

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ДРЕВОСТОЕВ ПО ДИАМЕТРУ МЯГКОЛИСТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Ковалевский С. В.

БГТУ (г. Минск, Беларусь)

Введение. Моделирование предполагает построение действующей математической или реальной модели, обладающей свойствами (или характеризующейся соотношениями), которые подобны свойствам или соотношениям рассматриваемой естественной или технической системы.

Закономерности строения древостоев, их частей и совокупностей являются теоретической основой разработки методов таксации леса, учета лесного и лесосечного фонда, широко используются при подготовке справочно-нормативных лесотаксационных документов, имитации схем рубок ухода, материально-денежной оценке запасов древостоев, построении таблиц хода роста насаждений, динамики товарности древостоев [1].

В строении древостоев особое значение уделяется модели распределения числа деревьев по диаметру, на основе которой можно получить распределение других таксационных показателей древостоев (по высоте, объему и т. д.). Модель строения древостоев по диаметру позволяет определять лесоводственную структуру древостоев, научно обосновать разработку и проведение лесохозяйственных мероприятий, повысить точность таксации и совершенствовать лесостроительное проектирование.

Цель исследования. Изучить закономерности строения мягколиственных древостоев по диаметру, установить теоретическое распределение, на основании которого можно получить распределение числа деревьев по ступеням толщины, разработать регрессионные модели связи между таксационными показателями древостоя и параметрами теоретической функции, и создать имитационную модель, позволяющую получать распределение деревьев по диаметру в ГИС «Лесные ресурсы», для решения практических задач по подготовке лесосечного фонда и разработке программ рубок ухода.

Объект исследования. Объектом исследования послужили чистые одновозрастные березовые, осиновые и черноольховые древостои. Опытные данные охватывают все геоботанические подзоны и лесорастительные районы Беларуси, характеризуются широким диапазоном по условиям произрастания, по возрасту и другим таксационным показателям. Экспериментальный материал представлен данными перечислительной таксации на 241 временной пробной площади (табл. 1).

Основная часть. Процесс моделирования распределения деревьев по диаметру включает статистический анализ выборочных распределений числа деревьев по диаметру, аппроксимацию опытных распределений теоретиче-

скими функциями, установление взаимосвязей между статистиками выборочных распределений и таксационными показателями древостоя, оценку параметров функций теоретических распределений и разработку модели строения древостоя по диаметру.

Таблица 1 – Распределение пробных площадей по классам возраста

Преобладающая порода	Класс возраста								Всего
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Береза	3	15	24	19	21	17	20	7	126
Осина			6	12	11	9			38
Ольха черная			7	11	24	20	10	5	77
Итого	3	15	37	42	56	46	30	12	241

Распределение числа деревьев по диаметру определяется его статистическими показателями. Статистическая обработка опытных распределений числа деревьев по ступеням толщины показала, что в исследуемых насаждениях преобладает асимметричный унимодальный тип распределения числа деревьев по диаметру с положительной асимметрией. Выполнен анализ статистических показателей и установлен характер изменения статистик в зависимости от среднего диаметра, возраста древостоя [2, 3, 4].

Опытные распределения числа деревьев по диаметру в исследуемых древостоях выравнивались функциями теоретических распределений (нормальное, бета-функция, распределение Вейбулла) и по χ^2 -критерию Пирсона оценивалось (с доверительной вероятностью 0.95) соответствие опытного распределения теоретическому. Результаты аппроксимации показали, что для аналитического описания опытного распределения числа деревьев по диаметру лучше подходит бета-функция, которая выравнивает 59,8 % общего числа исследуемых древостоев.

Бета-распределение является гибким и удовлетворительно аппроксимирует опытные распределения диаметров деревьев со значительной асимметрией и эксцессом [5], кроме этого имеются многочисленные работы, которые доказывают успешное применение бета-функции для моделирования распределения числа деревьев по диаметру.

Дифференциальная функция бета-распределения диаметров деревьев имеет вид:

$$f(d) = C \cdot (d_i - d_{\min})^{\alpha} \cdot (d_{\max} - d_i)^{\beta} \quad (1)$$

$$C = \frac{N}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} (d_i - d_{\min})^{\alpha} \cdot (d_{\max} - d_i)^{\beta} d(x)} \quad (2)$$

где C – коэффициент, показывающий, что площадь под кривой распределения равна числу деревьев в древостое;

- α, γ – показатели формы кривой;
 d_{min} – минимальный диаметр;
 d_{max} – максимальный диаметр;
 d_i – диаметр i -го дерева в древостое.

