

Schlaepfer R. (ed). Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. Progress report of the IUFRO Task Force "Forest, Climate Change and Air Pollution". Vienna, IUFRO; Birmensdorf, WSL. IUFRO World Series, 1993. Vol. 4. 133 p.

Shinozaki K. and other A quantitative analysis of plant form the pipe model theory // Jap. J. Ecol. 1964. Vol. 14. № 3. 1: Basic analysis. P. 97-105; № 4. 2: Further evidence of the theory and its application in forest ecology. P. 133-139.

Yamaoka Y. Measurement of the total transpiration from a forest // Bull. Govern. Forest. Exper. Station. 1952. Vol. 54. P.187-206.

Yamaoka Y. The total transpiration from a forest // Trans. Amer. Geophys. Union. 1958. Vol. 39. P.266-272.

УДК 630:532

**З.Я. Нагимов, И.С. Сальникова**

**(Уральская государственная лесотехническая академия)**

## **РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННЫХ НОРМАТИВОВ ОЦЕНКИ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ**

*На основе обширного экспериментального материала с использованием многомерного регрессионного моделирования обоснован метод совмещения данных по надземной фитомассе деревьев с применяемыми на производстве таблицами объемов стволов.*

Актуальность учета всех компонентов фитомассы древостоя с повышением роли экологических, социальных и сырьевых функций леса стимулирует изыскание рациональных путей разработки нормативных материалов для определения и прогнозирования фракционных и суммарных запасов фитомассы. Для лесохозяйственного производства, ориентированного на комплексное использование всех видов древесного сырья, необходимы нормативы для оценки фитомассы деревьев, обеспечивающие достаточную точность и предельно простые в построении и использовании. В нашей стране при оценке запаса древостоев такими нормативами являются таблицы объемов стволов, составленные по разрядам высот. Теоретической основой их является

положение о том, «что древостон, средние деревья которых имеют одни и те же таксационные признаки ( $g$ ,  $h$  и  $f$ ), характеризуются одинаковыми средними объемами для отдельных ступеней толщины независимо от возраста, полноты, бонитета и других признаков самих древостоев» (Горский, 1962). По одному разряду высот возможна оценка древостоев разного возраста и густоты, произрастающих в различных лесорастительных условиях, так как их средние диаметры и высоты могут быть одинаковыми. Факт, что в этих древостоях объемы стволов по ступеням толщины будут одинаковыми, на наш взгляд, не является бесспорным. Однако в настоящее время нормативы, составленные по разрядам высот (таблицы объемов стволов, сортиментные таблицы и др.), вследствие предельной простоты в применении и обеспечения достаточной точности при таксации общего запаса больших множеств деревьев пользуются большой популярностью.

При разработке таблиц объемов опираются на огромный экспериментальный материал, несоизмеримый с данными по фитомассе. Поэтому полученные и использованные при составлении таблиц закономерности в соотношении и варьировании средних диаметров и высот, а также в изменении средних видовых чисел и коэффициентов формы могут служить надежным отправным моментом при разработке нормативов по оценке фитомассы деревьев. Не случайно многие исследователи считают правильным не составление самостоятельных двуххвостовых таблиц фитомассы деревьев по образцу обычных, а увязку данных по фитомассе с применяемыми на производстве таблицами объемов стволов (Токмурзин, Байзаков, 1969; Яновский, 1975; Усольцев, 1985; Соколов и др., 1994). Методически этот вопрос может быть решен по-разному.

В.И.Алексеев, А.И.Уткин (1982) при составлении таблиц массы фракций деревьев по разрядам высот данные о массе стволов, ветвей, хвои, корней наносили на графики высот в координатах диаметра и высоты. Затем данные по фитомассе отдельно по разрядам высот выравнивали в зависимости от диаметра.

На наш взгляд, увязку данных фитомассы с таблицами объемов проще и обоснованней можно провести на основе системы взаимозависимых уравнений. Здесь можно предложить два подхода.

