

630*
Ц 14

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 630*254.11

Цай Сергей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
ОБРАЗУЮЩИХ И ОБЪЕМОВ СТВОЛОВ ЕЛИ**

Специальность 06.03.02 - Лесоустройство и лесная таксация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Минск 2000

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете.

Научный руководитель заслуженный лесовод Республики Беларусь,
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор Атрощенко Олег Александрович.

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук
Багшский Владимир Феликсович;


кандидат сельскохозяйственных наук
Буй Андрей Александрович.

Оппонирующая организация Государственное лесоустроительное
производственное объединение "Белгослес"

Защита состоится "27" декабря 2000 г. в 14⁰⁰ часов
на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.05 в Белорусском
государственном технологическом университете по адресу:
220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан "27" ноября 2000 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
кандидат биологических наук  А.И. Блинцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Проект развития лесного хозяйства Республики Беларусь предусматривает разработку информационной системы управления лесным хозяйством. Внедрение компьютерных технологий в научные исследования и практику лесного хозяйства немислимо без широкого использования методов математического моделирования и исследования операций, без создания математических моделей оптимизации размера лесопользования, породной и возрастной структуры лесов, решения задач планирования и управления сортиментацией запасов древостоев. В связи с этим актуальным является разработка лесотаксационных моделей образующих и объемов древесных стволов ели, позволяющих оценивать выход промышленных сортиментов и категорий крупности деловой древесины, автоматизировать лесотаксационные измерения и задачи таксации лесосечного фонда.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследование выполнено в соответствии с научно-исследовательской тематикой кафедры лесоустройства Белорусского государственного технологического университета:

— "Исследование прироста, отпада и производительности лесов Беларуси с прогнозом размера лесопользования", ГБ-4-96, 1996 – 2000 гг;

— ГНТП "Лес-экология, ресурсы", БС 97-047 (регистрационный № 19973221), задание 02 "Разработать технологию непрерывного лесоустройства с использованием компьютерных ГИС-технологий".

Цель и задачи исследования. Целью исследования являлась разработка лесотаксационных моделей образующих и объемов стволов ели, отличающихся новым подходом в моделировании относительного сбega ствола, имеющих практическое значение в сортиментации запасов и таксации еловых древостоев. Основными задачами исследования предусмотрено: 1) разработка методики и программы исследования; 2) планирование и сбор экспериментального материала; 3) математико-статистический анализ экспериментальных данных; 4) разработка математических моделей образующих и объемов стволов ели по разрядам высот; 5) разработка таблиц объемов стволов ели по разрядам высот и сортиментных таблиц еловых древостоев Беларуси.

Объект и предмет исследования. Объекты исследования представлены еловыми древостоями естественного происхождения Республики Беларусь. Предметом исследования являлась образующая древесных стволов ели [*Picea abies* (L.) Karst].

Гипотеза. Средний относительный сбег по относительным высотам стволов ели не является постоянным для породы, а имеет зависимость от соотношения высоты и диаметра (разряда высот):

193 ар

Методология и методы проведенного исследования. Методология исследования включает диалектический и системный подходы к изучению относительного сбегу стволов ели. Методы лесной таксации, лесной биометрии, имитационного моделирования использовались в исследовании при моделировании образующих и объемов древесных стволов ели.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Впервые выдвинуты и научно обоснованы следующие положения.

1. Методика математического моделирования образующих древесных стволов путем кусочно-полиномиальной аппроксимации кубическими полиномами данных относительного сбегу стволов на относительных высотах;
2. Математические модели образующих древесных стволов, алгоритмы и программное обеспечение на РС IBM, позволяющие определять объем стволов ели и выполнять сортиментацию запасов еловых древостоев;
3. Таблицы объемов стволов ели по разрядам высот и сортиментные таблицы еловых древостоев Беларуси, разработанные по моделям образующей древесных стволов.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные лесотаксационные модели образующих и объемов стволов ели по разрядам высот, программное обеспечение на РС IBM внедрены в ГЛПО "Белгослес" (акт внедрения от 8 декабря 1999 г.) и используются при таксации еловых лесов в системах планирования и управления лесосечным фондом.

Экономическая эффективность научных разработок заключается в повышении точности оценки сортиментной структуры еловых лесов, в возможности составления сортиментных таблиц на ПЭВМ, использовании математических моделей образующих стволов ели в компьютерных технологиях.

Предполагаемый экономический эффект от внедрения лесотаксационных моделей образующих древесных стволов ели для оценки выхода деловой древесины еловых древостоев по сравнению с существующими нормативами составит порядка 112 тыс. руб. на 1 тыс. м³ деловой древесины (в ценах на 01.08.2000 г.).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения: 1) новая методика математического моделирования образующих древесных стволов; 2) математические модели, алгоритмы и программное обеспечение на РС IBM для оценки образующих и объемов стволов ели и сортиментации запасов еловых древостоев; 3) таблицы объемов стволов ели по разрядам высот и сортиментные таблицы еловых древостоев Республики Беларусь.

