

УДК 581.5

В.А. Усольцев^{1,2}, Д.С. Гаврилин¹, К.С. Субботин¹

¹Уральский государственный лесотехнический университет,

²Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

**ФИТОМАССА ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННОЙ НА СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ
ПРЕДЕЛАХ И СОСТАВЛЕНИЕ СПРАВОЧНО-НОРМАТИВНЫХ ТАБЛИЦ**



Доля одновидовых древостоев в лесном фонде не так велика, и древостои смешанного породного состава занимают значительные площади (**рис. 1**). Для оценки фитомассы таких древостоев необходимы таксационные нормативы для подеревного определения их фитомассы, составленные на основе аллометрических уравнений. Используя подеревные нормативы фитомассы по данным перечета деревьев на единице площади, получают величину фитомассы на 1 га.



Рис. 1. Лесной ландшафт смешанного породного состава
(<http://hebeitour.ru/natural.ph>).

Цель нашей работы – исследование структуры фитомассы деревьев лиственницы в пессимальных условиях их роста на южном и северном пределах ареала на территории Евразии и составление справочно-таксационных нормативов для её оценки.

Южный предел ареала представлен чистыми культурами лиственницы Сукачёва (*Larix sukaczewii* N.Dyl.), произрастающей в условиях засушливой степи Тургайского прогиба (53⁰ с.ш., 64⁰ в.д.), где нами получены данные о фитомассе 28 деревьев на 10 пробных площадях (рис. 2). В качестве северного предела привлечены данные о фитомассе 27 и 80 деревьев в лесотундре на многолетней мерзлоте на плакорах (67⁰ с.ш. и 78⁰ в.д.) и надпойменных террасах (66⁰30' с.ш. и 78⁰ в.д.) в низовьях р. Пур, полученные соответственно в 4 естественных лиственничниках в возрасте от 45 до 102 лет (рис. 3) и 13 естественных лиственничниках в возрасте от 25 до 350 лет (рис. 4) (Нагимов и др., 2013; Усольцев, 2015).



Рис. 2. Чистые культуры лиственницы Сукачёва, в которых заложены наши пробные площадки. Фото: ноябрь 2013 г.

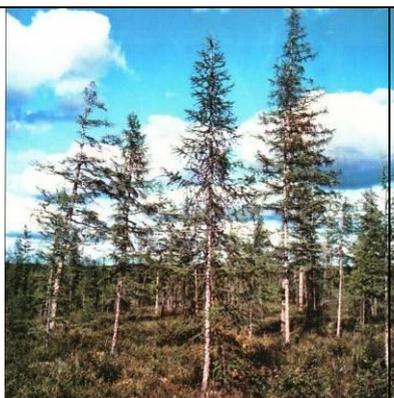


Рис. 3. Лиственница сибирская в лесотундре на плакорах в бассейне р. Пур.



Рис. 4. Лиственница сибирская в лесотундре в пойме р. Пур.

Для оценки региональных различий в величине фитомассы равновеликих деревьев лиственницы применена регрессионная модель, структура которой получила обоснование в работах В.А. Усольцева (1985, 1988, 2004):

$$\ln Pi = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H + a_3 (\ln D \times \ln H) + a_4 X_1 + a_5 X_2, \quad (1)$$

где P_i – масса фракции дерева в абсолютно сухом состоянии (P_f , P_b , P_s и P_a – хвоя, ветвей, ствола и вся надземная, соответственно), кг; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; X_1 и X_2 – блок-фиктивные переменные (Дрейпер, Смит, 1973), посредством которых закодированы локальные массивы данных о фитомассе деревьев лиственницы по схеме, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Схема кодирования массивов данных блок-фиктивными переменными

№	Регион, в котором получены данные о фитомассе лиственницы	X1	X2
1	Тургайский прогиб. Культуры лиственницы Сукачёва	0	0
2	Западная Сибирь, лесотундра, плакоры на мерзлоте. Естественные древостои лиственницы сибирской	1	0
3	Западная Сибирь, лесотундра, пойменные террасы. Естественные древостои лиственницы сибирской	0	1

В уравнении (1) произведение ($\ln D \times \ln H$) учитывает совместное действие двух факторов (синергизм). Известно, что планируемый эксперимент может быть активным и пассивным, но в обоих случаях основное требование – воспроизводимость его результатов (Усольцев, 2004). Очевидно, что модель без учета ($\ln D \times \ln H$) дает воспроизводимые оценки лишь в средней части трендов, а на границах диапазона действующих факторов она обуславливает значительные смещения (рис. 5).