В первом, в регрессионных моделях фитомассы в качестве независимых переменных используются только входы в таблицы объемов (диаметр и высота стволов). Данный подход подробно изложен в работе В.А.Усольцева (1985) и реализован нами в сосняках Среднего Урала (Усольцев и др., 1993).

В вышеназванных работах упускается из виду один существенный момент. Уравнения зависимости фитомассы в первом методе - от диаметра, во втором - от диаметра и высоты получены на совершенно другом, значительно меньшем по объему экспериментальном материале, нежели объемы стволов в таблицах. Если бы при разработке этих уравнений использовались те же модельные деревья, что и при составлении таблиц объемов, то коэффициенты уравнений скорее всего были бы другими. В этом случае трудно говорить о хорошем соответствии данных фитомассы с табличными значениями объемов стволов, к которому мы должны стремиться.

Поэтому предлагается другой подход к стыковке компонентов фитомассы деревьев с таблицами объемов стволов. Он заключается в использовании при разработке подобных уравнений объема стволов в качестве независимой переменной. Данный показатель у модельных деревьев, как правило, определяется при любых лесоводственно-таксационных исследованиях, поэтому нет оснований говорить об усложнении процедуры составления нормативов. К тому же объем ствола - это наиболее информативный показатель при оценке всех компонентов надземной фитомассы деревьев. Непопулярность его при разработке различного рода моделей объясняется только тем, что он не поддается непосредственному измерению.

Информативность объема стволов может быть достаточной при оценке их массы, так как между этими показателями существует почти функциональная связь. Однако даже в этом случае мы в праве ожидать наличие остаточной дисперсии, которая, главным образом, будет объясняться разной плотностью древесины стволов у деревьев одинакового объема из насаждений различных условий местопрорастания, возраста и густоты.

При оценке массы крон и их структурных частей информативность объема стволов совершенно недостаточна с общебиологических

и экологических позиций. Деревья одной ступени толщины, характеризующиеся одинаковым объемом в отдельно взятых древостоях, могут иметь разное ранговое положение (относиться к различным классам роста и развития): при одинаковом возрасте ранг их возрастает от высших классов бонитета к низшим, в насаждениях одного класса бонитета - с уменьшением возраста древостоев, а в насаждениях одного класса бонитета и возраста - с увеличением полноты (густоты). Положение дерева в древостое оказывает существенное влияние на развитие крон. Вследствие этого при прочих равных условиях у деревьев одинаковых размеров масса крон резко уменьшается с увеличением возраста, заметно снижается с улучшением условий местопроизрастания и повышением густоты древостоя (Луганский, Нагимов, 1994).

По данным ряда исследований, положение дерева в древостое, его угнетенность хорошо характеризуются отношением диаметра ствола к высоте  $d:h$  (Abetz, 1976; Erteld, 1979; Юкнис, 1983 и др.). Наименьшее значение этого показателя наблюдается у сухостойных и отмирающих деревьев. Поэтому в регрессионных моделях, разрабатываемых для привязки данных фитомассы с таблицами объемов стволов, в качестве одной из переменных целесообразно использовать показатель  $d:h$ . Тем более, что диаметр и высота стволов являются входными в таблицы объемов.

Анализ применяемых на Среднем Урале таблиц объемов стволов (Гальперин, Соколов, 1971; Верхунов и др., 1996) с привлечением собственных экспериментальных материалов показал, что разрядные шкалы высот достаточно точно отражают особенности соотношений средних высот и диаметров, связанных с условиями местопроизрастания и изменением густоты насаждения: при одинаковом возрасте древостоев разряд высот повышается с улучшением лесорастительных условий (от V класса бонитета к I), а при одинаковом возрасте и классе бонитета - с увеличением густоты.

Анализ сортиментных таблиц для горного Урала (Верхунов и др., 1996) показал, что одного и того же объема деревья в древостоях низших разрядов высот достигают при значительно больших значениях показателя  $d:h$ , чем в древостоях высших разрядов. Причем деревья одинакового объема, произрастающие в древостоях различных разря-

дов высот, по показателю  $d:h$  различаются в значительно большей степени, чем по диаметру. Это позволяет предположить, что отношение  $d:h$  более устойчиво отражает ранговое положение деревьев одного и того же объема, произрастающих в различных древостоях.

Таким образом, в конструктивных особенностях таблиц объемов в определенной мере отражается различие в ранговом положении деревьев, связанное с эколого-ценотическими условиями роста. Использование наряду с объемом показателя  $d:h$  стволов в качестве независимой переменной в уравнениях, отражающих изменение различных компонентов надземной фитомассы деревьев, оправдано как с общебиологических позиций, так и с позиций простоты составления и применения нормативов на производстве.

На практике таблицами объемов пользуются для выявления общих запасов не только в спелых и перестойных насаждениях, но и в приспевающих, средневозрастных и даже в молодняках (при промежуточном пользовании лесом). При этом в один разряд высот могут попасть древостои одного класса бонитета, но различного возраста, имеющие разные значения средних диаметров и высот. Если учесть, что масса крон деревьев одних и тех же размеров существенно снижается с возрастом, то становится очевидным, что информативность только объема и показателя  $d:h$  в моделях, предназначенных для стыковки фитомассы крон с таблицами объемов, может быть недостаточна. Другими словами, возраст и эколого-ценотические характеристики местопроизрастания не могут быть в полной мере опосредованы лишь объемом и показателем  $d:h$ . Поэтому для того, чтобы в разработанных нормативах достаточно полно нашли отражения природные закономерности накопления фитомассы крон, необходимо данные исследования проводить с учетом возраста деревьев. Причем возраст может быть учтен как введением этого показателя в регрессионные уравнения наряду с объемом и показателем  $d:h$ , так и использованием для составления нормативов древостоев с минимальным возрастным диапазоном. В обоих случаях для каждого разряда высот предполагается получение нескольких вариантов изменения фитомассы по ступеням толщины в зависимости от возраста древостоев.

Таким образом, стремление к унификации данных фитомассы с существующими таблицами объемов в соответствии с природными закономерностями накопления массы различных компонентов деревьев диктует использовать при аналитических расчетах в качестве независимых переменных объем, возраст и показатель  $d:h$  деревьев. При таком положении, когда определяющие факторы уже известны, для выбора наилучшего уравнения регрессии лучше других подходит метод исключения (Никитин, Швиденко, 1978). Для каждого компонента фитомассы испытана следующая модель, приведенная логарифмированием к линейному виду:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D:H) + a_2 \ln V + a_3 \ln A + a_4 \ln(D:H) \ln V + a_5 \ln A \ln V + a_6 \ln A \ln(D:H). \quad (1)$$

Исключение переменных, мало влияющих на изменение результирующего признака, проводилось по значениям  $t$ -критериев Стьюдента. В качестве критического принималось значение этого показателя при уровне значимости 0,05 и соответствующем числе степеней свободы.

Объектом исследований явились сосняки I-V классов бонитета в подзонах южной и средней тайги Среднего Урала. Экспериментальным материалом послужили 70 пробных площадей с насаждениями в возрасте от 15 до 140 лет, с долей участия сосны в составе 80-100%, с относительной полнотой 0,6 и выше. На пробных площадях у 665 модельных деревьев, кроме общепринятых таксационных показателей, определена надземная фитомасса по компонентам: ствол, крона, хвоя, древесная зелень, отмершие ветви и генеративные органы. Фитомасса исследовалась в свежесрубленном состоянии.