Разрабатываемая на основе бета-функции имитационная модель строения древостоев по диаметру должна выдавать распределение количества стволов по ступеням толщины без предварительного проведения сплошного перече́та используя таксационные показатели древостоя из повыдельной базы данных ГИС «Лесные ресурсы».

При создании модели строения древостоя по диаметру, первоочередное значение имеет разработка достаточно надежных моделей связи между таксационными показателями и статистиками опытного распределения.

Бета-распределение включает четыре параметра — α, γ - показатели формы кривой, минимальный и максимальный диаметры.

Параметры формы кривой бета-распределения вычисляются через среднеарифметический диаметр древостоя и дисперсию опытного распределения числа деревьев по диаметру в древостое согласно алгоритму, разработанному Ф. Зехером, с тремя дополнениями, предложенные финскими учеными [6]. Для определения показателей формы кривой необходимо разработать регрессионные модели связи среднеарифметического диаметра и стандартного отклонения с таксационными показателями древостоя.

Для разработки регрессионных моделей связи между статистиками распределения и таксационными показателями исследуемых древостоев проведен корреляционный анализ таксационных показателей древостоев и статистик распределений.

Результаты корреляционного анализа показывают, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между среднеарифметическим диаметром, размахом распределения, максимальным диаметром опытных распределений числа деревьев по диаметру, с средней высотой, средним диаметром насаждения. Корреляция этих показателей с возрастом древостоя несколько ниже.

Для определения среднеарифметического значения ряда распределения деревьев по диаметру разработаны регрессионные модели связи этого показателя со средним таксационным диаметром и средней высотой древостоя. Лучшие результаты показала линейная функция, которая имеет вид:

березовые древостои

$$\bar{D} = -0,261465 + 0,962664 \times D \quad (3)$$

осиновые древостои

$$\bar{D} = -0,766656 + 1,002148 \times D \quad (4)$$

черноольховые древостой

$$\bar{D} = 0,915034 \times D \quad (5)$$

где \bar{D} – среднеарифметический диаметр, см;

D – среднеквадратический (таксационный) диаметр древостоя, см.

Параметры моделей связи и ошибки оценки среднеарифметического диаметра в исследуемых древостоях приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры моделей связи среднеарифметического диаметра древостоя

Номер модели	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий Фишера, F	Абсолютные отклонения, см		Относительные отклонения, %		Систематическая ошибка, %	Среднеквадратическая ошибка, %
			+	-	+	-		
3	0,997	50850	0,5	0,6	6,9	14,5	+0,06	0,62
4	0,996	196416	0,9	0,4	6,1	1,4	+0,12	0,72
5	0,999	294004	-	-3,5	-	13,5	-5,96	6,30

Модели (3 – 5) достоверны по F – критерию Фишера, объясняют 99 % вариации среднеарифметического диаметра древостоя с среднеквадратической ошибкой не более ± 6 %. Во всех приведенных моделях коэффициенты регрессии значимы на 5 % уровне значимости по t – критерию Стьюдента.

Анализируя зависимость минимального и максимального диаметров распределения числа деревьев по диаметру исследуемых древостоев было установлено, что наибольшие значения показателя тесноты связи с таксационными показателями древостоя имеет максимальный диаметр распределения числа деревьев по диаметру. Наиболее сильно максимальный диаметр коррелирует со средним диаметром древостоя ($r \geq 0,861$), со средней высотой, возрастом древостоя и количеством стволов ($r \geq 0,727$). Результаты статистической обработки опытных распределений числа деревьев по диаметру показывают, что коэффициент вариации максимального диаметра ($V=39,1$ %) значительно ниже показателя вариации минимального диаметра ($V=62,4$ %). Минимальный диаметр распределения деревьев по диаметру в опытных древостоях тесно коррелирует со средним диаметром. Значения коэффициента корреляции меньше у минимального диаметра, чем между максимальным диаметром распределения деревьев по диаметру и средним диаметром древостоя (табл. 3).

Таблица 3 – Коэффициенты парной корреляция между таксационными показателями насаждения и статистиками выборочных рядов распределения деревьев по диаметру

Таксационный показатель древостоя	Минимальный диаметр – D_{\min}			Максимальный диаметр – D_{\max}			Среднеквадратическое отклонение – σ		
	Береза	Осина	Ольха черная	Береза	Осина	Ольха черная	Береза	Осина	Ольха черная
A	0,716	0,658	0,679	0,844	0,770	0,724	0,848	0,729	0,519
H	0,820	0,598	0,572	0,920	0,742	0,770	0,929	0,848	0,596
D	0,812	0,846	0,656	0,944	0,864	0,861	0,954	0,821	0,705
N	-0,76	-0,63	-0,58	-0,77	-0,58	-0,73	-0,77	-0,910	-0,639
G	0,613	0,614	0,434	0,713	0,306	0,597	0,716	0,360	0,392

Для оценки максимального диаметра древостоя разработаны регрессионные модели связи этого показателя с средним диаметром, средней высотой и возрастом насаждения. Лучшие результаты имеют модели:

березовые древостой

$$D_{\max} = \exp(1,89631 + 0,02205 \times H + 0,103998 \times D - 0,001985 \times D^2) \quad (6)$$

осиновые древостой

$$D_{\max} = 2,710896 \times D - 0,038347 \times D^2 \quad (7)$$

черноольховые древостой

$$D_{\max} = 16,11958 + 0,511116 \times H + 0,00085 \times D^3 \quad (8)$$

где D_{\max} – максимальный диаметр древостоя, см;

D – средний (таксационный) диаметр древостоя, см;

H – средняя высота древостоя, м;

A – средний возраст насаждения, лет.

Параметры моделей связи и ошибки оценки максимального диаметра распределения деревьев по диаметру в исследуемых древостоях приводятся в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры моделей связи максимального диаметра древостоя

Номер модели	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий Фишера, F	Абсолютные отклонения, см		Относительные отклонения, %		Систематическая ошибка, %	Среднеквадратическая ошибка, %
			+	-	+	-		
6	0,881	302,6	5,4	7,2	18,8	19,4	0,12	9,90
7	0,992	2223	6,6	6,1	17,3	12,2	-0,78	7,01
8	0,825	172,2	7,1	7,9	19,6	19,1	3,17	10,4

Модели (6 – 8) достоверны по F – критерию Фишера, объясняют более 83 % вариации максимального диаметра распределения числа деревьев по диаметру с среднеквадратической ошибкой не более $\pm 10,4\%$. Во всех приведенных моделях коэффициенты регрессии значимы на 5 % уровне по t – критерию Стьюдента.

Минимальный диаметр древостоя имеет большую вариации, поэтому, в качестве переменной в моделях использована величина размаха ряда распределения деревьев по диаметру (W). Коэффициент вариации размаха распределения меньше, чем у минимального диаметра ряда распределения, и равен 35,7 %. Для оценки размаха распределения диаметров деревьев в древостое разработаны регрессионные модели связи этого показателя со средним диаметром, средней высотой, возрастом и суммой площадей сечений насаждения:

березовые древостой

$$W = 5,942896 + 0,604567 \times H + 0,097155 \times A + 0,017804 \times D^2 \quad (9)$$

осиновые древостой

$$W = 3,265538 \times D - 0,060157 \times D^2 - 0,410038 \times G \quad (10)$$

черноольховые древостой

$$W = 6,945408 + \exp(0,948271 + 0,017375 \times H + 0,069193 \times D) \quad (11)$$

где W – размах ряда распределения диаметров деревьев в древостое, см;

D – средний (таксационный) диаметр древостоя, см;

H – средняя высота древостоя, м;

A – средний возраст насаждения, лет;

G – сумма площадей сечений древостоя, m^2 .

Параметры моделей связи и ошибки оценки размаха распределения числа деревьев по диаметру в исследуемых древостоях приводятся в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры моделей связи размаха ряда распределения диаметров деревьев в древостое

Номер модели	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий Фишера, F	Абсолютные отклонения, см		Относительные отклонения, %		Систематическая ошибка, %	Среднеквадратическая ошибка, %
			+	-	+	-		
9	0,824	190,3	4,1	6,6	17,1	19,9	-1,23	9,05
10	0,982	631,6	8,2	6,6	16,5	17,8	-1,07	9,65
11	0,997	8775,1	4,0	6,1	16,2	19,6	-0,56	9,81

Модели (9 – 11) достоверны по F – критерию Фишера, объясняют более 89 % вариации размаха распределения числа деревьев по диаметру с среднеквадратической ошибкой не более $\pm 10,4\%$. Во всех приведенных моделях коэффициенты регрессии значимы на 5 % уровне по t – критерию Стьюдента.

Минимальный диаметр распределения числа деревьев по диаметру определяется через максимальный диаметр и размах распределения, значения которых вычисляются по регрессионным моделям связи с таксационными показателями древостоя.

Среднее значение, пределы варьирования (минимальный и максимальный диаметры) и размах вариации хотя и являются простыми наглядными характеристиками, но они не отражают характера распределений числа деревьев по ступеням толщины. Показателями, характеризующими варьирование и форму распределения числа деревьев по диаметру, являются среднеквадратическое отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Корреляционный анализ показал, что среднеквадратическое отклонение во всех исследуемых древостоях тесно коррелирует с средним возрастом, средней высотой, средним диаметром и максимальным диаметром древостоя, размахом распределения числа деревьев по диаметру ($r \geq 0,750$) (табл. 3).

В исследуемых березовых и осиновых древостоях для определения величины среднеквадратического отклонения мы использовали зависимость между среднеквадратическим и среднеарифметическим диаметрами распределения числа деревьев по ступеням толщины (12). Данное уравнение применяли В.В. Кузьмичев, при изучении закономерностей роста чистых одновозрастных сосновых древостоях, и В.С. Моисеев, при изучении закономерностей строения и роста древостоях молодняков основных лесобразующих пород в лесах европейской части европейской части РСФСР. Зависимость имеет вид

$$\sigma = \sqrt{D^2 - \bar{D}^2} \quad (12)$$

где D – среднеквадратический (таксационный) диаметр древостоя, см;
 \bar{D} – среднеарифметический диаметр, см.

Ошибки оценки среднеквадратического отклонения распределения числа деревьев по диаметру в исследуемых древостоях приводятся в таблице 6.

Уравнение связи среднеквадратического отклонения распределения числа деревьев по диаметру с среднеквадратическим (таксационным) и среднеарифметическим диаметрами древостоя характеризуется среднеквадратической ошибкой не более $\pm 10\%$. Максимальные отклонения опытных среднеквадратических отклонений от данных по модели (12) составляют 1,5 см или 20 %. Систематическая ошибка уравнения не превышает $\pm 1,7\%$.

Таблица 6 – Ошибки оценки среднеквадратического отклонения

Древесная порода	Абсолютные отклонения, см		Относительные отклонения, %		Систематическая ошибка, %	Среднеквадратическая ошибка, %
	+	-	+	-		
Береза	1,27	1,29	18,93	19,14	-0,73	9,85
Осина	1,47	0,74	17,32	12,92	1,66	9,02

В исследуемых черноольховых древостоях уравнение (12) при определении среднеквадратического отклонения дает значительные систематические ($-5,74\%$) и среднеквадратические ошибки ($\pm 21,5\%$). Поэтому среднеквадратическое отклонение распределения числа деревьев по диаметру в черноольховых насаждениях определяем по регрессионным моделям связи с таксационными показателями. Лучшей моделью, по мнению О.А. Атрощенко и И.В. Толкача, характеризующей изменчивость среднеквадратического отклонения в сосновых древостоях, является множественная линейная регрессия с размахом распределения, средним диаметром и суммой площадей сечения [5, 7]. В нашем случае, лучшие результаты показывает множественная линейная регрессия с размахом распределения и средним диаметром древостоя, которая имеет вид

$$\sigma = 0,118884 \times D + 0,103023 \times W \quad (13)$$

где D – средний (таксационный) диаметр древостоя, см;

W – размах ряда распределения диаметров деревьев в древостое, см;

Модель (13) достоверна по F – критерию Фишера, объясняют более 98 % вариации среднеквадратического отклонения распределения числа деревьев по диаметру с среднеквадратической ошибкой не более $\pm 9,82\%$. Систематическая ошибка составляет 1,43 %. Коэффициенты регрессии значимы на 5 % уровне по t – критерию Стьюдента.

На основе исследования строения чистых одновозрастных березовых, осиновых и черноольховых насаждений, применения статистической модели бета-распределения числа деревьев по диаметру, вышеизложенных регрессионных моделей связи параметров модели распределения и таксационных показателей древостоя, алгоритма имитации строения и вычисления таксационных показателей древостоя разработана имитационная модель строения древостоев по диаметру. При разработке имитационной модели использовались методика, алгоритмы и программы STROENIE, K104DIAM и K104BETA проф. О.А. Атрощенко [5].

Исходными данными для моделирования распределения числа деревьев по ступеням толщины являются таксационные показатели насаждения, указанные в повыведельной базе данных ГИС «Лесные ресурсы» – возраст, средний (таксационный) диаметр, средняя высота древостоя, сумма площадей сечений или относительная полнота древостоя, запас, класс бонитета.

Результат работы имитационной модели – распределение числа стволов по ступеням толщины и основные таксационные показатели, полученные на основе теоретического распределения и по регрессионным моделям связи: средняя высота древостоя, видовая высота, сумма площадей сечений, и, как результат, запас древостоя.

Для проверки точности и надежности модели строения по диаметру в сравнении с данными перечислительной таксации на 16 контрольных временных пробных площадях, на ЭВМ выполнен эксперимент с имитационной моделью.

Результаты моделирования строения древостоев по диаметру на контрольных пробных площадях показывают, что ошибка определения таксационных показателей по данным теоретического распределения не превышает 1,0 % – при оценке среднего диаметра древостоя, 1,5 % - при оценке суммы площадей сечений, 9,5 % - при оценке запаса древостоя и 2,0 % - при оценке количества стволов на 1 га [8].

Выводы: 1. При изучении закономерностей строения по диаметру мягколиственных древостоев установили, что для аналитического описания опытных распределений числа деревьев по диаметру лучше подходит бета-функция, которая выравнивает 59,8 % общего числа исследуемых распределений. Имитационная модель строения древостоев по диаметру создана на основе бета-распределения.

2. Разработанные регрессионные модели (3 – 13) для определения среднеарифметического диаметра, максимального диаметра, размаха распределения и среднеквадратического отклонения ряда распределения деревьев по диаметру достоверны по F – критерию Фишера, объясняют более 83 % вариации исследуемых показателей с среднеквадратической ошибкой не более $\pm 10,4$ %. Во всех приведенных моделях коэффициенты регрессии значимы на 5 % уровне значимости по t – критерию Стьюдента.

3. Ошибка определения таксационных показателей по данным распределения представленного разработанной имитационной модели не превышает 1,0 % – при оценке среднего диаметра древостоя, 1,5 % - при оценке суммы площадей сечений, 9,5 % - при оценке запаса древостоя и 2,0 % - при оценке количества стволов на 1 га. На основе этого, можно предполагать, что при высокой точности определения исходных данных разработанная модель позволит определять запас древостоя с среднеквадратической ошибкой до 5 %.

4. Разработанная имитационная модель строения древостоев по диаметру может быть рекомендована для получения распределения числа деревьев по диаметру в ГИС «Лесные ресурсы» на основе имеющихся таксационных показателей в повыведельной базе данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин, К.Е. Методы и техника обработки лесоводственной информации / К.Е. Никитин, А.З. Швиденко. – Москва: Лесная промышленность, 1978.

2. Ковалевский, С.В. Статистический анализ распределений диаметров деревьев в сосновых, еловых и березовых древостоях / С. В. Ковалевский // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хозяйство. Вып. VII. 1999. - С. 115–118.

3. Ковалевский, С. В. Моделирование распределений деревьев по диаметру в сосновых, еловых и березовых древостоях / С. В. Ковалевский // Лес, наука, молодежь: материалы Междунар. науч. конф., Гомель, 5-7окт. 1999 г.: в 2 т./ Ин-т леса НАН Беларуси; редкол.: В. Ф. Багинский [и др.]. - Гомель, 1999. - Т. 1. - С. 65–67.

4. Ковалевский, С.В. Моделирование распределений деревьев по диаметру в березовых, осиновых и черноольховых древостоях / С.В. Ковалевский // Леса Евразии в XXI веке: Восток – Запад: материалы Междунар. конфер. молодых учёных, посвящен. проф. И. К. Пачоскому, Москва, 1-5 окт. 2002 г. / Москов. гос. ун-т леса; редкол.: А. Н. Обливин [и др.]. - Москва, 2002. - С. 44–46.

5. Атрощенко, О.А. Система моделирования и прогноза роста древостоев (на примере БССР): дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / О.А. Атрощенко. - Киев, 1985. - 520 л.

6. Zohrer, F. The beta-distribution for best fit of stem-diameter-distributions / Zohrer F. // Third conference Advisory group for forest statisticians. – Paris, 1970. – p. 23-29.

7. Толкач И. В. Строение и рост естественных сосновых древостоев Беловежской пуцы: дис. ... канд с.-х. наук: 06.03.02./ И. В. Толкач. - Минск, 1997.– 176 л.

8. Ковалевский С.В. Имитационная модель строения древостоев по диаметру в ГИС «Лесные ресурсы» / С. В. Ковалевский // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хозяйство. Вып. XV, 2007.



УДК 630*232

ОПЫТ ОЦЕНКИ УЩЕРБА ИЗ-ЗА ПОДТОПЛЕНИЯ ЛЕСОВ НИИ «ПРИПЯТСКИЙ» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТРАССЫ НЕФТЕПРОВОДА «ДРУЖБА»

Степанчик В.В., Василенко А.И., Савлук С.В.
Институт леса НАН Беларуси
(г. Гомель, Беларусь)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из крупнейших экологических проблем лесного хозяйства на современном этапе является дестабилизация состояния и гибель лесов из-