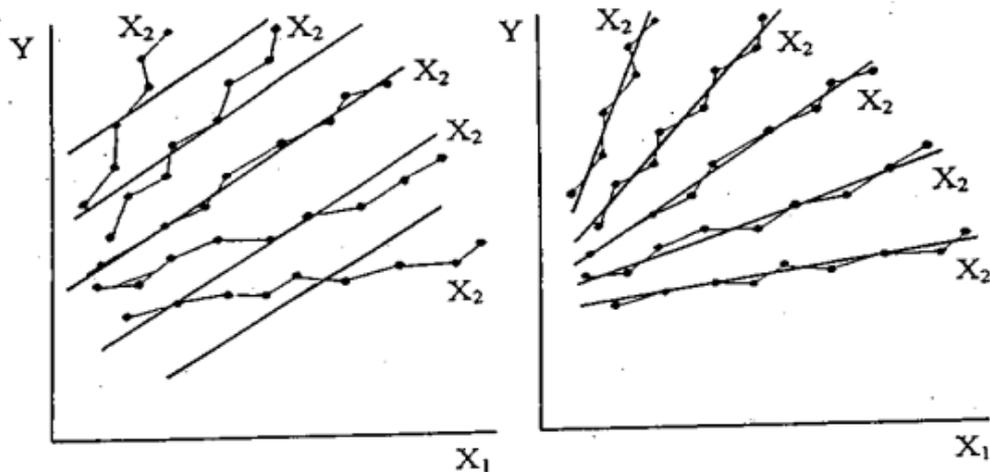


Рис. 5. Сравнительная геометрическая интерпретация двух 2-факторных уравнений: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$ (слева) и $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1 \times X_2$ (справа) (Усольцев, 2004).

Характеристика уравнений (1) дана в табл. 2, а подтверждение отсутствия корреляции остатков в уравнениях – на рис. 6. В табл. 2 даны в сравнении два типа уравнений: с блоковыми фиктивными переменными и без них, т.е. с дифференциацией получаемых закономерностей по экорегионам и без нее. Значимость констант a_4 и a_5 при оценке P_s и P_a в (1) составляет, по Стьюденту, в пределах от 0,28 до 1,79, что ниже табличного значения $t_{05} = 2$. Таким образом, точность оценки фитомассы деревьев лиственницы при разделении исходного массива данных по экорегионам повышается существенно, но лишь для массы кроны, а изменчивость массы ствола и надземной в любом случае объясняется двумя таксационными показателями (D и H) соответственно на 99,4 и 99,3%.

Таблица 2

Характеристика уравнений (1)

$\ln Pi$	Константы и независимые переменные						R^2	SE
	a_0	$a_1 \ln D$	$a_2 \ln H$	$a_3 (\ln D \times \ln H)$	$a_4 X_1$	$a_5 X_2$		
Уравнения фитомассы деревьев с кодированием их блоковыми фиктивными переменными								
$\ln(P_f)$	-1,6803	2,3310	-2,2130	0,2667	-0,5224	-0,3302	0,914	0,38
$\ln(P_b)$	-1,2350	2,5088	-2,1759	0,2924	-0,3036	-0,2580	0,945	0,34
$\ln(P_s)$	-3,0576	1,4638	0,8246	0,1350	-	-	0,994	0,12
$\ln(P_a)$	-2,3136	1,5466	0,4045	0,1721	-	-	0,993	0,13
Уравнения фитомассы деревьев без кодирования их блоковыми фиктивными переменными								
$\ln(P_f)$	-3,2369	2,4861	-1,5484	0,1411	-	-	0,894	0,44
$\ln(P_b)$	-1,8882	2,5922	-1,9965	0,2544	-	-	0,927	0,41