Личный вклад соискателя. Автору принадлежит постановка проблемы, разработка методических положений ее решения, сбор и анализ эксперимен-

тального материала, разработка алгоритмов и программ на ПЭВМ, обработка данных на ПЭВМ, обобщение результатов и разработка математической модели образующих и объемов древесных стволов ели, объемных и сортиментных таблиц, перевод части представленной в диссертации литературы с иностранного языка на русский.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические положения, методика и результаты исследований докладывались и получили положительные оценки на научных конференциях лесохозяйственного факультета БГТУ (1995 — 1999) и международных научно-практических конференциях "Лес - 96", "Лес - 97"; научной конференции посвященной "75-летию лесной науки" (Гомель, 1997).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 5 статей в сборниках научных трудов БГТУ; одна статья - в сборнике научных трудов Института леса НАН Беларуси; 2 статьи - в реферативном сборнике непубликуемых работ (депонированные статьи в БелиСА). Общее количество страниц опубликованных материалов составляет 42 с.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, выводов, списка используемых источников и пяти приложений. Объем диссертации 109 страниц машинописного текста, в том числе 14 рисунков на 8 страницах, и 36 таблиц на 21 странице. Список используемых источников включает 117 наименований, в том числе 17 на иностранном языке. В приложениях приведены экспериментальные материалы, таблицы объемов стволов ели и сортиментные таблицы еловых древостоев, тексты разработанных программ на ПЭВМ, акт внедрения результатов исследования. Объем приложений - 80 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации и необходимость проведения исследований, кратко сформулированы основные цели и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Глава первая. Аналитический обзор и направление исследований. Среди основных методов исследования формы древесных стволов можно выделить:

- а) приравнивание формы древесных стволов и их частей к форме правильных стереометрических тел вращения;
- б) использование абсолютного сбега;
- в) использование видовых чисел (старых, нормальных, абсолютных);
- г) использование коэффициентов формы;

д) описание формы древесных стволов с помощью относительного сбега по относительным высотам (числа сбега);

е) использование законов механики и физики для объяснения средней формы древесного ствола;

ж) использование математических уравнений для аппроксимации образующей древесного ствола.

Практическое использование получили методы использования коэффициентов формы, абсолютного и относительного сбега, а также видовых чисел (старых и нормальных).

Особенно распространенным среди отечественных и зарубежных исследователей оказался метод изучения формы ствола путем определения относительного сбега по относительным высотам. Это объясняется тем, что относительный сберг зависит исключительно от формы ствола и позволяет наиболее полно отразить ее особенности. Проф. В.К. Захаров изучал форму стволов на относительных высотах: 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90% общей высоты дерева.

Однако, наиболее точно форма ствола может быть выражена только уравнением образующей древесного ствола, которое позволяет определить диаметр ствола в любой его точке.

Множество предложенных математических моделей образующих древесных стволов условно можно классифицировать по количеству переменных на простые модели (имеет место одна независимая переменная) и множественные (две и более независимых переменных); по способу задания математической модели — использующие метод сплайн-функций, кусочной аппроксимации, обычных функциональных зависимостей.

Использование различного рода полиномиальных зависимостей различных порядков для аппроксимации образующей стволов широко распространено среди исследователей: Н.Т. Войнов (1969), А.Н. Федосимов (1968), В.С. Петровский (1970), И.И. Гусев (1975), К.Е. Никитин (1979), J. Laasasenaho (1982), Lowell Kim (1986) и др.

Многочисленные исследования показали, что образующая древесного ствола является слишком сложной кривой и на всем протяжении не может быть представлена одной аналитической кривой. Правильнее рассматривать образующую как их некоторое сочетание. В связи с этим ряд исследователей при разработке математических моделей образующей стволов применяли различные методы кусочной аппроксимации: P. Roiko-Jokela (1978), Figueiredo-Filho Alenso, Borders Bruce, Hitch Kenneth (1996), В.П. Залюманов (1985), М.К. Яковлев и А.А. Янушкевич (1996) и др.

При разработке математических моделей подавляющее число исследователей используют данные относительного сбега на относительных высотах.

При построении функциональных зависимостей, параметры которых (d , h) представлены в относительных единицах, возникает вопрос, какой диаметр принять за базовый. Финские исследователи используют диаметр на $0,2h$, В.С. Петровский (1970) рекомендует использовать диаметр на половине высоты, В.К. Захаров (1955), Н.Т. Войнов (1969), А.Н. Федосимов (1968), И.И. Гусев (1975) использовали в качестве базового диаметр на высоте $0,1h$.

При разработке модели образующей нельзя обойти вопрос о влиянии различных факторов на форму древесного ствола. В отношении средней формы древесных стволов имеется ряд суждений, иногда во многом противоречивых. Так, проф. В.К. Захаров выдвинул гипотезу о единстве формы древесных стволов для отдельных древесных пород. Исследователи Н.Т. Войнов, А.Н. Федосимов, В.П. Машковский (1996), В.С. Петровский, использовали этот постулат для разработки математических моделей образующих по данным усредненного относительного сбега для древесной породы.

Однако целый ряд отечественных и зарубежных исследователей отмечают зависимость формы древесных стволов либо от разряда высот [И.И. Гусев (1975), С.В. Тетюхин (1988), И.Д. Юркевич, В.С. Адериго, В.Л. Дольский (1988), С.И. Цай, А.Т. Пискун, М.В. Кузьменков (1981), С.В. Третьяков (1991)], либо от соотношения диаметра и высоты [Кулешис (1972), И.В. Корякин, В.С. Грек (1987), David Reed, John Byrne (1985) и др.], либо от размера его кроны [Valenti Michael A., Cao Quang V. (1987)].

Следовательно, целесообразно проводить изучение относительного сбега в пределах некоторого соотношения диаметров и высот (разрядов высот), а при разработке математической модели использовать метод кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Для определения объемов древесных стволов широко используют: объемные таблицы; разного рода секционные формулы; формулы, построенные на использовании видовых чисел (старых, нормальных); математические модели объемов стволов.

Предложено множество различных математических моделей объемов стволов с двумя и более независимыми переменными. Их многообразие объясняется тем, что высота и диаметр далеко не исчерпывают всех факторов, влияющих на объем стволов. Введение дополнительных факторов (протяженность кроны, положение дерева в пологе насаждения, q_2 и др.) в математическую модель, несомненно, повысит точность определения запасов, но приведет к удорожанию работ и ограничит применение модели в практике.