Результаты статистических процедур показали, что изменчивость массы стволов в коре и без коры практически полностью объясняется их объемом. Показатель  $D:H$ , а также синергизмы  $\ln(D:H) \ln V$  и  $\ln A \ln(D:H)$  на фоне объема ствола при уровне значимости 0,05 оказались незначимыми. Возраст дерева хотя и значим, однако значение  $t$ -критерия этой переменной ( $t=3,04$  и  $t=2,86$ ) немногим отличается от критического, а коэффициент детерминации при включении его в уравнение наряду с объемом увеличивается только на 0,001. Причем при оценке массы древесины стволов лучшие результаты

обеспечиваются при использовании в уравнениях в качестве независимой переменной объема стволов без коры.

$$\ln P_{\text{ст}} = 6,6500 + 0,9742 \ln V; \quad R^2 = 0,995; \quad (2)$$

$$\ln P_{\text{др.ст}} = 6,6884 + 0,9706 \ln V_{\text{БК}}; \quad R^2 = 0,995; \quad (3)$$

$$\ln P_{\text{ст}} = 6,8837 + 0,9854 \ln V - 0,0507 \ln A; \quad R^2 = 0,996; \quad (4)$$

$$\ln P_{\text{др.ст}} = 7,2070 + 0,9950 \ln V_{\text{БК}} - 0,113 \ln A; \quad R^2 = 0,996; \quad (5)$$

где  $P_{\text{ст}}$  - масса стволов в коре, кг;  $P_{\text{др.ст}}$  - масса древесины ствола, кг;  $V$  - объем стволов,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{БК}}$  - объем стволов без коры,  $\text{м}^3$ ;  $A$  - возраст деревьев, лет.

Таким образом, при известном объеме влияние показателя  $D:H$  и возраста деревьев на массу стволов можно считать незначительным. Поэтому для стыковки массы стволов в коре и без коры с таблицами объемов вполне приемлемы соответственно уравнения (2) и (3). В таком случае каждый разряд высот будет характеризоваться одним конкретным вариантом изменения фитомассы стволов в зависимости от ступеней толщины. Следует заметить, что при исследовании зависимости между массой и объемом стволов нет необходимости в логарифмировании исходных данных, так как она прямолинейна и в арифметическом масштабе. Известно, что использование логарифмических уравнений ведет к определенной недооценке получаемых характеристик продуктивности древостоев (Уткин, 1982). Поэтому для оценки массы стволов нами рассчитаны уравнения без преобразований:

$$P_{\text{ст}} = 10,79897 + 691,7242V; \quad R^2 = 0,987; \quad (6)$$

$$P_{\text{др.ст}} = 13,68255 + 707,6542V_{\text{БК}}; \quad R^2 = 0,984. \quad (7)$$

В отношении массы кроны и их структурных частей получены совершенно иные результаты. Во-первых, все три показателя ( $V$ ,  $D:H$ ,  $A$ ) оказались значимыми на уровне 0,05, во-вторых, детерминированность полученных трехфакторных уравнений оказалась ниже, чем уравнений (6) и (7) с одним определяющим фактором. Синергизмы  $\ln(D:H)\ln V$ ,  $\ln A \ln V$  и  $\ln A \ln(D:H)$  в процессе статистической обработки были исключены из моделей, как не обеспечивающие существенного повышения их точности. Это позволило не только заметно упростить регрессионные уравнения, но и выяснить действительный характер влияния сохраненных переменных на результирующий признак. По-

сле исключения синергизмов получена следующая структура трехфакторной модели:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D:H) + a_2 \ln V + a_3 \ln A. \quad (8)$$

Характеристика регрессионных уравнений по оценке фитомассы кроны и их структурных частей, разработанная согласно структуре модели (8), приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика уравнения (8)

Компонент фитомассы	Коэффициенты (числитель) и значения t-критериев (знаменатель)				R <sup>2</sup>
	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	
Крона	5,7662	<u>1,7561</u> 25,10	<u>0,7440</u> 43,00	<u>-0,3278</u> 6,93	0,963
Хвоя	5,8656	<u>1,5499</u> 18,01	<u>0,7302</u> 34,10	<u>-0,6223</u> 11,04	0,933
Древесная зелень	6,1531	<u>1,5335</u> 14,00	<u>0,7152</u> 27,21	<u>-0,6267</u> 9,48	0,951
Генеративные органы	-0,1875	<u>2,4195</u> 3,93	<u>0,5926</u> 3,45	<u>-0,1438</u> 2,87	0,471
Отмершие ветви	3,401	<u>0,8720</u> 5,08	<u>0,7321</u> 17,36	<u>-0,3510</u> 3,07	0,787

Разработанные трехфакторные уравнения обеспечивают достаточно высокую точность при оценке массы кроны в целом, хвои и древесной зелени (см. табл. 1). Доля объясненной изменчивости этих компонентов составляет соответственно 96,3, 93,3 и 95,1%. Для отмерших ветвей и особенно для генеративных органов результаты получились значительно хуже. Так, показатели D:H, V и A вместе объясняют только 78,7% изменчивости массы отмерших ветвей и 47,1% массы генеративных органов. Это свидетельствует о наличии достаточно существенных неучтенных факторов. На наш взгляд, при оценке отмерших ветвей одним из таких факторов является точность учета данного компонента при полевой обработке модельных деревьев. При валке деревьев отмершие ветви подвержены большим потерям, чем любой другой компонент фитомассы. Среди неучтенных факторов



при оценке генеративных органов следует отметить наличие периодичности в семеношении сосны. Однако, учитывая специфику данных исследований, повысить детерминированность разработанных уравнений не представляется возможным.

При помощи разработанных уравнений можно состыковать данные различных компонентов фитомассы деревьев с применяемыми на производстве таблицами объемов стволов. Для этого производится табулирование уравнений с использованием показателя D:H и объемов, взятых из таблиц соответствующих разрядов высот. При стыковке данных фитомассы крон и их структурных частей процедура табуляции повторяется в зависимости от принятых возрастных интервалов. Если дифференцировать данные фитомассы по классам возраста, то в уравнениях следует применять значение возраста, соответствующее середине класса. Однако такая дифференциация сделает нормативы слишком громоздкими. Поэтому для практических целей, на наш взгляд, достаточно иметь нормативы по трем возрастным группам: 1) молодняки; 2) средневозрастные; 3) приспевающие и спелые. Принимая во внимание наиболее широко используемое в регионе деление насаждений на группы возраста, мы при табулировании уравнений в качестве средних значений возраста брали 30, 60 и 100 лет.

Разработанные с учетом вышеизложенного таблицы довольно громоздки для помещения их в данной статье, поэтому мы ограничились лишь их анализом. Он показал, что относительные различия фитомассы стволов по ступеням толщины в пределах одного разряда высот, а также одноименных ступеней толщины разных разрядов высот примерно такие же, как и различия табличных значений объемов. Это свидетельствует о высокой сопряженности объемных и весовых показателей стволов в таблицах. Масса крон и их структурных частей у деревьев одинаковой толщины закономерно возрастает от высших разрядов высот к низшим, а в пределах одного разряда высот - с уменьшением возраста древостоев. Таким образом, полученные результаты адекватны природным закономерностям накопления фитомассы различных компонентов надземной части деревьев.

Для проверки точности разработанных нормативов использовались материалы пробных площадей, для которых запасы фитомассы

были определены по модельным деревьям графическим способом. Были отобраны 29 пробных площадей, на которых средний возраст древостоев отличался не более чем на 10 лет от значений возраста, использованных в уравнениях при табуляции. После определения разряда высот для каждого древостоя по соответствующим таблицам определялись запасы фитомассы стволов, крон, хвои и древесной зелени. Затем вычислялись отклонения запасов по общепринятой методике. Результаты данных исследований приведены в табл.2.

Таблица 2

Отклонения запасов, вычисленных по таблицам и модельным деревьям

Компонент фитомассы	Отклонения табличных данных от модельных деревьев, %							
	свыше -15	от -10 до -15	от -5 до 10	до -5	до +5	от 5 до 10	от 10 до 15	свыше 15
Ствол в коре	-	1	3	10	11	4	-	-
Крона	-	1	5	8	7	6	2	-
Хвоя	2	2	4	6	6	5	3	1
Древесная зелень	1	1	4	8	7	5	2	1

Данные табл.2 свидетельствуют, что разработанные нормативы обеспечивают лучшие результаты при оценке массы стволов. Так, из 29 случаев только в 5 отклонения запасов фитомассы превысили  $\pm 5\%$ . Наибольшие отклонения наблюдаются при определении запасов хвои. Здесь в трех случаях они превысили  $\pm 15\%$ . Это вполне объяснимо, так как масса хвои в древостоях более изменчива, чем масса других приведенных в табл.2 компонентов фитомассы.