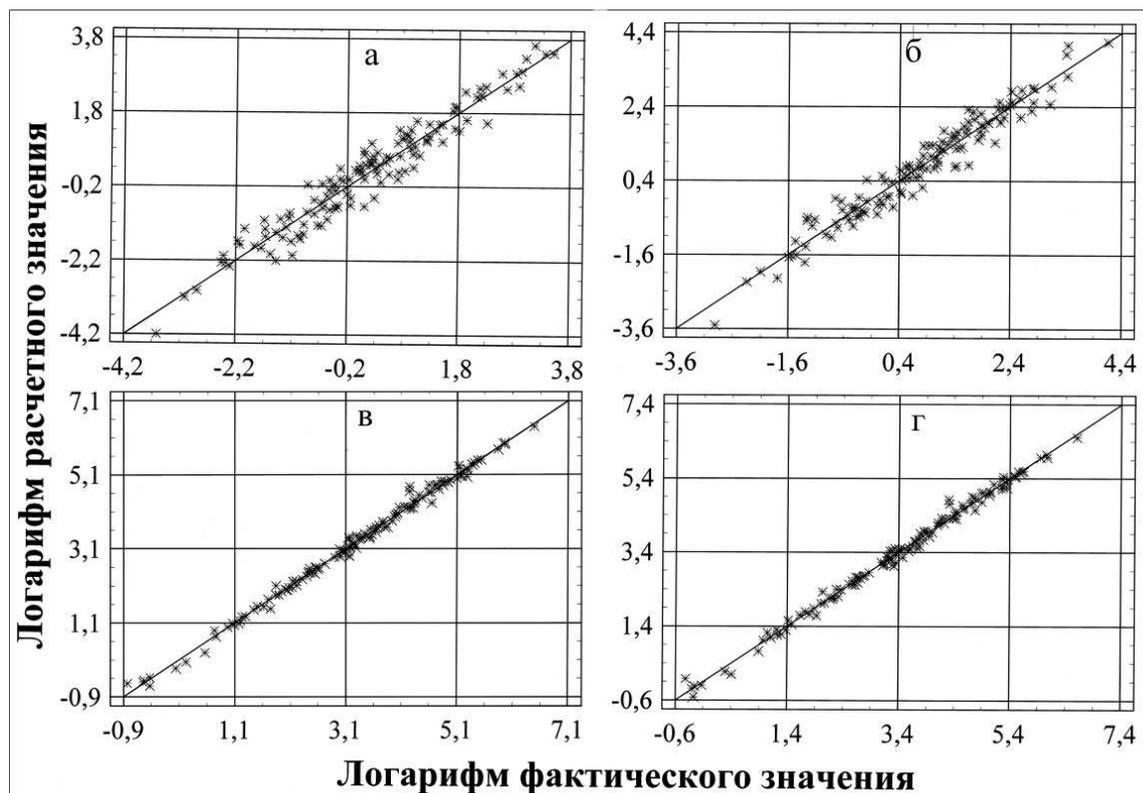


Рис. 6. Соотношение фактических и расчетных значений фитомассы деревьев лиственницы по фракционному составу: (а) хвои, (б) ветвей, (в) стволов, (г) надземной фитомассы согласно уравнениям (1).

Значения R^2 при оценке массы хвои и ветвей составили в первом случае (при блоковых переменных) соответственно 0,914 и 0,945, а во втором (без них) 0,894 и 0,927. Исключение блоковых фиктивных переменных в уравнении (1) увеличивает стандартную ошибку (SE) определения фитомассы хвои на 18 и ветвей - на 17%. Количественную характеристику этих различий дает табл. 3, полученная путем табулирования уравнений (1) по задаваемым значениям диаметра ствола, высоты дерева и блоковых фиктивных переменных, соответственно 1 или 0.

Из цифровых данных табл. 3 следует, что по сравнению с культурами Тургая фитомасса хвои и ветвей равновеликих деревьев лиственницы сибирской в лесотундре на мерзлоте и там же на надпойменных террасах меньше соответственно на 41 и 28 %. В разных экорегионах наблюдается перераспределение доли фитомассы различных фракций в общей надземной фитомассе деревьев. Доля хвои в надземной фитомассе равновеликих деревьев в культурах Тургая, на плакорах лесотундры и в пойме лесотундры составляет соответственно 2,3; 1,4 и 1,7%, а доля ветвей соответственно 8,1; 6,1 и 6,1%. Доля массы ствола в общей надземной составляет соответственно 89,6; 92,4 и 92,1%, однако абсолютные величины массы ствола по экорегионам у равновеликих деревьев остаются неизменными.

