

УДК 630:532

В.А. Усольцев, З.Я. Нагимов
 (Уральский лесотехнический институт),
 В.В. Деменев (Нижевартовский лесхоз),
 И.В. Мельникова
 (Уральский лесотехнический институт)

МЕТОДЫ И ТАБЛИЦЫ ОЦЕНКИ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ

На основании многолетних исследований впервые для лесов Урала разработаны три типа регрессионных моделей и таблиц учета надземной фитомассы деревьев сосны: по высоте и диаметру ствола, по диаметру и возрасту, по диаметру и радиальному приросту.

В связи с ухудшением качества окружающей среды и оскудением лесных ресурсов для лесной таксации все более насущной становится ее экологизация, включающая наряду с некоторыми специфическими направлениями также учет всех фракций фитомассы, в первую очередь надземной. Высокая трудоемкость учета фитомассы различных фракций дерева, несравнимая с традиционной стереометрической оценкой объема ствола, стимулирует поиск определенных инвариантных зависимостей на уровне ветвей 1-го порядка как составных элементов кроны.

Обычно устанавливались парные зависимости от диаметра ветви: а) количества листьев (*Cummings*, 1941), б) массы ветви и ее составных частей (Родионов, 1959; *Attwill*, 1962) либо для кроны в целом, либо с подразделением последней на отдельные секции (*Fiedler*, 1986). Однако при равных толщинах ветвей 1-го порядка у основания d_0 масса больше у ветви большей длины L , а при равных d_0 и L масса больше у ветви с большим диаметром охвоенной части $d_{ох}$, при равных d_0 , L и $d_{ох}$ масса ветвей зависит от рангового положения дерева в по-

логе, т.е. его диаметра на высоте груди D . Исходя из изложенного, для сомкнутых ельников П...1У классов возраста П класса бонитета в Предуральской предгорной провинции широколиственно-хвойных лесов в травяно-зеленомошниковом типе леса построены регрессионные модели (Тепикин, Усольцев, 1990):

для общей массы ветви

$$P = 0,0234d_o^{0,868} L^{1,153} d_{ox}^{0,480} D^{0,621}, \quad (1)$$

для массы ветви без хвои

$$P = 0,00094d_o^{0,605} L^{1,695} d_{ox}^{0,291} D^{0,480}, \quad (2)$$

для коры

$$P = 0,00161d_o^{0,531} L^{1,505} d_{ox}^{0,234} D^{0,370}, \quad (3)$$

где P – масса фракции в свежесрубленном состоянии, г. Все определяющие факторы приведены в сантиметрах и значимы на 5 %-ном уровне по Стьюденту. Уравнения позволяют определить массу фракций кроны в целом расчетным путем на основе линейных обмеров ветвей сваленного дерева.

С.Г. Рождественский с соавторами (1991) пошли по пути поиска методически корректных, но менее трудоемких способов оценки массы ветвей и крон в целом. Для каждой из трех мелколиственных пород (березы повислой, ольхи серой и осины) они рассмотрели приближенно инвариантные зависимости между сечением ствола дерева под кроной и суммой площадей сечений ветвей первого порядка, а также между названными показателями, использованными уже в качестве аргументов (независимых переменных), и массой ветвей и листьев в качестве функций (зависимых переменных). Достаточно высокие значения коэффициента детерминации для всех зависимостей позволили использовать первые для ориентировочной оценки фракций фитомассы крон древостоев названных пород (Гульбе и др., 1991).

Снижению трудоемкости учета надземной фитомассы лесов, а также накопление достаточного объема экспериментальных данных для объективной оценки ресурсных и средообразующих функций лесов в различных регионах страны служит переход от традиционной таксации лесов "снизу" на базе стереометрических методов к инвентаризации лесных ресурсов "сверху" дистанционными методами с использованием морфологических и спектральных характеристик лесного полога, связанных со структурой фитомассы. К тому же современные методы аэрокосмических съемок позволяют определять такие параметры деревьев, как высота, диаметр и площадь проекции крон с большей точностью, чем при наземных работах (Weaver, 1977; Синецкин, Сухих, 1979).

Использование дистанционных методов перспективно при инвентаризации пустынных саксауловых лесов, представляющих сообщества растительности открытой структуры (редколесья), при которой диаметр кроны куста обладает диагностической функцией, присущей диаметру на высоте груди в древостоях лесной зоны (Weaver, 1977). В условиях Чилийского и Казалинского лесхозов Кызыл-Ординской области Казахстана получены уравнения (Усольцев, 1988) для саксаула белого

$$P_o = 1,0812 D_{кр}^{1,9465} H^{0,7036}; R^2 = 0,854 \quad (4)$$

и для саксаула черного

$$P_o = 1,3032 D_{кр}^{1,6831} H^{1,0515}; R^2 = 0,841; \quad (5)$$

где P_o - общая фитомасса дерева, кг; $D_{кр}$ - диаметр кроны, м; H - высота, м. На основе (4) и (5) составлены таблицы с двумя входами - диаметром кроны и разрядом высоты, которые в сочетании с рядами распределения деревьев по ступеням диаметров крон использованы при устройстве саксаульников Чилийского лесхоза и на площади 100 тыс.га дали отклонение от данных наземной таксации по запасу 7 %.

В сомкнутых древостоях основных лесообразующих пород лесной зоны применение подобного подхода связано с известными трудностями. Тем не менее П.А. Коковин и З.Я. Нагимов (1990) для сосняков ягодникового типа леса в южно-таежной подзоне Среднего Урала на 6 пробных площадях в возрасте древостоев от 23 до 82 лет на основе крупномасштабных аэрофотоснимков вывели уравнение

$$P = 0,0164F^{-1,202} D_{кр}^{1,908} H^{2,119} N^{0,000145}; \quad (6)$$

$$R^2 = 0,883,$$

где F – код определяемой фракции фитомассы (1 – крона дерева, 2 – хвоя); N – густота древостоя, шт./га; $D_{кр}$ – диаметр горизонтальной проекции кроны дерева, м; H – высота дерева, м; P – масса фракции дерева в свежесрубленном состоянии, кг. Авторами установлено, что процентное соотношение деревьев, представляющих видимую часть полога, изменяется в пределах от 44 до 74 %, а доля основных компонентов фитомассы крон деревьев, потенциально видимых на аэрофотоснимках, находится в пределах от 92 до 96 %. Иными словами, доля хвои и древесной зелени деревьев скрытой части полога составляет в среднем около 5 %.

Ф.И. Плешиков и В.П. Черкашин (1988) в своих исследованиях исходили из того, что в характерном рисунке аэрофотоизображений отражается морфологическая структура древесного полога, которая несет в себе информацию о насыщенности пространства фитомассой. В сосняках Минусинских боров ими изучены возможности индикации запасов фитомассы насаждений (общий и в том числе стволов, крон и хвои) на основе автоматизированной обработки спектрально-зональных аэрофотоснимков масштаба 1:12000. В результате статистической обработки экспериментальных данных фитомассы (230 модельных деревьев на 20 пробных площадях) сформирована обучающая выборка из 120 пробных площадей. Нанесенные на снимки, последние были оцифрованы на специальной системе с двумя фильтрами, соот-

ветствующими красному и зеленому цвету. Однако точность оценки фитомассы не превысила 25...30 %. Авторы полагают, что для уменьшения ошибки определения фитомассы необходимо использование косвенных признаков дешифрирования и аппарата экспертных иерархических систем, базирующегося на дистанционной информации разных масштабных уровней.

Однако в настоящее время первоочередная задача лесной таксации состоит в составлении нормативов фитомассы основных лесообразующих пород, совместимых с принятой технологией лесоустроительных работ и полезных в производственной деятельности лесхозов. Для Урала подобных нормативов до последнего времени практически не было ни по одной породе. Нами предпринята попытка восполнить этот пробел, и мы составили нормативы фитомассы для двух основных пород – сосны и ели. В данной работе излагаются результаты исследований только по сосне.

Работы проведены в чистых высокополнотных сосняках южнотаежной подзоны Среднего Урала на 11 пробных площадях в древостоях I...УП классов возраста, П...У классов бонитета в типах леса сосняк ягодниковый, сосняк-брусничник и сосняк сфагновый. Взято 100 модельных деревьев, в том числе в сосняке ягодниковом – 69, со взвешиванием каждой фракции (хвоя, ветви, ствол) и переводом их на абсолютно сухое состояние термовесовым способом по взятым навескам (выпилам).

Для практических целей, а именно при лесоинвентаризационных работах и расчетах размера лесопользования с ориентацией на комплексное освоение лесов, необходимы упрощенные регрессионные уравнения и составленные на их основе таблицы фитомассы по образцу традиционных объемных или сортиментных таблиц. Опыт составления подобных таблиц для различных пород изложен в литературе (Токмураши, Байзаков, 1980; Усольцев, Усольцева, 1977; Семечкина, 1978; Биологическая продуктивность..., 1982; Baker et al., 1984; Grigal, Kernik, 1984; Harding, Grigal, 1985; Petras et al., 1985; Яновский, Моисеев, 1985; Зинченко, 1986), однако подходы авторов далеко неоднотипны.

Нами принят метод составления нормативов фитомассы на основе многомерного регрессионного моделирования. По всей совокупности экспериментальных данных компонентов фитомассы в абсолютно сухом состоянии получены регрессионные модели:

для общей массы стволов

$$P = \exp(-2,4289 + 2,0233 \ln D + 0,0927H - 0,0121H \ln D), R^2 = 0,991; \quad (7)$$

для массы древесины стволов

$$P = \exp(-2,9262 + 2,1683 \ln D + 0,1103H - 0,0178H \ln D), R^2 = 0,992; \quad (8)$$

для общей массы ветвей

$$P = \exp(-4,012 + 2,5097 \ln D + 0,2044H + 0,04583H \ln D), R^2 = 0,918; \quad (9)$$

для массы древесины ветвей

$$P = \exp(-4,7585 + 2,7236 \ln D - 0,2458H + 0,0539H \ln D), R^2 = 0,902; \quad (10)$$

для массы хвои

$$P = \exp(-3,1024 + 2,5207 \ln D - 1,0288 \ln H), R^2 = 0,906, \quad (11)$$

где P – масса фракции дерева, кг; D – диаметр дерева на высоте груди, см; H – высота дерева, м. Все константы приводимых уравнений здесь и далее достоверны на 5 %-ном уровне по Стьюденту.

Основу объемных и сортиментных таблиц составляет шкала разрядов высот, которая может быть аналитически представлена как функция

$$H = f(D, E), \quad (12)$$

где E – порядковый номер разряда высот. Зависимости (7) ... (11), с одной стороны, и (12) – с другой, образуют рекуррентную систему: зависимая переменная второй из них входит в (7)... (11) уже в ином качестве – в роли независимой переменной. Полученная система зависимостей может быть выражена схемой

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } P_i = f(H, D) \\ \uparrow \\ \text{II. } H = f(D, E) \end{array} \right\} \quad (13)$$

Уравнение (I) в системе (13) – основное, оно отражает зависимость фитомассы от определяющих факторов, а уравнение (II) – вспомогательное и служит в данном случае для совмещения таблицы фитомассы с сортиментной или объемной. Стрелка здесь и далее показывает последовательность оценки и табулирования уравнений. Если уравнение (I) действительно для всего аппроксимированного диапазона высот и диаметров независимо от соотношения последних, то уравнение (II) – лишь для одного соотношения высот и диаметров, соответствующего данной шкале разрядов высот, и таких шкал может быть несколько. Иными словами, уравнение (I) имеет более общий характер по сравнению со (II), а поскольку одному уравнению (I) может соответствовать несколько уравнений (II), то рекуррентная система всегда многовариантна. Это ее свойство имеет важный практический смысл: возможность стыковки уравнения (I) с любой шкалой разрядов высот с целью составления таблицы фитомассы.

Уравнения, подобные (I) и (II) в системе (13), называют взаимозависимыми (Четыркин, 1977) либо одновременными (Маленко, 1975, 1976; Джонстон, 1980; Ферстер, Ренц, 1983; Айвазян и др., 1985; *Borders*, 1989).

Обычно такие уравнения используются при изучении сложных (например, биологических) систем или объектов, поведение которых описывается совокупностью зависимостей, связывающих основные характеристики системы (Айвазян и др., 1985). Иными словами, рекуррентная система одно-временных уравнений характеризует некоторую исходную концепцию взаимосвязи явлений. Эта зависимость односторонняя, без обратных связей, с последовательной оценкой и табулированием уравнений. В эконометрии подобные системы применяются под названием рекурсивных (Четыркин, 1977; Ферстер, Ренц, 1983; Айвазян и др., 1985). Основное условие их идентифицируемости – общее число независимых и зависимых переменных (за вычетом повторов) – не должно быть меньше числа уравнений системы минус единица (Четыркин, Калихман, 1982). В нашей предыдущей работе (Усольцев, 1988) приведено около 20 примеров более сложных рекуррентных систем.

В нашем случае в качестве вспомогательной зависимости (12) принята шкала разрядов высот С.В. Соколова (Соколов, Лысов, 1989). При табулировании уравнений (7)... ..(11) масса коры стволов и ветвей в табл. 1 получена разностью соответствующих значений общей их массы и массы древесины. Система уравнений (13) явилась основой при составлении табл. 1.

Таблица 1

Надземная фитомасса деревьев сосны в абсолютно сухом состоянии, кг, по разрядам высот и диаметру на высоте груди

D, см	H, м	Ствол		Ветви		Хвоя	Итого
		всего	кора	всего	кора		

II разряд высот

8	14,8	16,1	1,8	0,7	0,3	0,5	17,3
12	19,8	46,7	3,8	1,5	0,7	1,1	49,3
16	23,1	95,0	6,7	3,2	1,4	1,9	100,1
20	25,4	159,8	11,2	6,0	2,5	3,1	168,9

Продолжение табл. 1

D, см	H, м	Ствол		Ветви		Хвоя	Итого
		всего	кора	всего	кора		
1	2	3	4	5	6	7	8
24	27,2	241,1	17,7	10,6	4,1	4,5	256,3
28	28,6	337,2	26,7	17,6	6,3	6,3	361,2
32	29,7	446,4	38,3	27,9	9,2	8,5	482,9
36	30,6	568,1	52,6	42,5	12,8	11,1	621,8
40	31,3	699,8	69,3	62,6	17,1	14,2	776,6
44	31,9	842,3	88,8	89,4	21,9	17,7	949,5
Ш разряд высот							
8	13,4	14,7	1,8	0,8	0,4	0,6	16,0
12	17,8	41,2	3,5	1,8	0,8	1,2	44,8
16	20,8	82,8	6,0	3,8	1,6	2,1	88,8
20	22,9	138,7	9,2	7,2	2,8	3,4	149,2
24	24,5	208,1	14,5	12,5	4,5	5,0	225,6
28	25,8	291,0	21,3	20,4	6,8	7,1	318,4
32	26,8	384,9	29,7	31,9	9,2	9,2	426,3
36	27,6	489,5	40,0	47,9	13,2	12,4	549,8
40	28,2	602,2	52,0	69,8	17,2	15,8	687,9
44	28,7	724,1	65,7	98,8	21,5	19,7	842,6
1У разряд высот							
8	12,0	13,3	1,7	0,9	0,4	0,7	14,9
12	16,0	36,8	3,3	2,2	0,9	1,4	40,3
16	18,7	73,1	5,4	4,5	1,8	2,4	80,0
20	20,6	121,7	8,2	8,2	3,1	3,8	133,8
24	22,1	182,6	12,2	14,3	4,9	5,6	202,5
28	23,2	253,7	17,1	23,3	7,2	7,9	284,9
32	24,1	335,3	23,2	36,1	10,1	10,6	382,0
36	24,8	425,9	30,5	53,7	13,4	13,8	493,4
40	25,4	525,9	39,2	77,1	17,1	17,6	620,6
44	25,8	631,3	48,7	108,1	20,9	22,0	761,4

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
У разряд высот							
8	10,8	12,3	1,6	1,0	0,4	0,7	14,1
12	14,4	33,3	3,1	2,5	1,0	1,5	37,3
16	16,8	65,3	5,0	5,2	2,0	2,7	73,2
20	18,6	108,6	7,3	9,2	3,3	4,2	122,4
24	19,9	161,9	10,3	16,3	5,1	6,2	184,5
28	20,9	224,7	14,0	26,3	7,5	9,2	259,8
32	21,7	296,6	18,4	40,2	10,3	11,8	348,7
36	22,3	376,1	23,6	59,3	13,4	15,4	450,9
40	22,8	463,6	29,5	84,6	16,7	19,7	567,9
44	23,3	560,9	36,6	116,9	20,0	24,5	702,2
У1 разряд высот							
8	9,7	11,4	1,6	1,2	0,5	0,8	13,4
12	13,0	30,5	3,0	2,8	1,1	1,7	35,0
16	15,1	59,0	4,6	5,9	2,1	3,0	67,9
20	16,7	97,5	6,5	10,9	3,5	4,7	113,1
24	17,9	145,2	9,2	18,4	5,4	7,0	170,5
28	18,8	201,2	11,5	29,3	7,7	9,2	240,2
32	19,5	265,1	14,7	44,5	10,4	13,2	322,7
36	20,1	337,2	18,4	64,8	13,3	17,2	419,2
40	20,6	416,8	22,6	91,4	16,2	21,8	530,1
44	20,9	500,7	26,9	125,9	18,9	27,4	654,0
УП разряд высот							
8	8,7	10,7	1,5	1,3	0,5	0,9	12,9
12	11,7	28,1	2,8	3,2	1,2	1,9	33,1
16	13,6	54,0	4,3	6,6	2,2	3,3	64,0
20	15,0	88,6	5,9	12,2	3,7	5,3	106,0
24	16,1	131,6	7,7	20,4	5,6	7,8	159,8
28	16,9	182,0	9,2	32,3	7,8	10,9	225,2
32	17,6	240,5	12,0	48,5	10,4	14,6	303,7
36	18,1	305,3	14,4	70,3	13,0	19,1	394,7
40	18,5	376,5	17,0	98,5	15,5	24,4	499,4
44	18,8	453,4	19,8	134,4	17,5	30,5	618,3

Продолжение табл. 1

D, см	H, м	Ствол		Ветви		Хвоя	Итого
		всего	кора	всего	кора		
УШ разряд высот							
8	7,9	10,1	1,5	1,4	0,6	1,0	12,5
12	10,5	26,0	2,7	3,6	1,3	2,1	31,7
16	12,3	50,0	4,0	7,3	2,4	3,7	61,0
20	13,5	81,3	5,3	13,5	3,9	5,9	100,7
24	14,5	120,6	6,8	22,4	5,7	9,2	151,7
28	15,2	166,4	8,2	35,3	7,9	12,2	213,8
32	15,8	219,4	9,2	52,7	10,2	16,3	288,4
IX разряд высот							
8	7,1	9,2	1,4	1,5	0,6	1,1	12,2
12	9,5	24,4	2,6	3,9	1,3	2,3	30,7
16	11,0	46,3	3,8	8,2	2,5	4,1	58,5
20	12,2	75,5	4,9	14,7	4,0	6,5	96,8
24	13,0	111,1	6,0	24,5	5,8	9,2	145,3
28	13,7	153,7	7,0	38,1	7,9	13,5	205,4

Табл. 1 вполне пригодна в качестве норматива для оценки надземной фитомассы деревьев сосны по фракциям. Однако известно, что масса кроны, а особенно масса хвои деревьев одного и того же диаметра, существенно снижается с возрастом. Например, показатели массы листвы у деревьев одного диаметра в древостоях П, Ш и IX классов возраста относятся у березы соответственно как 2,0:1,5:1,0 и у осины как 6:3:1 (Усольцев, 1972). Следовательно, чтобы табл. 1 давала надежную оценку массы хвои, дифференцированную по разрядам высот, для ее составления должны быть использованы древостои с минимальным возрастным диапазоном, например, только приспевающие и спелые, как это было соблюдено нами при составлении таблиц фитомассы березы и осины для Северного Казахстана (Усольцев, Усольцева, 1977).

Поэтому неслучайно стали получать распространение

двух-трехходовые регрессионные модели и соответствующие им таблицы, где одним из факторов служит возраст. Ф.Фидлер и Л.Вельке (*Fiedler, Welke, 1986*) установили зависимость надземной фитомассы от D^2H отдельно по трем возрастным группам в молодых еловых древостоях и для каждой составили двухходовую таблицу типа баварской. А.М. Кожевников с соавторами (1985) описывают изменчивость различных фракций фитомассы одной регрессионной моделью, включающей D^2H и возраст, а Н.И. Казимиров и А.Е. Митруков (1978) дополнительно вводят еще два фактора – среднюю высоту и относительную полноту древостоя. В.А. Усольцевым (1985) для березы и осины Северного Казахстана выведены многомерные зависимости массы листы дерева ($R^2 = 0,970$ и $0,953$ соответственно), ветвей ($R^2 = 0,980$ и $0,972$) и стволов ($R^2 = 0,992$ и $0,990$) от четырех факторов – возраста, диаметра, высоты дерева и относительной густоты – и составлены соответствующие трехходовые таблицы для относительной густоты 1,0, соответствующей числу стволов на 1 га для нормальных древостоев. Подобный подход применен и в настоящей работе при составлении таблиц надземной фитомассы сосны с привлечением возраста дерева в качестве одного из факторов. В итоге получена рекуррентная регрессионная система

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } P_i = f(A, D, H) \\ \uparrow \\ \text{II. } H = f(A, D, H_{100}) \end{array} \right\} \quad (14)$$

где P_i – масса i -й фракции дерева, кг; H_{100} – класс бонитета по шкале М.М. Орлова, выраженный высотой древостоя в 100-летнем возрасте. Уравнение (II) в системе (14) представляет модифицированную бонитетную шкалу М.М. Орлова как зависимость средней высоты $H_{\text{ср}}$ от возраста и класса бонитета нормальных древостоев $H_{\text{ср}} = f(A, H_{100})$, "развернутую" по ступеням толщины составляющих их деревьев. Коэффициенты детерминации уравнения (1) в (14) составили для стволов – 0,992, для ветвей – 0,923 и для хвои – 0,856

Уравнения системы (14) и составленные на ее основе таблицы фитомассы для П...У классов бонитета довольно громоздки и в настоящей работе не приводятся. Но для наиболее распространенного типа леса - сосняка ягодникового - представленного также наибольшим экспериментальным материалом, такие уравнения получены и имеют следующую характеристику (высота дерева в этом случае незначима, поскольку в однородных лесорастительных условиях дереву данного возраста и диаметра соответствует минимальный разброс высот):

для общей массы ствола

$$P = \exp(-3,0491 + 2,2306 \ln D + 0,2523 \ln A);$$

$$R^2 = 0,987; \quad (15)$$

для массы древесины ствола

$$P = \exp(-3,2449 + 2,3341 \ln D + 0,2105 \ln A);$$

$$R^2 = 0,989; \quad (16)$$

для общей массы ветвей

$$P = \exp(-4,4282 + 2,9068 \ln D - 0,4562 \ln A);$$

$$R^2 = 0,954; \quad (17)$$

для массы древесины ветвей

$$P = \exp(-5,5554 + 3,1895 \ln D - 0,4955 \ln A);$$

$$R^2 = 0,957; \quad (18)$$

для массы хвой

$$P = \exp(-2,6790 + 2,7993 \ln D - 0,9906 \ln A);$$

$$R^2 = 0,945. \quad (19)$$

Уравнение (19) свидетельствует о том, что в однородных лесорастительных условиях изменчивость массы хвои дерева объясняется двумя включенными факторами в высшей степени удовлетворительно. — на 95 % ($0,945 > 0,906 > 0,856$). Результаты табулирования уравнений (15)...(19) по заданным возрастам и ступеням толщины сведены в табл. 2, где масса коры стволов и ветвей получена разностью соответствующих значений общей их массы и массы древесины.

Как на практике, так и при теоретических исследованиях, зачастую необходимы нормативы не всей надземной фитомассы, а лишь ее ассимилирующей части (хвои) или массы кроны. Как было показано ранее (Усольцев, 1988), в этом случае нормативы могут быть получены при минимальном объеме экспериментальных работ и с достаточной точностью с использованием двух факторов — диаметра ствола и радиального прироста. Их совокупность с учетом высоты ствола дает в итоге объемный прирост, как известно, тесно связанный с массой ассимиляционного аппарата. Поскольку экспериментальный материал получен в однородных лесорастительных условиях — сосняке ягодниковом, то влияние высоты дерева оказалось недостоверным и уравнения имеют вид:

для массы ветвей

$$P = \exp(-5,1749 + 2,7519 \ln D + 0,0929 \ln D \ln Z);$$

$$R^2 = 0,962; \quad (20)$$

для массы хвои

$$P = \exp(-0,424 + 0,9509 \ln D + 1,1372 \ln Z -$$

$$-0,2633 \ln D \ln Z); R^2 = 0,931, \quad (21)$$

где Z — средняя ширина годовичного кольца на высоте груди за последние 5 лет, мм. В итоге табулирования уравнений (20) и (21) получена табл. 3.

Для сосняков Северного Казахстана были выведены урав-

Таблица 2
Надземная фитомасса деревьев сосны в абсолютно сухом
состоянии, кг, в сосняках ягодникового типа леса

А, лет	D, см	Стол		Ветви		Хвоя	Итого
		всего	кора	всего	кора		
I	2	3	4	5	6	7	8
20	4	2,2	0,6	0,2	0,1	0,2	2,6
	8	10,4	2,9	1,3	0,6	1,2	12,9
	12	25,8	7,1	4,2	1,7	3,7	33,7
	16	49,0	13,4	9,0	3,5	9,0	66,9
40	4	2,6	0,8	0,1	0,1	0,1	2,9
	8	12,4	3,7	0,9	0,5	0,6	14,0
	12	30,7	9,0	3,0	1,3	1,9	35,6
	16	58,3	17,2	7,0	2,7	4,2	69,5
	20	96,0	28,3	13,4	4,6	7,8	117,2
	24	144,1	42,6	22,8	7,0	13,0	179,9
60	28	203,2	60,0	35,7	9,0	20,0	258,9
	8	13,8	4,2	0,8	0,4	0,4	14,9
	12	34,0	10,4	2,5	1,1	1,2	37,8
	16	64,6	19,8	5,8	2,3	2,8	73,2
	20	106,3	32,6	11,2	3,9	5,2	122,7
	24	159,6	49,0	19,0	6,0	9,0	187,3
	28	225,1	69,2	29,7	9,0	13,4	268,2
	32	303,3	93,1	43,7	11,3	19,4	366,4
80	36	394,4	121,1	61,6	14,3	27,0	483,0
	8	14,8	4,7	0,7	0,3	0,3	15,8
	12	36,6	11,5	2,2	1,0	0,9	39,7
	16	69,5	21,9	5,1	2,0	2,1	76,7
	20	114,3	36,1	9,0	3,5	3,9	128,0
	24	171,6	54,1	16,6	5,4	6,5	194,8
	28	242,1	76,4	26,0	7,6	10,1	278,2
	32	326,1	102,9	38,4	10,2	14,6	379,1
	36	424,1	133,8	54,0	13,0	20,3	498,4
	40	536,4	169,2	73,4	16,0	27,3	637,1
	44	663,5	209,3	96,8	19,1	35,6	795,9
	48	805,6	254,1	124,7	22,1	45,5	975,7

Окончание табл.2

I	2	3	4	5	6	7	8
I00	I2	38,7	12,5	2,0	0,9	0,8	41,4
	I6	73,5	23,7	4,6	1,9	1,7	79,8
	20	I20,9	38,9	9,0	3,2	3,1	I32,9
	24	I81,6	58,4	I5,0	4,9	5,2	201,8
	28	256,1	82,4	23,5	7,0	9,0	287,7
	32	345,0	III,0	34,6	9,0	II,7	391,3
	36	448,6	II4,4	48,8	I2,1	I6,3	513,7
	40	567,5	I82,6	66,3	I4,9	2I,9	655,6
	44	701,9	225,9	87,4	I7,9	28,6	817,9
	48	852,3	274,2	II2,6	20,8	36,4	I001,3
	52	I018,8	327,9	I42,1	23,5	45,6	I206,5
	56	I202,0	386,8	I76,2	26,1	56,1	I434,3
I20	I2	40,5	I3,2	I,8	0,8	0,6	43,0
	I6	77,0	25,2	4,3	I,7	I,4	82,6
	20	I26,6	41,4	9,0	3,0	2,6	I37,4
	24	I90,1	62,2	I3,8	4,6	4,4	208,3
	28	268,2	87,7	2I,6	6,6	6,7	296,5
	32	361,2	II8,1	3I,9	9,0	9,0	402,9
	36	469,7	I53,6	44,9	II,4	I3,6	528,2
	40	594,2	I94,3	6I,0	I4,1	I8,3	673,4
	44	734,9	240,3	80,4	I6,9	23,8	839,2
	48	892,4	29I,8	I03,6	I9,7	30,4	I026,4
	52	I066,8	348,8	I30,7	22,4	38,1	I235,6
	56	I258,6	4II,5	I62,2	25,0	46,8	I467,6
I40	I6	80,0	26,5	4,0	I,6	I,2	85,2
	20	I31,6	43,6	7,6	2,8	2,3	I41,5
	24	I97,7	65,5	I2,9	4,4	3,8	2I4,3
	28	278,8	92,4	20,2	6,2	5,8	304,7
	32	375,5	I24,4	29,7	9,0	9,0	4I3,6
	36	488,4	I61,8	4I,8	I0,8	II,7	541,9
	40	617,8	204,6	56,8	I3,4	I5,7	690,3
	44	764,1	253,1	75,0	I6,1	20,5	859,5
	48	927,8	307,3	96,6	I8,8	26,1	I050,4
	52	II09,1	367,4	I2I,9	2I,5	32,7	I263,7
	56	I308,5	433,4	I51,2	24,1	40,2	I499,8
	60	I526,2	505,6	I84,7	26,4	48,8	I759,7

Таблица 3

Фитомасса кроны в сосняках ягодниковых в зависимости от диаметра стволов и средней ширины годичного кольца на высоте груди за последние 5 лет (числитель - общая масса, знаменатель - в том числе хвоя)

D, см	Фитомасса, кг на 1 дерево, при средней ширине годичного кольца, см																		
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16			
8	0,3	0,5	1,3	1,5	0,6	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	1,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8
12	2,6	3,2	3,6	4,0	4,3	4,0	4,3	4,5	4,8	5,0	5,2	5,2	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3
16	5,0	6,1	6,9	7,5	8,1	8,6	8,6	9,0	9,3	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	11,1	11,4	11,4	11,6	11,6
20	8,2	10,1	11,4	12,5	13,3	14,1	14,7	15,3	15,9	16,4	16,9	17,3	17,7	18,1	18,5	18,5	18,9	18,9	18,9
24	12,5	15,4	17,3	18,9	20,1	21,3	22,3	23,2	24,0	24,7	25,5	26,1	26,7	27,3	27,9	28,4	28,4	28,4	28,4
28	17,8	21,8	24,6	26,8	28,6	30,2	31,7	32,9	34,1	35,2	36,2	37,2	38,0	38,9	39,7	40,5	40,5	40,5	40,5
32	24,1	29,6	33,4	36,4	38,9	41,1	43,0	44,8	46,4	47,9	49,3	50,6	51,8	53,0	54,1	55,2	55,2	55,2	55,2
36	31,5	38,8	43,8	47,8	51,1	54,0	56,6	58,9	61,1	63,1	64,9	66,7	68,3	69,9	71,4	72,8	72,8	72,8	72,8
40	40,1	49,4	55,8	60,9	65,2	69,0	72,3	75,4	78,2	80,8	83,2	85,5	87,6	89,7	91,6	93,5	93,5	93,5	93,5
44	49,8	61,4	69,5	76,0	81,4	86,2	90,4	94,3	97,9	101,2	104,3	107,2	109,9	112,5	115,0	117,4	117,4	117,4	117,4

нения (Усольцев, 1988), по своим характеристикам существенно отличающиеся от (20) и (21):

для массы ветвей

$$P = \exp(-4,2087 + 2,1497 \ln D + 0,5576 \ln D \ln z);$$

$$R^2 = 0,912;$$
(22)

для массы хвои

$$P = \exp(-3,0608 + 1,5919 \ln D + 0,4793 \ln z +$$

$$+ 0,2897 \ln D \ln z);$$

$$R^2 = 0,912.$$
(23)

Названные различия в уравнениях создают предпосылки для исследования географических закономерностей интенсивности работы ассимиляционного аппарата сосны.

Итак, актуальность совершенствования методов учета и прогнозирования лесных ресурсов на основе применения математических методов очевидна. Предложенные в работе подходы к моделированию структуры и динамики фитомассы деревьев и результаты этого моделирования, представленные в виде таблиц учета фитомассы, могут быть полезны в современном лесоустройстве и в перспективном планировании комплексного освоения лесов, при котором в оптимальных соотношениях будут реализованы все "весомые" и "невесомые" полезности лесных насаждений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Аввазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М., 1985. 487 с.

Биологическая продуктивность лесов Поволжья/ Под ред. С.Э. Вомперского. М., 1982. 282 с.

Гульбе Т.А. и др. Опыт оценки массы крон мелколиственных древостоев по параметрам ветвей и ствола//Лесоведение. 1991. № 2. С. 48-58.

Джонстон Дж. Эконометрические методы. М., 1980. 446 с.

Зинченко В.Ф. Исследование способов учета, запасов и кормовой ценности фитомассы крон осинников и березняков Ленинградской области: Автореф. дис...канд. с.-х. наук. Брянск, 1986. 21 с.

Казимиров Н.И., Митруков А.Е. Изменчивость и математическая модель фитомассы: сосновых деревьев и древостоев//Формирование и продуктивность сосновых насаждений Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск, 1978. С. 142-148.

Кожевников А.М., Ефименко В.М., Решетников В.Ф. Модели роста надземной фитомассы полных и оптимально изреживаемых еловых культур//Закономерности роста и производительности древостоев: Тез. докл. Каунас, 1985. С. 221-223.

Кожовин П.А., Нагимов З.Я. Структура фитомассы крон полога сосняка ягодникового//Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1990. С. 63-67.

Маленко Э. Статистические методы в эконометрии. М., 1975. Вып. 1. 422 с.; 1976. Вып. 2, 325 с.

Плешиков Ф.И., Черкашин В.П. Опыт оценки биомассы сосновых насаждений дистанционными методами//Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов зоны интенсивного ведения лесного хозяйства: Тез. докл. Львов, 1988. С. 84-86.

Родионов М.С. Об определении массы листвы защитных лесополос//Бот. журнал, 1959. Т. 44, № 3. С. 333-337.

Рождественский С.Г. и др. Инвариантные продукционно-морфологические характеристики крон деревьев трех мелколиственных пород//Лесоведение. 1991. № 1. С. 31-41.

Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск, 1978. 166 с.

Синицын С.Г., Сухих В.И. Использование материалов многозональных и космических съемок в интересах лесного хозяйства//Аэрокосмические исследования Земли. М., 1979. С. 86-101.

Соколов С.В., Лысов Л.А. Методические указания по лесной таксации для самостоятельной работы, лабораторно-практических занятий и учебной практики студентов специальностей 3112, 0704, 2601 очной и заочной форм обучения. Свердловск, 1989. С. 38.

Тепикин С.В., Усольцев В.А. Зависимость массы ветвей от их морфометрических показателей как основа оценки фитомассы деревьев ели // Ботанические исследования на Урале: Тез. докл. Свердловск, 1990. С. 105.

Токмурзин Т.Х., Байзаков С.Б. Рекомендации по таксации надземной массы и освоению древесной зелени сосновых и еловых лесов Казахстана. Алма-Ата, 1970. 63 с.

Усольцев В.А. Вес кроны березы и осины в насаждениях Северного Казахстана // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1972. № 4. С. 77-80.

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск, 1985. 191 с.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск, 1988. 253 с.

Усольцев В.А., Усольцева Р.Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы березы и осины по диаметру и высоте ствола // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1977. № 7. С. 83-89.

Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М., 1983. 302 с.

Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М., 1977. 200 с.

Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М., 1982. 319 с.

Яновский Л.Н., Мойсеев В.С. Лесная таксация: Метод. указ. по учету древесн. зелени. Л., 1985. 39 с.

Attiwill P.M. Estimating branch dry weight and leaf area from measurements of branch girth in *Eucalyptus* // Forest Sci. 1962. Vol.8. N 2. P.132-141.

Baker T.G., Attiwill P.M., Stewart H.T.L. Biomass equations for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria // N.Z.J.Forest Sci. 1984. Vol.14. N 1. P.89-96.

Borders B.E. Systems of equations in forest stand modelling // Forest Sci. 1989. Vol.35. N 2. P.548-556.

Cummings W.H. A method for sampling the foliage of a silver maple tree // J.Forestry. 1941. N 39. P.382-384.

Fiedler F. Die Dendromasse eines hiebsreifen Fichtenbestandes // Beitr. Forstwirtschaft. 1986. H.20. N 4. S.171-180.

Fiedler F., Welke L. Vorläufige Schätztabellen zur Dendromassbestimmung in jungen Fichtenbeständen // Soz. Forstwirtschaft. 1986. N 2. S.55-56.

Grigal D.F., Kernik L.K. Generality of black spruce biomass estimation equations // *Canad. J. Forest Res.* 1984. Vol.14. N 3. P.468-470.

Harding R.B., Grigal D.F. Individual tree biomass estimation equations for plantation-grown white spruce in northern Minnesota // *Canad. J. Forest Res.* 1985. Vol.15. N 4. P.738-739.

Petraš R., Košut M., Ozslanyi J. Listova biomasa stromov smreka, borovice a buca // *Lesn. čas.* 1985. Vol.31. N 2. S.121-136.

Weaver T. Area-mass relationships for common montana shrubs // *Proc. Mont. Acad. Sci.* 1977 (1978). Vol.37. P.54-58.

УДК 630:532

В.А. Усольцев, С.В. Тепикин, В.М. Ваганов
(Уральский лесотехнический институт)

СТРУКТУРА НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ В ЕЛЬНИКАХ СРЕДНЕГО УРАЛА

Впервые для еловых древостоев Урала приведены результаты исследований структуры надземной фитомассы деревьев. Предложены производству таблицы учета массы ветвей, крон и деревьев в целом по их дендрометрическим показателям.

Лесное насаждение как элемент биосферы представляет собой сложную динамическую систему, и единственным объективным подходом к исследованию его структуры и динамики с учетом нарастающего антропогенного воздействия на биосферу и необходимости создания устойчивых экологических комплексов является системный анализ с применением аппарата математического моделирования. Исходными данными при любом виде моделирования с целью изучения эко-