Метод использования образующей древесного ствола для определения объема стволов и сортиментов находит применение в последние годы в связи с внедрением ЭВМ в лесотаксационные расчеты. Выразив продольный профиль древесного ствола математической моделью, можно определить его

объем как тела вращения, используя формулу определенного интеграла:

$$V = \pi \int_a^b f^2(x) dx; \quad (1)$$

где $f(x)$ – математическая модель образующей древесного ствола.

a, b - нижний и верхний пределы интегрирования.

Ряд исследователей использовали модель образующей для определения объемов стволов: В.С. Петровский (1970), Н.Т. Войнов (1971), И.И. Гусев (1975), В.П. Машковский (1996), В.П. Заломанов (1985), В.С. Грек (1984), Чан Хыу Виен (1989), J. Laasasenaho (1982), Reed D., Вутне J. (1985) и др.

Для определения объема отрезков ствола наиболее удобно использовать модель образующей с использованием формулы (1), так как в этом случае сумма всех сортиментов ствола, полученных по этой формуле, будет точно равна объему целого ствола. Это позволяет использовать математическую модель для расчета объема ствола и выхода промышленных сортиментов.

Глава вторая. "Программа, методика и объекты исследования".

В соответствии с поставленной задачей, программа исследований предусматривает выполнение следующих этапов: 1) аналитический обзор направлений исследований в области изучения формы стволов, образующих древесных стволов, а также методов определения объема стволов и получаемых из них сортиментов; 2) разработка методики сбора и обработки экспериментального материала; 3) планирование наблюдений и сбор экспериментальных данных; 4) разработка алгоритмов и прикладных программ на ПЭВМ для статистической обработки опытных данных; 5) статистическая обработка экспериментальных данных; 6) разработка математических моделей образующих древесных стволов ели; 7) разработка математических моделей объемов стволов и их отрезков; 8) статистический анализ адекватности математических моделей и проверка полученных результатов исследования; 9) установление области практического применения разработанных математических моделей и возможного экономического эффекта от их внедрения.

В соответствии с принятой гипотезой о влиянии разрядов высот на относительный сбеги стволов ели, изучение относительного сбега планировалось проводить по разрядам высот. Предварительные исследования показали, что относительные диаметры на относительных высотах в пределах разряда высот для стволов ели имели средний коэффициент вариации до 3%. Следовательно, для оценки средних значений относительного сбега ствола с точностью 1% и вероятностью 0,95 необходимо измерить 36 модельных деревьев для каждого разряда высот.

Исследования проводились по данным таксации модельных деревьев, которые отбирались на временных пробных площадях.

Закладка и таксация древостоя на временных пробных площадях проводилась в соответствии с ОСТ 56-69-83 по общепринятым в лесной таксации методам.

Размещение пробных площадей, по территории республики выполнялось методом случайной выборки с учетом равномерного охвата ими еловых лесов основных классов бонитета, типов леса и всех разрядов высот.

На пробных площадях отбирались модельные деревья с целью изучения образующей древесного ствола. Отбор моделей проводился способом пропорционального их представительства по ступеням толщины из числа здоровых растущих деревьев без видимых повреждений и нарушений формы стволов.

Использована следующая методика таксации модельных деревьев (основной экспериментальный материал): измерялась общая длина ствола; измерялись диаметры (в коре, без коры) на высоте 1,3 м, а также на следующих относительных высотах (в процентах от длины ствола): 0; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90 и 95%.

Модельные деревья, которые использовались для проверки работы математических моделей, обмерялись по 2-х метровым секциям (дополнительный экспериментальный материал).

Кроме данных обмера модельных деревьев использовались материалы таблиц объема и сбega стволов ели проф. В.К. Захарова. Для перехода от данных этих таблиц к выбранной схеме получения диаметров на относительных высотах использовался графический метод. Все абсолютные значения диаметров на относительных высотах переводились в относительное (процентное) выражение от диаметра на 0,1 длины ствола.

В процессе исследований использован следующий экспериментальный материал: 1) данные таксации модельных деревьев (435 шт.) на пробных площадях; 2) данные таблиц объема и сбega стволов ели проф. В.К. Захарова (86 моделей). В общей сложности для исследования образующих стволов ели использовались данные по 521 стволу.

Распределение модельных деревьев по классам возраста, свидетельствует о том, что наиболее представлены экспериментальным материалом средневозрастные, приспевающие и спелые еловые насаждения (табл. 1).

Таблица 1

Распределение модельных деревьев по классам возраста.

Единицы измерения	Классы возраста					
	III	IV	V	VI	VII	Итого
шт.	205	71	77	60	22	435
%	47,1	16,3	17,7	13,8	5,1	100

В таблице 2 приводится распределение числа модельных деревьев и моделей из таблиц объема и сбega проф. В. К. Захарова по разрядам высот. Представленный экспериментальный материал является репрезентативным и достаточным для целей исследования.

Таблица 2.

Распределение экспериментального материала по разрядам высот

Экспериментальный материал	Разряды высот						Итого
	IA	I	II	III	IV	V	
Модельные деревья, шт.	47	96	122	120	32	18	435
%	10,8	22,1	28,0	27,6	7,4	4,1	100
Модели из таблиц сбega В.К. Захарова, шт.	18	18	16	13	12	9	86
%	20,9	20,9	18,6	15,1	14,0	10,5	100
Всего, шт.	65	114	138	133	44	27	521
%	12,5	21,9	26,5	25,5	8,4	5,2	100

Проверка адекватности математических моделей образующих и объемов древесных стволов ели проводилась по данным таксации 160 модельных деревьев (дополнительный экспериментальный материал).

Данные относительного сбega по каждой относительной высоте (в пределах разряда высот) были сгруппированы в статистические ряды с целью вычисления средних значений и определения статистических характеристик. Обработка статистических рядов проводилась в электронных таблицах EXCEL.