В уравнении Спурра (Prodan, 1965), широко применяемом в лесной таксации для оценки объема ствола, входит в качестве предиктора так называемый видовой цилиндр (D^2H), включающий два основных массообразующих показателя – диаметр и высоту ствола. Показатель (D^2H) стал применяться в качестве интегральной независимой переменной при оценке массы не только ствола, но и кроны, вместо использования диаметра и высоты ствола раздельно (Ogawa et al., 1965; Семечкина, 1978; Уткин, 1982), хотя каких-либо убедительных предпосылок для такого переноса нет. Казалось бы, упрощается схема расчета уравнения – вместо двухфакторной можно рассчитать пар-

ную связь, алгоритм которой позволяет обходиться даже без помощи компьютера (Семечкина, 1978; Тябера, 1987). И.Б. Новик с соавторами (1986) называют это “приемом агрегирования” факторов.

Таблица 3

Зависимость фитомассы деревьев лиственницы от диаметра ствола и высоты дерева в разных экорегионах

Высота дерева, м	Фракции фитомассы	Диаметр ствола на высоте груди, см							
		4	8	12	16	20	24	28	32
Культуры лиственницы Сукачёва в Тургайском прогибе									
12	Хвоя	0,05	0,39	1,30	3,07	5,99	10,33	-	-
	Ветви	0,12	1,09	4,05	10,26	21,12	38,10	-	-
	Ствол	4,64	15,75	32,19	53,44	79,20	109,2	-	-
	Итого	4,80	17,22	37,53	66,77	106,3	157,7	-	-
16	Хвоя	0,03	0,24	0,83	2,01	3,98	6,97	11,20	16,87
	Ветви	0,07	0,69	2,67	6,93	14,53	26,61	44,40	69,16
	Ствол	6,30	22,00	45,72	76,84	114,9	159,7	210,9	268,4
	Итого	6,40	22,93	49,22	85,77	133,4	193,3	266,5	354,4
20	Хвоя	-	-	0,59	1,45	2,91	5,14	8,33	12,66
	Ветви	-	-	1,93	5,11	10,87	20,15	33,95	53,35
	Ствол	-	-	60,03	101,8	153,4	214,4	284,6	363,7
	Итого	-	-	62,55	108,4	167,2	239,7	326,9	429,7
24	Хвоя	-	-	0,44	1,11	2,25	4,01	6,55	10,01
	Ветви	-	-	1,48	3,98	8,58	16,05	27,27	43,16
	Ствол	-	-	74,99	128,2	194,2	272,8	363,5	466,2
	Итого	-	-	76,92	133,3	205,1	292,9	397,4	519,4
28	Хвоя	-	-	-	-	1,81	3,25	5,34	8,20
	Ветви	-	-	-	-	7,02	13,25	22,66	36,08
	Ствол	-	-	-	-	237,1	334,4	447,1	575,2
	Итого	-	-	-	-	245,9	350,9	475,1	619,4
Естественные лиственничники лесотундры, плакоры, многолетняя мерзлота									
12	Хвоя	0,029	0,23	0,77	1,82	3,5	6,1	-	-
	Ветви	0,085	0,80	2,99	7,57	15,6	28,1	-	-
	Ствол	4,64	15,75	32,19	53,44	79,2	109,2	-	-
	Итого	4,75	16,78	35,94	62,84	98,3	143,5	-	-
16	Хвоя	0,017	0,14	0,49	1,19	2,4	4,1	6,6	10,0
	Ветви	0,051	0,51	1,97	5,11	10,7	19,6	32,8	51,0
	Ствол	6,30	22,00	45,72	76,84	114,9	159,7	210,9	268,4
	Итого	6,37	22,65	48,18	83,14	128,0	183,5	250,3	329,4
20	Хвоя	-	-	0,35	0,86	1,72	3,05	4,94	7,51
	Ветви	-	-	1,42	3,77	8,02	14,87	25,06	39,38
	Ствол	-	-	60,03	101,8	153,4	214,4	284,6	363,7
	Итого	-	-	61,80	106,5	163,2	232,3	314,6	410,6

