

**ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ВЕТВЕЙ I ПОРЯДКА ОТ ИХ
ДЕНДРОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ У СОСНЫ
И БЕРЕЗЫ УРАЛА**

Приведены регрессионные модели для оценки массы листвы и скелета ветви I порядка у березы и сосны Урала, включающие в качестве определяющих факторов диаметр ветви у ее основания и показатели ценотического положения ветви в кроне и дерева в древостое. Модели объясняют 91-98% общего варьирования фракций фитомассы у сосны и 76-85% - у березы и могут быть использованы для ускоренного создания банков данных о фитомассе деревьев и древостоев и для оценки массы крон на стационарных объектах.

Экологический мониторинг и реализация экологических программ различных уровней предполагают использование количественных и качественных показателей фитомассы лесов в виде соответствующих баз данных (Усольцев и др., 1995). Создание последних затруднено высокой трудоемкостью процедуры взвешивания и приведения к абсолютно сухому состоянию фитомассы больших совокупностей деревьев. Один из способов снижения этой трудоемкости состоит в получении достаточно надежных регрессионных моделей для расчета массы ветвей I порядка по определяющим дендрометрическим показателям ветви и дерева в целом. При этом процедура взвешивания всей кроны заменяется менее трудоемким процессом перчета ветвей I порядка. При определенных условиях эта замена обеспечивает неdestructивный (т.е. без рубки дерева) метод оценки фитомассы, что особенно важно при определении биопродуктивности деревьев и древостоев на объектах постоянного наблюдения.

Попытки определения массы листвы и скелета ветви по диаметру у ее основания предпринимаются давно. В.Каммингс (Cummings, 1941) для определения индексов транспирации, фотосинтеза и химического состава листвы клена сахарного установил линейную связь количества листьев на ветви N (экз) с квадратом диаметра у основания ветви d_0 (0,1 дюйма):

$$N = -2.2 + 6.24 d_0^2; R = 0.94, \quad (1)$$

при этом он не обнаружил различий названной связи между нижней и верхней частями кроны.

Позднее массу листвы и скелета кроны коррелировали с легко измеряемым диаметром у основания ветви, исходя из известного в биологии

простого математического соотношения между размерами различных органов животных и растений. Это соотношение определяется как уравнение аллометрического роста, выражаемое аллометрической (степенной) функцией

$$y = a_0 \cdot x^a, \quad (2)$$

которое путем логарифмирования приводится к линейному виду

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x, \quad (3)$$

где y - масса ветви;

x - диаметр ветви у ее основания.

М.С. Родионовым (1959) по данным 65 ветвей тополя канадского диаметром от 0,3 до 12 см и 35 ветвей ивы прутовидной диаметром от 0,3 до 4,6 см, произрастающих в 5-23-летних полевых лесополосах Краснодарского края, для определения их транспирационного расхода предложены аллометрические уравнения:

для тополя канадского

$$P_f = 0,0270 d_0^{2,4109}; R=0,890 \quad (4)$$

и для ивы прутовидной

$$P_f = 0,0292 d_0^{2,1262}; R=0,860, \quad (5)$$

где P_f - масса листы в свежем состоянии, г;

d_0 - диаметр ветви у ее основания, см.

П.М. Этвиллом (Attiwill, 1962) с целью расчета нормы возврата элементов питания в почву через опад в 40-летнем сомкнутом древостое эвкалипта были срезаны 85 ветвей I порядка толщиной от 1,2 до 23,4 дюйма таким образом, что были представлены все классы Крафта и все уровни кроны сверху донизу и рассчитаны уравнения:

для массы листы P_x (г)

$$\lg P_x = 1,8167 + 1,6607 \lg d_0 \quad (6)$$

и для массы скелета ветви P_{sk} (г)

$$\lg P_{sk} = 1,5167 + 2,4275 \lg d_0, \quad (7)$$

где d_0 - диаметр ветви у ее основания в дюймах.