Расчет статистических показателей производился непосредственным способом отдельно для стволов ели в коре и без коры. Выполнялась проверка на однородность полученного относительного сбega по относительным высотам в пределах разрядов высот по правилу трех сигм.

В результате по каждому разряду высот был получен средний относительный сбег стволов ели по относительным высотам (в коре и без коры), а также статистические показатели этих средних относительных показателей формы.

Выполнялся анализ на достоверное различие среднего относительного сбega по разрядам высот на относительных высотах 0,2H; 0,5H; 0,7H, полученного по данным модельных деревьев и относительного сбega по данным таблиц объема и сбega проф. В.К. Захарова. Сравнение проводилось по t- критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05.

Проведенный анализ показал, что средние показатели относительного сбега, полученного по модельным деревьям и таблицам сбега проф. В.К. Захарова достоверно не различаются. Это позволило объединить данные относительного сбега, полученные по модельным деревьям и по таблицам объема и сбега, с целью определения средневзвешенного относительного сбега стволов ели по разрядам высот, который впоследствии использовался для разработки математических моделей образующей.

Оценка адекватности математических моделей образующих и объемов стволов осуществлялась путем определения средних квадратических, систематических и случайных отклонений: а) между данными указанных моделей и материалами таблиц объема и сбега проф. В.К. Захарова; б) между данными математических моделей и материалами обмера модельных деревьев (основной экспериментальный материал); в) между данными математических моделей и материалами обмера модельных деревьев (дополнительный экспериментальный материал).

Глава третья. Математическое моделирование образующих и объемов стволов ели.

Как показали исследования ряда отечественных и зарубежных авторов наиболее оптимальным является изучение формы древесного ствола по разрядам высот. В нашем исследовании каждое отдельное дерево относилось к определенному разряду высот, исходя из присущих этому разряду соотношений диаметров и высот. Численные значения для разрядов высот, используемые в настоящей работе, приняты в соответствии с предложенными проф. В.К. Захаровым для стволов ели.

Дисперсионный анализ относительного сбега по разрядам высот (основной экспериментальный материал) показал, что между IА и I, IА и II, I и II разрядами высот данные относительного сбега стволов ели без коры близки между собой и не имеют достоверных различий по F критерию Фишера на 5% уровне значимости. По остальным сравниваемым разрядам высот они имеют достоверные различия на 5% уровне значимости. При сравнении данных относительного сбега модельных деревьев по относительным высотам между разрядами высот по t критерию Стьюдента были получены приблизительно аналогичные результаты. При установлении достоверности различия использовался уровень значимости 5%.

Следовательно, влияние разрядов высот должно учитываться при решении задач моделирования образующих древесных стволов. Это приведет к устранению систематических ошибок при определении объемов древесных стволов и сортиментов, запасов древостоев.

Построение математических моделей образующих стволов ели проводилось отдельно для каждого разряда высот методом кусочно-полиномиального

приближения, по данным относительного сбега по разрядам высот. Данные относительного сбега сглаживались кубическими полиномами в пределах относительных секций: 0 – 5%; 5 – 20%; 20 – 45%; 45 – 80%; 80 – 100% (табл. 3). Коэффициенты полиномов рассчитывались по методу Чебышева с использованием электронных таблиц EXCEL. Таким образом, для аппроксимации одной образующей необходимо 5 уравнений. В пределах каждого разряда высот разрабатывалась отдельная образующая (в коре, без коры), т. е. необходимо 60 уравнений для описания относительного сбега по относительным высотам.

Таблица 3.

Уравнения зависимости относительного сбега (P_d) от относительной высоты (P_l)

Разряд высот	Относительные секции ствола, %	Уравнения
I	0 – 5	$P_d = -0.4266665 \times P_l^3 + 4.80457 \times P_l^2 - 19.07625 \times P_l + 134.841$
	5 – 20	$P_d = -0.003466664 \times P_l^3 + 0.164 \times P_l^2 - 3.09334 \times P_l + 118.0412$
	20 – 45	$P_d = -0.00011852 \times P_l^3 + 0.0062701 \times P_l^2 - 0.67763 \times P_l + 106.036$
	45 – 80	$P_d = -0.000131312 \times P_l^3 + 0.0139786 \times P_l^2 - 1.3303 \times P_l + 120.963$
	80 – 100	$P_d = 0.00093333336 \times P_l^3 - 0.26314286 \times P_l^2 + 22.75238 \times P_l - 577.17$

Систематические отклонения между исходными данными и полученными по математическим моделям относительного сбега находятся в пределах от $-0,01\%$ до $-0,06\%$, а средние квадратические отклонения — в пределах от $\pm 0,10\%$ до $\pm 0,39\%$.

При моделировании использовались данные относительного сбега, выраженного в % от $d_{0,1}$. Измерение диаметра на относительной высоте $0,1h$ в натуре сложно осуществимо, поэтому в модель дополнительно введено выражение, связывающее диаметр на высоте $1,3$ м и диаметр на высоте $0,1h$:

$$d_{0,1} = f(d_{1,3}) \quad (2)$$

Эта зависимость выражается полиномом второго порядка, и характеризуется сильной теснотой связи ($\eta = 0,99$). Для каждого разряда высот разрабатывались уравнения для диаметра в коре и без коры.

Выражение (3) в общем виде представляет собой математическую модель образующей ствола:

$$d_i = z(P_L) \cdot f(d_{1,3}) \cdot 10^{-2}; \quad (3)$$

где $z(P_L)$ – математическая модель относительного сбега, представленная кубическими полиномами; $f(d_{1,3})$ – зависимость диаметра $d_{0,1}$ от $d_{1,3}$ (выражается полиномами второго порядка).

Диаметры стволов ели без коры, приведенные в таблицах объема и сбега проф. В.К. Захарова, сортировались в группы в зависимости от того, в какую относительную секцию они попадают. Границы относительных секций соответствуют узловым точкам (5%, 20%, 45%, 80%), принятым при моделировании образующей. По каждой группе диаметров определялись систематические, случайные и средние квадратические отклонения. Систематическое отклонение по всем секциям составило (-0,025%). Случайные и средние квадратические отклонения по всем секциям кроме последней (80 -100%) находятся в пределах до 2%.

Данные по диаметрам без коры, полученные с использованием математических моделей, сравнивались также с данными обмера модельных деревьев (дополнительный экспериментальный материал). Диаметры замерялись на высотах 6, 12, 18, 24, 30 м. Анализ полученных отклонений показал, что при определении диаметров без коры на различных высотах с использованием математических моделей образующих наблюдались систематические отклонения от -1,16% до +1,37%. В среднем систематическое отклонение составило +0,43%. Средние квадратические отклонения изменялись от $\pm 2,52\%$ в нижней части ствола до $\pm 11,31\%$ в верхней части.

Разработка математических моделей объемов древесных стволов ели, а также их отрезков осуществлялась на базе разработанных математических моделей образующих стволов ели по разрядам высот с использованием формулы (1), позволяющей определять объем тела вращения по его образующей.

Для аппроксимации образующей, выраженной в относительных единицах, необходимо пять кубических полиномов. Следовательно, для определения объема ствола в относительных единицах ($V_{отн}$) необходимо проинтегрировать все полиномы с использованием формулы (1).

$V_{отн}$ ствола = $V_{отн}$ 1-ой секции + $V_{отн}$ 2-ой секции + ... + $V_{отн}$ 5-ой секции

или,

$$V_{отн} = \pi \int_0^5 z^2 (Pl) dPl + \pi \int_5^{20} z^2 (Pl) dPl + \pi \int_{20}^{45} z^2 (Pl) dPl + \dots + \pi \int_{80}^{100} z^2 (Pl) dPl; \quad (4)$$

Объем ствола в абсолютных единицах (m^3) можно получить по формуле:

$$V_{абс} = \frac{1}{4} d_{0,1}^2 \cdot h \cdot 10^{-10} \cdot V_{отн}; \quad (5)$$

Так как в пределах разряда высот образующая постоянна, то объем стволов ели одного разряда высот будет зависеть только от диаметра и высоты, поэтому формула объемов стволов примет вид:

$$V = K \cdot d_{0,1}^2 \cdot h; \quad (6)$$

где K – коэффициент, зависящий от разряда высот.

Коэффициенты K рассчитывались отдельно для каждого разряда высот по формуле:

$$K = \frac{\pi}{4 \cdot 10^{10}} V_{\text{отн}}; \quad (7)$$

где $V_{\text{отн}}$ — объем ствола, выраженный в относительных единицах.

Если вместо $d_{0,1}$ в выражение (6) подставить $d_{0,1} = f(d_{1,3})$, то тогда выражение для объема ствола примет окончательный вид:

$$V = K f^2(d_{1,3}) h; \quad (8)$$

Для каждого разряда высот необходимо одно уравнение объема ствола в коре, и одно — для объема ствола без коры.

Объемы стволов ели, полученные по математическим моделям, в основном, превышают объемы таблиц В.К. Захарова: на +0,33% — для стволов в коре, и на +0,19% — для стволов без коры. Средние квадратические отклонения в объемах для всех разрядов высот весьма незначительные и колеблются в пределах от $\pm 1,04\%$ до $\pm 1,58\%$. В среднем по всей породе среднее квадратическое отклонение для стволов в коре составило $\pm 1,32\%$, для стволов без коры $\pm 1,38\%$.

Данные, полученные по математическим моделям объемов стволов, также сравнивались с объемами модельных деревьев (дополнительный экспериментальный материал). Полученные систематические отклонения в объемах стволов ели (в коре, без коры) составляют менее +2%. Средние квадратические отклонения не превышают $\pm 4,3\%$. При определении объемов модельных деревьев (в коре, без коры) использовалась сложная секционная формула срединных сечений, которая имеет тенденцию занижать объем в среднем на 1,0 - 1,5%.

Для определения объема отрезков стволов также используется формула (1), но только необходимо проинтегрировать образующую ствола не на всю ее длину, а до некоторой ее точки (сечения). Пусть отрезок ствола имеет длину $a = h/2$. Тогда относительная длина этого отрезка равна $l_{\text{отн}} = a \cdot 100 / h = 50\%$. Конец отрезка длиной a попадет в секцию 45 - 80%. Относительный объем этого отрезка (объем, полученный по образующей, выраженной в относительных величинах) равен сумме относительных объемов первых трех секций плюс часть четвертой секции:

$$V_{\text{отн}} = \pi \int_0^5 z^2 (Pl) dPl + \pi \int_5^{20} z^2 (Pl) dPl + \pi \int_{20}^{45} z^2 (Pl) dPl + \pi \int_{45}^{50} z^2 (Pl) dPl; \quad (9)$$

Объем искомого отрезка в м³ определим по формуле:

$$V_{abc} = \frac{1}{4} d_{0,1}^2 \cdot h \cdot 10^{-10} \cdot V_{отн}; \quad (10)$$

При сопоставлении объемов отрезков стволов длиной по 6 м (модельные деревья, дополнительный экспериментальный материал) с данными математических моделей наблюдалось некоторое систематическое завышение математической моделью объемов отрезков стволов. Наибольшее систематическое отклонение наблюдалось в третьем отрезке ствола (+2,30%). Средние квадратические отклонения увеличиваются с увеличением высоты расположения отрезков от ($\pm 3,6\%$) в нижней части ствола до ($\pm 10,7\%$) в верхней.

Автором разработаны ряд программ для ПЭВМ, позволяющих определять объем стволов ели в коре и без коры (V_{tree}), и объем отрезков стволов ели без коры (L_D_Vol).

Глава четвертая. Моделирование выхода категорий крупности деловой древесины из стволов ели. Имитационная модель по выходу категорий крупности основывается на математических моделях образующей и объемов стволов ели по разрядам высот. При расчете выхода категорий крупности использовался метод максимального учета, когда при расчете принимались такие длины сортиментов, при которых диаметр в верхнем отрезе соответствует граничному диаметру между категориями крупности. Граничные величины диаметров для крупной, средней, мелкой деловой древесины, а также для дров и отходов принимались в соответствии с ГОСТ 9463-88.

Для расчета выхода категорий крупности необходимо вначале определить длины сортиментов ($h_{кк}$; $h_{см}$; $h_{мд}$; $h_{до}$), диаметр в верхнем отрезе которых принимает граничные значения для категорий крупности. Согласно ГОСТ 9463-88 эти граничные значения следующие: 26 см; 14 см; 6 см; 3 см. Таким образом, объем крупной деловой древесины из ствола будет равен объему отрезка ствола, начинающегося с высоты "0" м до высоты $h_{кк}$ м; объем средней деловой древесины соответственно будет равен объему отрезка ствола, заключенного между высотами $h_{кк}$ м и $h_{см}$ м; объем мелкой деловой древесины будет равен объему отрезка ствола, заключенного между высотами $h_{см}$ м и $h_{мд}$ м; и т. д. Автором разработана программа Lesschot для вычислений выхода категорий крупности деловой древесины из стволов ели. Программа позволяет производить расчет объема деловой древесины по классам крупности — крупная, средняя 1, средняя 2, итого средней, мелкая, итого деловой, а также определять объем дров и отходов. Ее можно использовать для определения общего запаса и выхода категорий крупности деловой древесины стволов ели.

Данные сортиментных таблиц Ф.П. Мойсеенко также сравнивались с результатами сортиментации, полученными по математическим моделям. По-

лученные среднее квадратическое отклонение по объему крупной деловой древесины (по всей породе) составило $\pm 4,62\%$, по объему крупной и средней деловой древесины — $\pm 5,17\%$, по всей деловой древесине — $\pm 2,81\%$. Систематические отклонения по выходу общей деловой древесины по всем разрядам высот находятся в пределах от $+2\%$ до $+3\%$. В целом для всей породы математические модели дают более высокий выход общей деловой древесины — на $2,24\%$; крупной — на $1,72\%$; крупной и средней — на $3,15\%$.

Приведенные выше отклонения объясняются различными подходами при расчете категорий крупности. В сортиментных таблицах Ф.П. Моисеенко крупная деловая древесина начинает определяться со ступени толщины 32 см, но она уже есть и в ступени 28 см, только длина этого отрезка не 6 м (наиболее распространенная длина пиловочника), а порядка 1,0 – 2,0 м. В сортиментных таблицах Ф.П. Моисеенко этот отрезок переводится в меньшую по размерности категорию крупности — среднюю. Но ГОСТ 9463-88 предусматривает деловые сортименты длиной 1,0 м при соответствующих диаметрах. Начиная со ступени 36 см, в таблицах исчезает мелкая деловая древесина, а со ступени 68 см — средняя и мелкая деловая древесина, т. е. отрезок ствола с диаметром от 25,5 см и менее переводится в дрова. Это объясняется тем, что при разработке сортиментных таблиц (проф. Ф.П. Моисеенко) выход категорий крупности рассчитывался, опираясь на длины наиболее распространенных сортиментов (в ряде ступеней толщины в расчет включались и другие длины сортиментов).

Экономический эффект применения математических моделей выхода категорий крупности рассчитывался как разность между получаемыми в обоих случаях материально-денежными оценками этих пробных площадей и определялся в пересчете на 1 тыс. м³ деловой древесины.

Используемые для расчета пробные площади представлены спелыми еловыми насаждениями от IА до III классов бонитета, на которых проводилась перечислительная таксация. Как показали исследования сравнительного анализа по выходу категорий крупности деловой древесины математическая модель дает более высокий выход крупной, средней и общей деловой древесины и меньший выход мелкой деловой и дров по сравнению с сортиментными таблицами. Полученные расхождения вызваны более рациональным учетом категорий деловой древесины при использовании математической модели образующей, а также устранением перехода деловой древесины из одной категории в другую.

При определении экономического эффекта использовалась таксовая стоимость по 2 разряду такс на 01.08.2000г. Общий экономический эффект по всем пробным площадям определялся по формуле (11) и составил 549,287 тыс. руб.

$$\text{Эк. эфф.} = \Delta V_{\text{кр}} * C_1 + \Delta V_{\text{ср}} * C_2 + \Delta V_{\text{мелк}} * C_3 + \Delta V_{\text{др}} * C_4; \quad (11)$$

где $\Delta V_{\text{кр}}$; $\Delta V_{\text{ср}}$; $\Delta V_{\text{мелк}}$; $\Delta V_{\text{др}}$ — отклонения в выходе категорий деловой древесины, а также дров; C_1 ; C_2 ; C_3 ; C_4 — таксовые стоимости соответственно крупной, средней, мелкой деловой древесины, а также дров.

Экономический эффект, приходящийся на 1 тыс. м³ деловой древесины, составил 112,760 тыс. руб./ тыс м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Относительный сбег стволов ели не является постоянной величиной для всех разрядов высот, поэтому для разработки математических моделей образующих ствола целесообразно использовать средний относительный сбег по разрядам высот [1, 2]. Образующие древесных стволов являются сложными кривыми, которые на всем их протяжении не могут быть представлены (без потери точности) одной аналитической кривой. Построение более точной математической модели образующей ствола возможно методами кусочно-полиномиальной аппроксимации или методом сплайн-функций [2].

2. Математические модели объемов стволов, полученные путем интегрирования образующей с использованием классической формулы объема тела вращения, позволяет определять объем стволов (отрезков стволов) с необходимой точностью [2, 4].

3. Применяющиеся в практике таблицы объемов стволов содержат ошибки, присущие сложной секционной формуле срединного сечения. Сортиментные таблицы (Ф.П. Моиссенко, Н.П. Анучина) систематически занижают выход сортиментов по классам крупности, общей деловой древесины и завышают выход дров. Они имеют стандартный состав сортиментов, а вход в эти таблицы осуществляется в основном через табулированные (шаг 4 см) значения диаметров. Использование математических моделей образующих стволов ели на ПЭВМ для расчета объема стволов и сортиментов исключает вышеуказанные недостатки объемных и сортиментных таблиц и предоставляет возможность определения объема ствола с любым диаметром на высоте 1,3 м, а также с любой его длиной. Создается возможность выполнения расчета выхода сортиментов на лесосеке по запросу пользователя, или с различными размерами сортиментов [3, 5, 6].

4. Разработано программное обеспечение на ПЭВМ в среде MS DOS, позволяющее определять объем стволов в коре и без коры (V_{tree}); объем отрезков стволов без коры (L_D_Vol); а также объем категорий крупности деловой древесины из стволов ели ($Lesshot$). Указанные математические модели внедрены в ГЛПО "Белгослес". Составлены таблицы объемов стволов ели (в коре, без коры); таблицы выхода категорий крупности деловой древесины по разрядам высот для стволов ели [6, 7].

5. Экономический эффект при внедрении результатов исследований достигается за счет уточнения выхода деловой древесины (2,28%) по сравнению с существующими сортиментными таблицами и составляет 112 тыс. руб./ тыс. м³ в ценах на 01.08.2000 г [8].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Цай С.С. Сбег стволов ели по относительным высотам // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство. - Минск: БГТУ, 1996. - Вып. III. - С. 112-114.

2. Цай С.С. Моделирование образующей и объемов древесных стволов ели // Труды БГТУ. Сер. I. Лесное хозяйство. - Минск: БГТУ, 1996. - Вып. IV. - С. 92-93.

3. Цай С.С. Использование модели образующей древесных стволов для таксации леса // Лесная наука на рубеже XXI века: Сб. н. тр. / Института леса НАН Б. - Гомель, 1997. - Вып. 46. - С. 297-299.

4. Цай С.С. Математические модели образующей и объемов стволов ели // Труды БГТУ. Сер. I. Лесное хозяйство. - Минск: БГТУ, 1997. - Вып. V. - С. 123-124.

5. Цай С.С., Рябов Д.В. Оценка выхода деловой древесины по модели образующей древесных стволов // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство. - Минск: БГТУ, 1998. - Вып. VI. - С. 169 - 172.

6. Цай С.С. Таблицы для оценки лесосечного фонда еловых лесов Беларуси, составленные на основе математической модели образующей стволов / Бел. гос. технологический ун-т. - Мн., 1999. - 15 с. - Деп. в БелИСА 24.02.99, № Д199913.

7. Цай С.С. Таблицы объемов стволов ели, составленные на основе математической модели образующей стволов / Бел. гос. технологический ун-т. - Мн., 1999. - 11 с. - Деп. в БелИСА 24.02.99, № 199914.

8. Цай С.С. Оценка общего запаса и выхода категорий крупности деловой древесины ели математической моделью образующей древесных стволов // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство. - Минск: БГТУ, 1999. - Вып. VII. - С. 187 - 189.

РЕЗЮМЕ

Цай Сергей Сергеевич**РАЗРАБОТКА ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБРАЗУЮЩИХ И ОБЪЕМОВ СТВОЛОВ ЕЛИ**

Ключевые слова: ОБРАЗУЮЩАЯ ДРЕВЕСНОГО СТВОЛА, ОБЪЕМ СТВОЛА, ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ СБЕГ, ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ВЫСОТЫ, РАЗРЯДЫ ВЫСОТ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОРМЫ, КРУПНАЯ, СРЕДНЯЯ, МЕЛКАЯ ДЕЛОВАЯ ДРЕВЕСИНА, ВЫХОД ДЕЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ. СОРТИМЕНТНАЯ СТРУКТУРА

Объект и предмет исследования. Объекты исследования представлены еловыми древостоями естественного происхождения в Республике Беларусь. Предметом исследования явилась образующая стволов ели [*Picea abies* (L.) Karst].

Цель работы. Целью исследования являлись разработка лесотаксационных моделей образующих и объемов стволов ели, отличающихся новым подходом в моделировании относительного сбеге ствола, имеющих практическое значение в сортиментации запасов и таксации еловых древостоев; информационного и программного обеспечения многовариантной сортиментации запасов еловых древостоев.

Полученные результаты и новизна. Предложена новая методика математического моделирования образующих древесных стволов путем кусочно-полиномиальной аппроксимации кубическими полиномами данных относительного сбеге стволов на относительных высотах по разрядам высот. Предложенные математические модели образующих и объемов древесных стволов ели, алгоритмы и программное обеспечение на РС IBM, позволяющие определять объем стволов ели и выполнять сортиментацию еловых древостоев.

Рекомендации по использованию. Разработанные модели можно использовать для определения общего запаса и выхода категорий крупности деловой древесины стволов ели в нескольких вариантах, в зависимости от вида входных данных: а) по данным перечета диаметров по ступеням толщины с любой градацией (4 см; 2 см; 1 см) и средним высотам по ступеням толщины; б) по данным перечета диаметров и установленного разряда высот; в) по конкретному диаметру и высоте ствола (без градаций) для индивидуальной сортиментации.

Область применения. Математические модели образующих древесных стволов ели найдут применение в геоинформационных системах по управлению лесными ресурсами, в имитационных системах прогноза роста деревьев и древостоев, а также использоваться в лесохозяйственной и лесоустроительной практике.

РАСПРАЦОЎКА ЛЕСАТАКСАЦЫЙНЫХ МАДЭЛЯЎ УТВАРАЛЬНЫХ І АБ'ЁМАЎ СТВАЛОЎ ЕЛАК

Ключавыя словы: УТВАРАЛЬНАЯ ДРАЎНЯНАГА СТВАЛА, ОБ'ЁМ СТВАЛА, ЗБЕГ СТВАЛА, АДНОСНЫ ЗБЕГ, АДНОСНЫЯ ВЫШЫНІ, РАЗРАДЫ ВЫШЫНЬ, КАЭФІЦЫЕНТЫ ФОРМЫ, БУЙНАЯ, СЯРЭДНЯЯ, ДРОБНАЯ ДЗЕЛАВАЯ ДРАЎНІНА, ВЫХАД ДЗЕЛАВОЙ ДРАЎНІНЫ, САРТЫМЕНТНАЯ СТРУКТУРА.

Аб'ект і прадмет даследавання. Аб'екты даследавання прадстаўлены яловымі дрэвастоямі натуральнага паходжання Рэспублікі Беларусь. Прадметам даследавання з'явілася ўтваральная драўняных ствалоў елак [*Picea abies* (L.) Karst].

Мэта працы. Мэтай даследавання з'явілася распрацоўка лесатаксацыйных мадэляў утваральных і аб'ёмаў ствалоў елак, якія адрозніваюцца новым падыходам у мадэляванні адноснага збегу ствала, маюць практычнае значэнне ў сартыментацыі запасаў і таксацыі яловых дрэвастояў; інфармацыйнага і праграмнага забеспячэння для шматварыянтнай сартыментацыі яловых дрэвастояў.

Атрыманыя вынікі і навізна. Прапанавана новая метадыка матэматычнага мадэлявання утваральных драўняных ствалоў шляхам кусочна-палінамінальнай апраксімацыі кубічнымі паліномамі звестак адноснага збегу ствалоў па разрадах вышынь. Распрацаваны матэматычныя мадэлі ўтваральных і аб'ёмаў драўняных ствалоў елак, алгарытмы і праграмнае забеспячэнне на РС/ІВМ, якія дазваляюць вызначаць аб'ём ствалоў елак і выконваць сартыментацыю яловых дрэвастояў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Прапанаваныя мадэлі можна выкарыстоўваць для выяўлення агульнага запасу і выхаду катэгорый памернасці дзелавой драўніны ствалоў елак у некалькіх варыянтах у залежнасці ад віду ўваходных звестак: а) па матэрыялах пераліку дыяметраў па ступенях таўшчыні з лобой градацыяй (4 см, 2 см, 1 см) і сярэдніх вышынях ступеняў таўшчыні; б) па выніках пераліку дыяметраў па ступенях таўшчыні і вызначаным разрадзе вышынь; в) па канкрэтным дыяметры і вышыні дрэва для індывідуальнай сартыментацыі.

Вобласць ужывання. Матэматычныя мадэлі ўтваральных драўняных ствалоў елак знойдуць ужыванне ў геаінфармацыйных сістэмах для кіравання ляснымі рэсурсамі, у імітацыйных сістэмах прагнозу росту дрэў і дрэвастояў, таксама змогуць выкарыстоўвацца ў лесагаспадарчай і лесаўпарадкавальнай практыцы.

RESUME

*Tsai Sergey Sergeevich***Developing taper curve and tree volume models for spruce.**

Key words: TAPER CURVE; TREE VOLUME; RELATIVE DIAMETERS; RELATIVE HEIGHTS; GRADES OF HEIGHTS; FORM QUOTIENT; ASSORTMENT STRUCTURE; MERCHANTABLE WOOD; FUEL TIMBER; MERCHANTABLE WOOD OUTPUT.

The object and the subject of the research. The object of the research is the natural spruce stands of Republic of Belarus. The subject of the research is the trunk taper curve for spruce [*Picea abies* (L.) Karst].

The purposes of paper. The development of the tree taper curve and tree volume models with using the new approach based on modeling by relative diameters and by grades of heights, software for IBM PC for determining tree volume and merchantable wood output for spruce, volume and merchantable wood output tables for spruce made with the proposed PC programs are the aim of the paper.

Received results and novelty. There is offered a new method of modeling trunk taper curve by grade of heights with using piecewise-polynomial approximation. There are also created the taper curve models and the tree volume models for spruce, software for IBM PC for determining tree volume and merchantable wood output; volume and merchantable wood output tables for spruce made with the proposed PC programs.

Recommendations for use. Recommended trunk taper curve models and tree volume models may be used for practical purposes in the following cases: a) for data processing of tree enumeration, when diameters and mean heights are known for all diameter classes; b) for data processing of tree enumeration, when only diameters and grade of heights are known; c) for determining tree volume and merchantable wood output when diameter and height of each trunk are known.

Applications. The taper curve model and the tree volume model may be used in geographic information system for forest resources management, in stands growth prognosing models, in forestry practice.

Цай Сергей Сергеевич

РАЗРАБОТКА ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБРАЗУЮЩИХ И ОБЪЕМОВ
СТВОЛОВ ЕЛИ

Подписано в печать 24.11.2000. Формат 60^х 84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Усл. кр. – отт. 1,3. Уч. – изд. л. 1,1.

Тираж 85 экз. Заказ 489.

Белорусский государственный технологический университет.

220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Лицензия ЛВ № 276 от 15.04.98.

· Отпечатано на ротапринте Белорусского государственного
технологического университета.
220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13.