Ошибки определения запасов фитомассы по данным тех же 29 пробных площадей приведены в табл.3.

Разработанные нормативы практически не дают систематических ошибок. Ошибка отдельных наблюдений наиболее высока при оценке запасов хвои. Но даже для этого компонента в 2/3 случаев средне-

квадратические ошибки не выходят за пределы  $\pm 15\%$ . Общие ошибки для 29 случаев по всем рассматриваемым компонентам фитомассы оказались незначительными.

Таблица 3

Ошибки при определении запасов различных компонентов фитомассы

Компонент фитомассы	Ошибки, %		
	Систематическая	Среднеквадратическая	Общая
Ствол в коре	-0,19	$\pm 8,95$	$\pm 1,65$
Крона	+0,70	$\pm 12,54$	$\pm 2,33$
Хвоя	+0,84	$\pm 14,47$	$\pm 2,68$
Древесная зелень	+0,68	$\pm 12,05$	$\pm 2,24$

Таким образом, точность учета общих запасов фитомассы оказалась вполне приемлемой. Разработанные нормативы могут успешно применяться на производстве при оценке запасов надземной фитомассы деревьев.

## ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.И., Уткин А.И. Таблицы массы фракций деревьев главнейших лесообразующих пород: сосны, ели, березы и осины // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М., 1982. С.237- 240.

Верхунов П.М. и др. Сортиментные и товарные таблицы для горных лесов Урала по ГОСТ 9462-88 и 9463-88/ Верхунов П.М., Черных В.Л., Попова А.В., Грачев В.М., Мамаев И.В. М., 1996. 188 с.

Гальперин М.И., Соколов С.В. Лесотаксационные таблицы для древостоев сосны подзоны южной тайги Зауралья (в пределах Свердловской области). Свердловск, 1971. 25 с.

Горский П.В. Руководство для составления таблиц. М., 1962. 96 с.

Луганский Н.А., Нагимов З.Я. Структура и динамика сосновых древостоев на Среднем Урале. Екатеринбург, 1994. 140 с.

Никитин К.Е., Швиденко А.З. Методы и техника обработки лесоводственной информации. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 272 с.

Соколов П.А., Закамский В.А., Петрушев А.О. Таблицы для таксации фитомассы крон в древостоях лиственных пород республики Марий Эл и сопредельных районов. Йошкар-Ола, 1994. 108 с.

Токмурзин Т.Х., Байзаков С.Б. Сортиментные таблицы и выход хвойной лапки сосны Прииртышья // Вестник сельскохозяйственной науки. Алма-Ата, 1969. С.53-61.

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. 191 с.

Методы и таблицы оценки надземной фитомассы деревьев // Леса Урала и хозяйство в них / Усольцев В.А., Нагимов З.Я., Деменев В.В., Мельникова И.В. Екатеринбург, 1993. Вып. 15. С. 90-110.

Юкнис Р.А. Некоторые закономерности роста деревьев // Моделирование и контроль производительности древостоев: Сб. науч. тр. ЛитСХА. Каунас, 1983. С. 118-120.

Яновский Л.Н. Вес зеленой биомассы деревьев древостоев сосны, ели, березы и осины по разрядам высот Ленинградской области // Лесное хозяйство, лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность: Сб. ст. о законченных н.-и. работах.Л., 1975. Вып. 3. С. 21-23.

Abetz P. Beitrage zum Baumwachstum // Der Forst- und Holzwirt 31. 1976. 19. S. 389-393.

Erteld W. Groesse und Entwicklung des h/d-Wertes in Kieferbestaenden // Allg. Forst- und Jagdzeitung. 1979. 150. S. 72-75.