Ошибка уравнения (6) составила 0.0385, а (7) - 0.0335 логарифмических (десятичных) единиц. Для угнетенных ветвей с частично отмершей листвой был отмечен выход некоторых экспериментальных значений за пределы нижней границы доверительного интервала. Масса каждой ветви рассматривалась как составная часть массы всей кроны и вся крона при этом уподоблялась одной большой ветви.

Для оценки запасов лесных горючих материалов в пологе древостоев каждой из 11 хвойных пород в Рокки Маунтин (США) Дж Браун (Brown, 1976) выделял в кроне 2-3 вертикальных секции для живых ветвей и одну - для отмерших. У каждой живой ветви отделяли хвою, а скелет

ветви расчленяли на четыре группы толщин : 0 - 0,6; 0,6 - 2,5; 2,5 - 7,6 и более 7,6 см. Для каждой фракции в абсолютно сухом состоянии в пределах каждой секции кроны рассчитывали уравнения (2), путем перечета ветвей по толщинам определяли расчетную массу кроны дерева по фракциям и сопоставляли ее с фактической.

Ф.Фидлером (Fiedler, 1986) для ели европейской были выведены уравнения параболы второго порядка, описывающие зависимость массы древесной зелени и скелета ветвей от диаметра у основания ветви для каждой из трех вертикальных секций кроны раздельно.

Поскольку зависимость массы ветви от ее диаметра изменяется в связи с положением ветви в кроне (Long et al., 1981; Fiedler, 1986), возможен вывод обобщенного регрессионного уравнения, учитывающего это положение, т.е. ценотическое положение ветви в кроне. Это было реализовано А.Эком (Ек, 1979) на ветвях тополя печального, когда в многофакторное уравнение, наряду с диаметром основания ветви, были введены расстояние ветви от вершины кроны, отношение высоты ствола к его диаметру и в качестве альтернативы последнему показателю - расстояние между деревьями. Если расстояние ветви от вершины кроны в уравнениях А.Эка представляло ценотическое положение ветви в кроне, то два других показателя (отношение высоты ствола к его диаметру и расстояние между деревьями) характеризовали ценотическое положение дерева в древостое.

Согласно пайп-модели, между диаметром ветви в произвольной точке и массой листвы, расположенной выше этой точки, существует соотношение, инвариантное для всех ветвей деревьев данной породы (Shinozaki et al., 1964; Long et al., 1981; Кайбияйнен и др., 1986). Л.К.Кайбияйнен с соавторами (1986) показали, что связь массы хвои ветви с площадью сечения ветви у основания ее охвоенной части (представленной целиком заболонью) существенно теснее ($R^2 = 0,997$), чем с площадью сечения ветви у ее основания (иногда частично представленной ядром) вблизи точки крепления ветви на стволе ($R^2 = 0,890$). Наличие таких инвариантных взаимосвязей могло бы существенно упростить определение массы хвои всего дерева. Однако кроме хвои обычно требуется определение массы скелета кроны, а для регрессионной оценки последней диаметр ветви у основания охвоенной ее части совершенно не пригоден (Усольцев и др., 1993). Поэтому при выводе регрессионных моделей оценки массы ветвей ели Среднего Урала за основу был принят методический подход А.Эка, согласно которому наряду с диаметром ветви у ее основания учитывается ценотическое положение ветви в кроне и дерева в древостое (Усольцев и др., 1993). Были рассчитаны регрессионные модели вида

$$\ln P_1 = f(\ln d_0, \ln L, \ln D), \quad (8)$$

где P_1 - масса фракции (хвоя, скелет) ветви ели;

d_0 - диаметр ветви у ее основания;

L - длина ветви, которая у ели тесно коррелирована с расстоянием от точки ее крепления до вершины дерева и характеризует, таким образом, центическое положение ветви в кроне,

D - диаметр ствола на высоте груди, опосредующий в пределах древостоя центическое положение дерева.

Уравнение (8) объясняет 88% изменчивости массы ветви в целом и 95% изменчивости массы скелета ветви.

Наши исследования биологической продуктивности сосновых лесов проведены в пределах Зауральской холмисто-предгорной провинции в южной подзоне тайги (Учебно-опытный лесхоз УГЛТА) в сомкнутых сосняках со II по XV классы возраста: от разнотравного до осоково-болотного типов. Сомкнутые березняки исследованы в пределах Зауральской холмисто-предгорной провинции в южной подзоне тайги (Учебно-опытный лесхоз УГЛТА и Березовский лесхоз Свердловской обл.) и Южноуральской провинции горных южнотаежных и смешанных лесов (Кусинский лесхоз Челябинской обл.) и представлены древостоями с I по VII класс возраста от разнотравного (I класс бонитета) до осоково-болотного (V класс бонитета) типов леса. В указанных возрастном и экологическом диапазонах в сосняках взято 414 модельных ветвей I порядка у 69 модельных деревьев на 15 пробных площадях и в березняках - 548 ветвей у 133 деревьев на 16 пробных площадях. У каждой ветви измеряли возраст (по номеру мутовки у сосны и по числу годичных колец у березы), диаметр у основания ветви, общую длину и массу хвои и листвы (отделялась ощипыванием) и скелета ветви со взятием навесок для перевода на абсолютно сухое состояние термовесовым методом. У сосны крону делили на шесть, а у березы - на три равные части по вертикали, и ветви относили к одной из них.

При расчете массы отдельных ветвей I порядка в сосняках положение ветви в кроне дерева первоначально было учтено включением в структуру моделей (8) вместо длины ветви L возраста ветви A_b , который определялся порядковым номером мутовки в направлении от вершины к основанию кроны, включая отмершие мутовки нижней части кроны у спелых деревьев. Получены регрессионные модели:

$$\ln P_0 = -7,3889 + 0,1977 \ln^2 d_0 + 0,4117 \ln d_0 \ln D + 3,0567 \ln D - 0,6933 \ln^2 D - 0,5668 \ln^2 A_b + 0,4557 \ln A_b \ln D, \\ R^2 = 0,872, \quad (9)$$

$$\ln P_1 = -3,5411 + 1,2252 \ln d_0 - 0,8696 \ln A_b + 0,2898 \ln A_b \ln D, \\ R^2 = 0,746, \quad (10)$$

где P_0 и P_1 - соответственно общая масса и масса хвои ветви в абсолютно сухом состоянии, кг;

d_0 - диаметр ветви у ее основания, см;

A_n - возраст ветви, лет;

D - диаметр ствола, см. Все константы здесь и далее значимы на уровне t_{05} .

Тем не менее, замена легко получаемого показателя возраста ветви (по номеру мутовки) более трудоемким (особенно у растущих деревьев) показателем длины ветви l порядка дала более точные уравнения с более высокими коэффициентами детерминации

$$\begin{aligned} \ln P_0 &= -6,0336 + 0,3369 \ln d_0 \ln D - 0,1939 \ln^2 d_0 \ln L + 0,9853 \ln L + \\ &+ 2,1978 \ln D - 0,3177 (\ln D)^2; \\ R^2 &= 0,906; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \ln P_1 &= -7,7544 + 0,4325 \ln d_0 \ln D - 0,2926 \ln^2 d_0 \ln L + 0,3459 \ln L + 2,7660 \ln D - \\ &- 0,4410 \ln^2 D; \\ R^2 &= 0,975; \end{aligned} \quad (12)$$

где L - длина ветви, м.

Результаты табулирования уравнений (11) и (12) приведены в табл. 1, где масса скелета ветви получена по разности P_0 и P_1 . Закономерности изменения массы ветви одного и того же диаметра с увеличением длины ветви общие у ели (Усольцев и др., 1993) и сосны Среднего Урала: происходит снижение массы хвои вследствие того, что более длинные ветви соответствуют нижней части кроны с худшим световым режимом в сравнении с верхней частью кроны, и увеличение массы скелета ветви вследствие увеличения второго массообразующего линейного размера - длины ветви.

При оценке двух функционально различных фракций фитомассы - хвои и скелета ветвей - необходимо соблюдение принципа их "гармонизации" (Jacobs, Cunia, 1980), т.е. согласованности между собой, чтобы соотношения масс фракций в экспериментальных данных сохранялись на всех диапазонах изменения определяющих переменных (факторов) после табулирования рассчитанных регрессионных моделей. В уравнениях (11) и (12) для сосны этот принцип в какой-то мере обеспечивался тем, что рассчитывались уравнения вначале для суммарной массы фракции, а затем для массы хвои, а табличные значения массы скелета ветви получали последовательным вычитанием.

Обычно масса скелета ветви по сравнению с массой хвои в множественных регрессиях обеспечивается большими коэффициентами детерминации. Если исходить из аллометрического соотношения между массой

хвои и скелета ветви, определяемого тем, что масса хвои пропорциональна массе скелета ветви, который эту хвою поддерживает (Attiwill, 1962), то в структуру уравнения (12) для определения массы хвои наряду с d_0 , L и D необходимо дополнительно ввести показатель массы скелета ветви $P_{ск}$. Этот способ известен как реализация рекурсивного (рекуррентного) принципа, когда используется система (цепочка) уравнений, в которой зависящая переменная предыдущего уравнения входит в последующее в качестве одной из независимых переменных (Усольцев, 1988; Borders, 1989), что обеспечивает взаимную согласованность закономерностей динамики двух фракций.

По такому принципу рассчитаны регрессионные модели для массы ветвей I порядка в березняках Урала, где дополнительно к вышеназванным факторам, определяющим массу ветвей сосны, учтено положение ветви I порядка в кроне. Береза относится к симподиальному типу ветвления и определение положения ветви I порядка в кроне по возрасту ветви является довольно трудоемкой процедурой. Поэтому оно учитывалось путем отнесения ветви к одной из трех равных секций, на которые делили по вертикали крону каждого модельного дерева. Получены уравнения:

для массы скелета ветви

$$\ln P_{ск} = -3,5036 + 1,9159 \ln d_0 + 0,4064 \ln L - 0,2934 \ln N + 0,3323 \ln D;$$

$$R^2 = 0,851; \quad (13)$$

и для массы листы

$$\ln P_l = -3,2980 + 1,1810 \ln d_0 + 0,2449 \ln L - 0,3748 \ln N + 0,2066 \ln P_{ск} +$$

$$+ 0,0479 \ln P_{ск} \ln d_0;$$

$$R^2 = 0,761; \quad (14)$$

где N - порядковый номер секции от вершины к основанию кроны (1, 2, 3).

При составлении табл. 2 вначале табулировалось уравнение (13) по задаваемым значениям d_0 , L , N и D , а затем по тем же задаваемым значениям d_0 , L , N и D и расчетным величинам $P_{ск}$ табулировали уравнение (14). В этом случае в пределах одной секции масса скелета ветви и листы повышается пропорционально увеличению обоих массообразующих показателей - диаметра и длины ветви, но при одних и тех же размерах масса ветви (интенсивность ветвления и степень облиствения) снижается в направлении от верхней секции к нижней вследствие ухудшения светового режима. При изменении положения дерева в пологе, характеризуемого толщиной ствола, закономерности изменения массы ветви те же, что у ели и сосны.

Таким образом, полученные регрессионные модели массы ветвей I порядка дают возможность ускоренного расчетного определения массы

фракций кроны дерева, минуя трудоемкую операцию взвешивания массы кроны с последующим переводом ее на абсолютно сухое состояние по многочисленным пробным навескам. Они полезны также при оценке массы кроны на объектах постоянного наблюдения, где деструктивные методы оценки исключаются, а также при ранней диагностике продуктивности деревьев в плане селекционного улучшения лесов на основе фенотипического отбора особей по фитомассе.

Таблица 1

Зависимость массы хвои (числитель) и скелета ветвей I порядка у сосны Среднего Урала (знаменатель) в абсолютно сухом состоянии (г) от диаметра ветви у ее основания, длины ветви и диаметра ствола на высоте груди

D ₀ , мм	Длина ветви, см									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
D = 12 см										
10	<u>20</u> 20	<u>30</u> 30	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	<u>60</u> 80	<u>60</u> 140	<u>70</u> 120	—	—	—	—	—	—
D = 20 см										
10	<u>30</u> 20	<u>30</u> 70	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	<u>80</u> 130	<u>90</u> 200	<u>90</u> 280	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	<u>140</u> 380	<u>130</u> 470	—	—	—	—	—
D = 32 см										
10	<u>30</u> 30	<u>30</u> 70	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	<u>90</u> 150	<u>100</u> 250	<u>100</u> 340	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	<u>160</u> 490	<u>160</u> 610	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	<u>210</u> 740	<u>200</u> 860	<u>190</u> 980	—	—	—
50	—	—	—	—	—	<u>220</u> 970	<u>210</u> 1080	<u>200</u> 1180	—	—
D = 44 см										
10	<u>20</u>	<u>30</u>	—	—	—	—	—	—	—	—

D ₀ , мм	Длина ветви, см									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
20	30	70								
	—	<u>80</u> 170	<u>90</u> 270	<u>100</u> 360	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	<u>160</u> 550	<u>160</u> 680	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	<u>220</u> 860	<u>210</u> 980	<u>200</u> 1110	—	—	—
50	—	—	—	—	—	<u>240</u> 1130	<u>230</u> 1250	<u>220</u> 1360	—	—
60	—	—	—	—	—	—	<u>240</u> 1360	<u>220</u> 1460	<u>210</u> 1550	<u>200</u> 1630
70	—	—	—	—	—	—	<u>250</u> 1450	<u>230</u> 1530	<u>210</u> 1600	<u>190</u> 1670

Таблица 2

Зависимость массы листвы (числитель) и скелета ветвей I порядка (знаменатель) у березы в абсолютно сухом состоянии (г) от диаметра ветви у ее основания, длины ветви и диаметра ствола на высоте груди для трех секций кроны

Положение в кроне	d ₀ , мм	Длина ветви, см				
		50	100	150	200	250
D=12 см						
Верхняя секция кроны	10	<u>14</u> 46	<u>18</u> 61	<u>20</u> 72	—	—
	20	<u>40</u> 174	<u>51</u> 230	<u>58</u> 271	<u>64</u> 305	—
	30	—	<u>97</u> 501	<u>112</u> 590	<u>124</u> 664	<u>134</u> 727
Средняя секция кроны	10	<u>10</u> 36	<u>12</u> 48	<u>14</u> 56	—	—
	20	<u>27</u> 135	<u>35</u> 180	<u>40</u> 212	<u>44</u> 238	—
	30	—	<u>66</u> 390	<u>76</u> 460	<u>84</u> 517	<u>91</u> 567
Нижняя	10	<u>8</u> 31	<u>10</u> 42	<u>12</u> 49	—	—

Поло- жение в кроне	d ₀ , мм	Длина ветви, см				
		50	100	150	200	250
Секция	20	<u>22</u>	<u>28</u>	<u>33</u>	<u>36</u>	—
		119	157	185	208	
Кроны	30	—	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>69</u>	<u>75</u>
	40	—	342	403	453	496
				<u>100</u>	<u>111</u>	<u>120</u>
				700	786	861
D=20 см						
Верхняя секция	10	<u>15</u>	<u>18</u>	<u>21</u>	<u>23</u>	<u>25</u>
	20	55	72	85	96	105
кроны	30	<u>42</u>	<u>53</u>	<u>61</u>	<u>67</u>	<u>72</u>
	40	206	273	322	362	396
		<u>80</u>	<u>101</u>	<u>117</u>	<u>129</u>	<u>140</u>
		448	593	700	786	861
Средняя секция	10	<u>10</u>	<u>13</u>	<u>15</u>	—	—
	20	43	56	66		
кроны	30	<u>29</u>	<u>36</u>	<u>42</u>	<u>46</u>	—
	40	161	213	251	282	
		—	<u>69</u>	<u>80</u>	<u>88</u>	<u>95</u>
			463	546	613	671
Нижняя секция	10	<u>8</u>	<u>10</u>	<u>12</u>	—	—
	20	37	49	58		
кроны	30	<u>23</u>	<u>30</u>	<u>34</u>	<u>37</u>	—
	40	141	186	220	247	
		<u>44</u>	<u>56</u>	<u>65</u>	<u>72</u>	<u>78</u>
		306	405	478	537	588
		—	<u>91</u>	<u>105</u>	<u>117</u>	<u>126</u>
			703	829	932	1020
D=28 см						
Верхняя секция	10	<u>15</u>	<u>19</u>	<u>22</u>	—	—
	20	61	81	95		
кроны	30	<u>43</u>	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>69</u>	—
	40	230	305	360	404	
		—	<u>104</u>	<u>120</u>	<u>133</u>	<u>144</u>
			663	782	879	963
Средняя секция	10	<u>10</u>	<u>13</u>	<u>15</u>	—	—
	20	48	63	74		
		<u>29</u>	<u>37</u>	<u>43</u>	<u>47</u>	—
		180	238	281	315	

Поло- жение в кроне	d ₀ , мм	Длина ветви, см				
		50	100	150	200	250
кроны	30	—	<u>71</u>	<u>82</u>	<u>91</u>	<u>98</u>
			517	610	686	751
Нижняя секция	10	9	11	12	—	—
		42	55	65		
кроны	20	24	30	35	38	—
		157	208	246	276	
кроны	30	46	58	67	74	80
		342	453	534	601	658
	40	—	<u>94</u>	<u>108</u>	<u>120</u>	<u>130</u>
			786	927	1042	1141

Литература

Кайбияйнен Л.К., Хари П., Сазонова Т.А., Мякеля А. Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. III. Площадь проводящей ксилемы и масса хвои // Лесоведение, 1986. №1. С. 31-37.

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

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 253 с.

Усольцев В.А., Тепикин С.В., Ваганов В.Н. Структура надземной фитомассы деревьев в ельниках Среднего Урала // Леса Урала и хозяйство в них. Вып. 16. Свердловск, 1993. С. 110-129.

Усольцев В.А., Сальников А.А., Горбунова С.А., Нагимов З.Я. Принципы формирования баз данных по фитомассе лесов России и Швейцарии // Там же. Вып. 18. 1995. С. 198-227.

Attwill P.M. Estimating branch dry weight and leaf area from measurements of branch girth in Eucalyptus // Forest Sci., 1962. Vol. 8. 1 2. P. 132-141.

Borders B.E. Systems of equations in forest stand modelling // Forest Sci., 1989. Vol. 35. 1 2. P. 548-556.

Brown J.K. Predicting crown weights for 11 Rocky Mountain conifers // Oslo biomass studies. IUFRO. S4.01. Mensuration, growth and yield. Working party on the mensuration of the forest biomass - Orono. Univ. Maine, 1976. P. 103-115.

Cummings W.H. A method for sampling the foliage of a Silver maple tree // J. Forestry, 1941. 1 36. P. 382-384.

Ek A.R. A model for estimating branch weight and branch leaf weight in biomass studies // *Forest Sci.*, 1979. Vol. 25. ' 2. P. 303-306.

Fiedler F. Die Dendromasse eines hiebsreifen Fichtenbestanden // *Beitr. Forstwirtschaft*, 1986. H. 20. ' 4. S. 171-180.

Jacobs M.W., Cunia T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables // *Can. J. For. Res.*, 1980. Vol. 10. ' 4. P. 483-490.

Long J.N., Smith F.W., Scott D.R.M. The role of Douglas-fir stem sapwood and heartwood in the mechanical and physiological support of crowns and development of stem form // *Can. J. For. Res.*, 1981. Vol. 11. ' 3. P. 459-464.

Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. 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.