Продолжение таблицы 3

Высота дерева, м	Фрак- ции фито- то- массы	Диаметр ствола на высоте груди, см							
		4	8	12	16	20	24	28	32
24	Хвоя	-	-	0,10	0,36	0,86	1,69	2,92	4,65
	Ветви	-	-	1,09	2,94	6,33	11,85	20,13	31,86
	Ствол	-	-	74,99	128,2	194,2	272,8	363,5	466,2
	Итого	-	-	80,28	131,5	201,4	286,3	386,6	502,7
28	Хвоя	-	-	-	-	1,07	1,93	3,17	4,87
	Ветви	-	-	-	-	5,18	9,78	16,73	26,63
	Ствол	-	-	-	-	237,1	334,4	447,1	575,2
	Итого	-	-	-	-	243,4	346,1	467,0	606,7
Естественные лиственничники лесотундры, надпойменные террасы									
12	Хвоя	0,035	0,277	0,932	2,21	4,30	7,43	-	-
	Ветви	0,089	0,842	3,125	7,93	16,32	29,43	-	-
	Ствол	0,97	3,29	6,72	11,17	16,55	22,82	-	-
	Итого	1,094	4,41	10,78	21,30	37,17	59,68	-	-
16	Хвоя	0,020	0,17	0,60	1,44	2,86	5,01	8,05	12,13
	Ветви	0,05	0,51	1,97	5,11	10,73	19,65	32,77	51,05
	Ствол	6,30	22,00	45,72	76,84	114,9	159,7	210,9	268,4
	Итого	6,37	22,68	48,29	83,39	128,5	184,4	251,7	331,6
20	Хвоя	-	-	0,42	1,04	2,09	3,70	5,99	9,10
	Ветви	-	-	1,42	3,77	8,02	14,87	25,06	39,38
	Ствол	-	-	60,03	101,8	153,4	214,4	284,6	363,7
	Итого	-	-	61,88	106,6	163,5	233,0	315,7	412,2
24	Хвоя	-	-	0,32	0,79	1,61	2,88	4,70	7,19
	Ветви	-	-	1,09	2,94	6,33	11,85	20,13	31,86
	Ствол	-	-	74,99	128,2	194,2	272,8	363,5	466,2
	Итого	-	-	76,40	131,9	202,2	287,5	388,4	505,3
28	Хвоя	-	-	-	-	1,30	2,34	3,84	5,90
	Ветви	-	-	-	-	5,18	9,78	16,73	26,63
	Ствол	-	-	-	-	237,1	334,4	447,1	575,2
	Итого	-	-	-	-	243,6	346,5	467,7	607,7

В таком случае уравнение (1) модифицируется к виду:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln(D^2 H) + a_2 X_1 + a_3 X_2. \quad (2)$$

Слабая изменчивость полндревесности ствола обусловила высокую адекватность аллометрического уравнения при оценке объема и массы ствола: при одном и том же значении D^2 масса ствола увеличивается прямо пропорционально его высоте. В.А. Усольцевым (1988) показано, что зависимость массы хвои и ветвей сосны обыкновенной по уравнению с отдельным включением D и H описывается лучше, чем с включением $(D^2 H)$: в первом случае R^2 составил соответственно 0,758 и 0,870, а во втором 0,669 и 0,810 (Усольцев, 1988). Более того, подобная закономерность проявилась при

оценке массы крон берёзы по совокупности 104 деревьев, сплошь вырубленных в 45-летнем древостое: R^2 для массы листьев и ветвей в первом случае составил соответственно 0,939 и 0,924, а во втором 0,925 и 0,899 (Усольцев, 1985). Почему так происходит?

В.А. Усольцевым (1985, 2002, 2004) показано, что при одном и том же диаметре ствола масса кроны дерева с увеличением его высоты не возрастает подобно массе ствола, а напротив, снижается. В совокупности древостоев разного возраста это объясняется сдвигом рангового положения дерева одного и того же диаметра с возрастом древостоя (табл. 4), а в совокупности древостоев разной производительности – большим развитием ассимиляционного аппарата с ухудшением условий произрастания при одинаковой толщине деревьев (рис. 7).

Таблица 4

Масса облиственных побегов березы и осины в зависимости от диаметра ствола на высоте груди и возраста дерева (Усольцев, 1972)

Диаметр ствола, см	Фитомасса облиственных побегов в свежем состоянии, кг					
	Береза			Осина		
	Возраст, лет			Возраст, лет		
	15	25	35	15	25	35
6	2,86	1,86	1,20	2,50	1,04	0,30
8	5,37	3,45	2,40	4,44	2,14	0,60
10	8,74	5,57	4,20	7,01	3,70	1,30
12	13,0	8,27	6,50	10,1	5,90	2,30
14	-	11,5	9,60	-	8,70	3,70
16	-	15,4	13,3	-	12,1	5,70
18	-	19,9	17,8	-	16,3	8,40
20	-	25,1	23,2	-	21,2	12,0
22	-	30,8	29,4	-	27,0	16,1
24	-	37,3	36,6	-	33,7	21,4
26	-	-	44,7	-	-	27,9

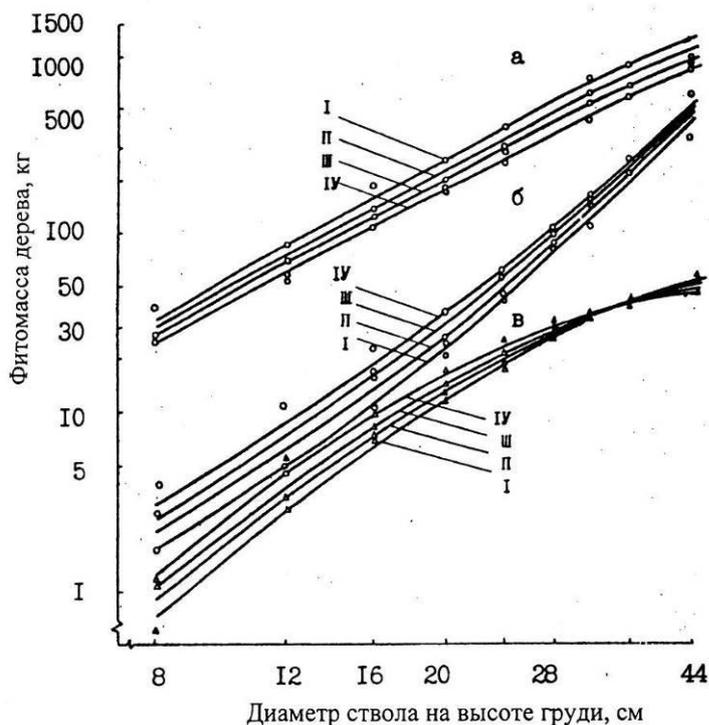


Рис. 7. Связь фитомассы осины в свежем состоянии с диаметром на высоте груди и разрядом высоты (I, II, III и IV) дерева; а – масса ствола; б – масса ветвей; в – масса облиственных побегов (Усольцев, 1985).

Опасность ситуации в данном случае аналогична показанной на **рис. 5** и состоит в возможных смещениях на границах диапазона действия факторов (см. **рис. 7б,в**).

С целью проверить, подтверждается ли названная закономерность на наших материалах по фитомассе деревьев лиственницы в трёх экорегионах, рассчитаны уравнения (2), характеристика которых дана в табл. 5.

Таблица 5

Характеристика уравнений (2)

$\ln P_i$	Константы и независимые переменные				R^2	SE
	a_0	$a_1 \ln(D^2H)$	$a_2 X_1$	$a_3 X_2$		
Уравнения фитомассы деревьев с кодированием их блоковыми фиктивными переменными						
$\ln(P_f)$	-5,2324	0,7376	-	-0,4581	0,858	0,51
$\ln(P_b)$	-4,9950	0,8458	0,3769	-0,2757	0,886	0,51
$\ln(P_s)$	-3,5607	0,9459	-	-	0,993	0,13
$\ln(P_a)$	-3,2633	0,9253	-	-	0,991	0,14

При оценке P_f по уравнению (2) значимость констант a_2 составила, по Стьюденту, 0,89, что ниже табличного значения $t_{05} = 2$. Поэтому блоковая переменная X_1 исключена при расчете уравнения для P_f . Точно так же при оценке P_s и P_a по уравнению (2) значимость констант a_2 и a_3 составила в пределах 0,18 до 1,83, что ниже табличного значения $t_{05} = 2$. Поэтому блоковые переменные исключены при расчете уравнений (2) для P_s и P_a .

Таким образом, масса ствола и надземная оцениваются с одинаковой точностью как двухфакторной моделью связи с диаметром и высотой ствола, так и парной зависимостью с видовым цилиндром. Но ошибка оценки массы хвои и ветвей в первом случае ниже соответственно на 25 и 31 % по сравнению со вторым, а R^2 соответственно выше ($0,914 > 0,858$ и $0,945 > 0,886$).

Поэтому нормативно-справочная таблица для подеревной оценки фитомассы в лиственничниках составлена не по уравнениям (2), а по (1), характеристика которых дана в табл. 2 с учётом блоковых фиктивных переменных, дифференцирующих массу хвои и ветвей по трём экорегионам. Результаты анализа подеревной фитомассы лиственницы, представленные в табл. 3, подтверждают ранее установленные различия связи фитомассы кроны и ствола с высотой дерева при его одном и том же диаметре, а именно, увеличение массы ствола и снижение массы кроны.

Л. Хоу с соавторами (Hou et al., 2015) оценивали фитомассу ствола, хвои, ветвей и корней у деревьев лиственницы Принца Рупрехта (*Larix principis_rupprechtii* Mayr.) в субтропическом поясе Китая ($33^{\circ}18'$ с. ш., $108^{\circ}20'$ в. д., высота над ур. моря 1530–1610 м), т.е. на самом южном пределе произрастания рода *Larix*. Ими предложены уравнения:

$$\text{- для древесины ствола} \quad \ln P_s = 0,9979 \ln(D^2H) - 4,2925 \quad (3)$$

$$\text{- для коры ствола} \quad \ln P_{bark} = 0,8040 \ln(D^2H) - 4,5354 \quad (4)$$

$$\text{- для ветвей} \quad \ln P_b = 2,0460 \ln D - 2,5508 \quad (5)$$

$$\text{- для хвои} \quad \ln P_f = 1,9049 \ln D - 3,4470 \quad (6)$$

$$\text{- для корней} \quad \ln P_r = 2,1862 \ln D - 3,4624 \quad (7)$$

Непосредственно сравнить фитомассу лиственницы сибирской и Каяндера, произрастающей на крайнем севере, и лиственницы Принца Рупрехта, произрастающей на крайнем юге, не представляется возможным, поскольку Л. Хоу с соавторами (Hou et al., 2015) опубликовали уравнения, но не исходные фактические данные фитомассы. Тем

не менее, уравнения (3)-(7) дают возможность выполнить подобное сравнительное исследование. Для этого уравнения (3)-(7) для лиственницы Принца Рупрехта нами протабулированы по фактическим значениям высоты и диаметра модельных деревьев лиственницы Сукачёва в культурах (вариант 1, *Larix sukaczewii* N.Dyl., без массы корней), а также лиственницы Каяндера на многолетней мерзлоте, произрастающей в Магаданской области (вариант 2, *Larix cajanderi*, с массой корней) (Москалюк, 2015), и полученные результаты сопоставлены с фактическими данными фитомассы по вариантам 1 и 2.

Сравнение показало, что масса ствола равновеликих деревьев китайской лиственницы по сравнению с лиственницей в степных культурах меньше на 13%, а по сравнению с магаданской лиственницей больше в 3 раза. Масса хвои и ветвей у китайской лиственницы по сравнению с лиственницей в степных культурах больше соответственно в 2,2 и 2,5 раза, а по сравнению с магаданской лиственницей больше в 8,8 и 4,8 раза. Масса корней у китайской лиственницы при одном и том же диаметре ствола по сравнению с магаданской лиственницей меньше на 66%. Все эти различия объясняются региональной спецификой почвенно-климатических условий и, как следствие, - разной морфоструктурой деревьев лиственницы (ср. рис. 2 и 8).



Рис. 8. Лиственница Каяндера на Магадане (слева) и лиственница Принца Рупрехта в Центральном Китае (справа). Фото В. Рябкова.

Выводы

1. Обобщенная (усредненная) оценка фракционной структуры фитомассы деревьев лиственницы по диаметру ствола и высоте дерева по сравнению с аналогичной локальной (региональной) оценкой увеличивает стандартную ошибку определения массы хвои на 18 и ветвей - на 17%, что свидетельствует о необходимости составления местных нормативно-справочных таблиц подеревной фитомассы лиственницы.

2. Масса ствола и надземная оцениваются с одинаковой точностью, как двухфакторной моделью связи с диаметром и высотой ствола, так и парной зависимостью от видового цилиндра. