

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*566 : 681.31

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ДРЕВОСТОЕВ ПО ДИАМЕТРУ

О. А. АТРОЩЕНКО

Белорусский технологический институт

Известны три типа распределения по диаметру [7]: одновершинное унимодальное, которое наблюдается в чистых одновозрастных древостоях; убывающее J-образное, характерное для смешанных, с большим числом составляющих пород насаждений; многовершинное (многомодальное), имеющее место в разновозрастных и многоярусных насаждениях.

Аналитическое описание одновершинных распределений деревьев по диаметру может быть выполнено тремя способами: [1, 6]: 1) через функции теоретических распределений (нормального, гамма- и бета-распределений, Вейбулла и т. д.); 2) по плотности опытного распределения в виде ряда производных нормального распределения (ряд Грама — Шарлье); 3) обобщенными методами (кривые Пирсона и Джонсона).

Строение чистых одновозрастных сосновых, еловых и березовых насаждений изучали по данным перечислительной таксации древостоев на 450 пробных площадях в возрасте от 10 до 160 лет, Ia—Va классов бонитета с относительной полнотой 0,5...1,0. На ЕС ЭВМ выполнены оценка параметров теоретических распределений, статистический анализ выборочных показателей опытных распределений (среднего квадратичного отклонения (σ), показателей эксцесса (E) и асимметрии (As), разработаны регрессии связи выборочных показателей и параметров распределений со средним диаметром древостоев [4, 5].

Статистический анализ показал, что стандартные отклонения распределений числа деревьев по диаметру в древостое варьируют с возрастом, условиями произрастания, способом и интенсивностью рубок ухода ($V = 30 \dots 33 \%$). При одинаковых среднем диаметре, числе деревьев (полноте) и размахе распределения $d_{max} - d_{min}$ средние квадратичные отклонения достоверно не различаются по типам леса (табл. 1).

Таблица 1

Таксационные и статистические показатели сосновых древостоев

Класс бонитета	Тип леса	Средний диаметр, см	Сумма площадей сечений, м ²	Размах, см	Статистики		
					σ , см	As	E
I	Сосняк мшистый	19,8	31,2	6...32	5,1	0,002	-0,694
II	» мшистый	20,1	26,0	6...34	5,5	0,183	-0,215
III	» вересковый	20,1	27,1	10...34	5,1	0,313	-0,538
IV	» осоковый	20,7	23,8	10...34	5,0	0,140	0,371

Оценки выборочных показателей асимметрии и эксцесса распределений варьируют в больших пределах ($V = 90 \dots 400 \%$). Значения этих показателей зависят не только от таксационных признаков дре-

востоев, но и от числа, значения ступеней толщины, количества деревьев в крайних ступенях. Данные перечислительной таксации елового древостоя на стационаре показывают, что при изменении ступени толщины при перечете с 2 на 4 см меняются знаки показателей асимметрии ($s = -0,024$ на $0,115$) и эксцесса ($s = -0,515$ на $0,077$), статистические модели распределений (со II на IV тип кривой Пирсона). Корреляция между средними диаметрами и показателями асимметрии и эксцесса распределений слабая ($r = 0,3 \dots 0,4$).

Исследования показывают, что функции теоретических распределений наиболее приемлемы для создания системы моделирования и прогноза динамики строения древостоев. Статистические модели распределений, от показателей асимметрии и эксцесса которых зависят не только члены уравнения (ряд Грама — Шарлье), но и тип модели (кривые Пирсона), ненадежны, ввиду низкой точности оценки асимметрии и эксцесса по регрессионным моделям связи с таксационными показателями древостоев (относительная ошибка моделей $20 \dots 40 \%$).

Статистическая оценка параметров моделей показала, что из 450 опытных распределений 71% согласуется с бета-распределением, 11 — с нормальным, 6 — с логнормальным, 12% — с гамма-распределением. Логнормальное распределение хорошо при небольших положительных асимметрии и эксцессе ($As, E < 0,5$). При отрицательной асимметрии эта модель преуменьшает число маломерных деревьев. Гамма — распределение характерно для диаметров деревьев в насаждениях, не пройденных рубками ухода, и во многих случаях дает результаты, подобные логнормальному.

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

$$f(d) = C (d - d_{min})^\alpha (d_{max} - d)^\gamma,$$

где C — коэффициент соответствия площади под кривой распределения общему числу деревьев древостоя;
 d_{min}, d_{max} — минимальный и максимальный диаметры деревьев в древостое.

Система моделирования основана на закономерностях строения древостоев, применении бета-распределения, регрессионных моделей связи, алгоритма вычисления таксационных показателей древостоя [5]. Выборочными или глазомерно-измерительными методами таксации без сплошного перечета деревьев оценивают возраст (A), сумму площадей сечений (G), средний диаметр (D) и высоту (H), класс бонитета ($H 100$), минимальный (d_{min}) и максимальный (d_{max}) диаметры деревьев.

По регрессионной модели связи оценивают среднее квадратичное отклонение (σ_d) распределения числа деревьев по диаметру в древостое. Для сосновых древостоев модель имеет вид

$$\sigma_d = 0,76 + 0,05D + 0,12 (d_{max} - d_{min}).$$

Проверка модели на данных перечислительной таксации 35 древостоев показала максимальные отклонения в оценках стандартных отклонений $\pm 1,5$ см, среднюю квадратичную ошибку $\pm 10,9 \%$. Параметры формы бета-распределения (α, γ) вычисляют через средний арифметический диаметр (\bar{D}) и дисперсию (σ_d^2) распределения по алгоритму, предложенному Ф. Зехером [2]. Последовательной итерацией, изменяя форму и размах кривой распределения, выбирают теоретическую бета-функцию, лучше подходящую опытному распределению.

Модели связи диаметров и высот деревьев разработаны по данным таксации 1 500 модельных деревьев. Исследованы уравнения параболического, логарифмического и экспоненциального типов. Хорошие результаты получены по уравнениям Корсуня и Г. Бакмана [3]. Для сосновых древостоев найдена модель

$$h = -0,05 + 0,41d - 0,32D + 0,82H + 0,418D/H.$$

Проверка модели на контрольных пробных площадях показала максимальные абсолютные отклонения $\pm 1,2$ м, среднюю квадратичную ошибку $\pm 2,9$ %. Модель видовой высоты (hf) создана по данным перечислительной таксации сосновых древостоев на 655 пробных площадях

$$hf = 1,1416 + 0,416h - 0,581hd^{-2} + 0,0086H100,$$

где d, h — диаметр и высота деревьев;

$H100$ — индекс класса бонитета, согласно общепониманной шкале М. М. Орлова.

Регрессия достоверна, коэффициенты значимы на 5 %-м уровне, модель объясняет 98 % вариации видовых высот деревьев с относительной ошибкой ± 10 %.

Для маломерных стволов сосны ($d \leq 6$ см) видовые числа находят по модели

$$f = 0,44 + 1,13/h.$$

В зависимости от среднего диаметра древостоя оценивают значении ступени толщины, по теоретической бета-функции получают распределение числа деревьев, по регрессии связи — средние высоты, видовые числа и объемы стволов по ступеням толщины. Программа «Строение» составлена на языке ФОРТРАН-IV в ОС ЕС ЭВМ. Выход — перечет деревьев и таксационные показатели древостоя. Система позволяет имитировать строение чистых одновозрастных сосновых, еловых и березовых древостоев [5]. Сравнение выхода имитационной модели «Строение» с данными перечислительной таксации сосновых древостоев на 35 контрольных пробных площадях показало, что относительные ошибки в оценках средних диаметров древостоев составляют от $+0,9$ до $-0,5$ %, средних высот $+7,8$ до $-4,8$ %, сумм площадей сечений $+2,0$ до $-0,8$ %, запасов $+5,3$ до $-4,4$ %. При ± 5 %-й точности таксации суммы площадей сечений древостоя средняя квадратичная ошибка в оценках запасов древостоев составила $\pm 5,9$ %, а при ± 10 %-й точности ошибка по запасам $\pm 10,7$ % с максимальным отклонением оценок $\pm 11 \dots 16$ %.

Система моделирования строения древостоев позволит решать различные практические задачи.

Для материально-денежной оценки запасов древостоев разработана имитационная модель «Лесосека» [5]. Ее основу составляет программа «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: $V_{кр} = \varphi(V, \lg^2 d)$, $\lg P_{ср} = \varphi(d, h, \lg d)$; $\lg P_{м} = \varphi(d, h, \lg V)$. Вводом в модель являются данные глазомерно-измерительной таксации древостоев: возраст, сумма площадей сечений, средние диаметр и высота, класс бонитета, максимальный и минимальный диаметры деревьев, процент деловых деревьев. Выход — распределение числа деревьев по ступеням толщины, деловой древесины по категориям крупности, объемы дров и отходов. Для оценки надежности модели сравнивали результаты перечисли-

тельной таксации 10 лесосек главного пользования общей площадью 9,3 га в сосновых лесах с данными материально-денежной оценки запасов модели на ЭВМ (табл. 2).

Максимальные отклонения по выходу относятся к малым величинам. Например, фактический выход крупной деловой древесины на лесосеке составил 6,5 м³, а на ЭВМ оценен — 7,8 м³, т. е. отклонение равно +20 %.

Таблица 2

Точность оценки выхода деловой древесины по категориям крупности на ЭВМ

Древесина	Отклонения, %				Средняя квадратичная ошибка, %
	максимальные		минимальные		
	+	-	+	-	
Деловая:					
крупная	20,0	27,6	5,5	19,0	17,9
средняя	10,0	18,3	0,5	1,6	9,1
мелкая	42,9	19,0	6,0	1,7	24,7
Итого деловой	10,8	17,1	0,3	2,2	8,7
Ликвид	10,6	0,6	0,1	0,6	4,9
Общий запас	5,1	0,9	1,2	0,9	2,9

В целом по модели «Лесосека» получены удовлетворительные результаты: средние квадратичные ошибки в оценках объемов деловой древесины $\pm 8,7$ %, ликвидной $\pm 4,9$ %, общего запаса $\pm 2,9$ %. Общий объем всей деловой древесины 10 лесосек по модели отличается от фактического выхода по данным перечислительной таксации на 12 м³ (-0,7 %), ликвидной древесины — на 66 м³ (+3,7 %), а общая таксовая стоимость древесины — на 64 р. (-0,3 %). Таким образом можно решать задачу материально-денежной оценки лесосек главного пользования по материалам лесоустройства в лесах II группы без трудоемких работ по сплошному перечету деревьев.

Разработана имитационная модель «Диаметр» для составления таблиц распределения числа деревьев по ступеням толщины применительно к таблицам хода роста древостоев. Входом являются данные таблиц хода роста: возраст, сумма площадей сечения, средние диаметр и высота, число деревьев и запас древесины. Основу модели составляет модель «Строение» и регрессии связи $d_{max} = \varphi(A, G, D, H)$; $\ln(d_{max} - d_{min}) = \varphi(\ln A, \ln G, \ln(D + 20), \ln H)$ 100. По материалам выборочной, перечислительной и глазомерно-измерительной таксации сосновых лесов Белоруссии составлены таблицы производительности сосновых древостоев по типам леса (табл. 3).

Таблица 3

Производительность сосновых древостоев (сосняк черничный)

Возраст, лет	Древостой					Отпад				
	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Число деревьев, шт.	Сумма площадей сечений, м ²	Запас, м ³	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Число деревьев, шт.	Сумма площадей сечений, м ²	Запас, м ³
20	10,3	8,5	4 542	25,7	144	4,8	4,1	7 021	9,2	29
40	17,8	15,8	1 647	32,3	284	12,1	11,3	878	8,8	52
60	22,9	22,5	893	35,6	388	17,5	17,0	284	6,5	51
80	26,5	28,9	576	37,7	467	21,7	21,6	130	4,8	46

По модели «Диаметр» к таблицам производительности древостоев на ЭВМ получены таблицы распределения или строения древостоев по диаметру (табл. 4).

Таблица 4

Динамика строения сосновых древостоев по диаметру

Возраст, лет	Начальная ступень, см	Величина ступени, см	Ступени толщины, см											
			8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52
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	—	—
Отпад														
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	—	—	—	—	—

Моделирование на ЭВМ показало, что результаты по модели «Диаметр» практически одинаковы с данными таблиц хода роста: 1) число деревьев совпадает точно, так как это заложено в алгоритме программы; 2) средние диаметры различаются на 0,1... 0,2 см; 3) максимальные отклонения по средним высотам ± 0,5... 1,0 м; 4) суммы площадей сечений разнятся на 0,1... 0,3 м²; 5) отклонения по запасу до ± 5 %.

Имитационная система моделирования строения древостоев позволяет решать практические задачи оценки динамики товарности на оборот рубки, оптимизации сортиментной структуры древостоев, имитации рубок ухода, разработки моделей производительности эталонных насаждений.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Атрощенко О. А. Кривые распределения деревьев по диаметру в березовых древостоях // Лесоведение и лесное хозяйство.— Мн., 1976.— Вып. 12.— С. 104—110. [2]. Атрощенко О. А. Аналитическое описание распределений деревьев по диаметру с помощью бета-функции // Лесоведение и лесное хозяйство.— Мн., 1979.— Вып. 14.— С. 70—75. [3]. Атрощенко О. А. Регрессионные модели связи диаметров и высот деревьев в березовых древостоях // Лесоведение и лесное хозяйство.— Мн., 1982.— Вып. 17.— С. 77—80. [4]. Атрощенко О. А. Применение ЭВМ в лесохозяйственных исследованиях и дипломном проектировании: Методич. пособие. Ч. 1.— Мн., 1985.— 66 с. [5]. Атрощенко О. А. Система моделирования и прогноза роста древостоев (на примере БССР): Дис... докт. с.-х. наук. Т. 1.— Мн., 1986.— 442 с. [6]. Богачев А. В., Свалов С. Н. Методы таксации лесного и лесосечного фонда // Методы учета и прогноза лесных ресурсов.— М., 1978.— С. 8—97. [7]. Loetsch F., Zöhner F., Haller K. Forest inventory. Vol. 2.— München, 1975.— 417 p.

Поступила 13 апреля 1987 г.