрощенко О.А., Короткевич Н.А., Качановский И.М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны (по исследованиям в БССР). - В сб.: Ботаника, Мн., 1983, вып. 25, с. 14-23.

38. Атрощенко О.А. Прогнозирование роста сосновых древостоев. - В сб.: Моделирование и контроль производительности древостоев. Каунас, 1983, с. 61-62.

39. Атрощенко О.А. Классификация насаждений и распознавание типов леса в банке данных "Лесной фонд БССР". - В сб.: Современные проблемы лесной типологии. Львов, 1983, с. 71-73.

40. Атрощенко О.А. Система прогноза роста древостоев. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1984, вып. 19, с. 78-83.

41. Атрощенко О.А. Системный подход и математическое моделирование лесной экосистемы. - В сб.: Использование математического моделирования в экологических исследованиях лесов и болот. Саласпилс, 1984, с. 18-23.

42. Атрощенко О.А. Системный подход и математическое моделирование лесных биогеоценозов. - В сб.: Ботаника, Мн., 1984, вып. 26, с. 21-23.

43. Киселев А.Ф., Атрощенко О.А. Моделирование роста и производительности еловых культур Белоруссии. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. Мн., 1985, вып. 20, с. 73-76.

44. Атрощенко О.А. Лесотаксационные нормативы для актуализации лесного фонда. - В сб.: Лесоведение и лесное хозяйство. - Мн., 1985, вып. 20, с. 80-83.

45. Атрощенко О.А. Система моделирования строения, роста и производительности древостоев. - В сб.: Законы и закономерности роста и производительности древостоев. Каунас, 1985, с. 17-19.

46. Атрощенко О.А. Применение ЭВМ в научных исследованиях и дипломном проектировании по лесному хозяйству. - Мн.: БТИ, 1985, Ч. I-56с.

Олег Александрович Атрощенко

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗА РОСТА ДРЕВОСТОЕВ
(на примере БССР)

Подписано в печать 17.04.86. АТ 19076. Формат 60 x 80^{1/16}.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,3. Усл. кр.-отт. 2,3. Уч.-изд. л. 2.
Тираж 100 экз. Заказ 295. Бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере Белорусского ордена Трудового
Красного Знамени технологического института им. С.М.Кирова.
220630. Минск, Свердлова, 13.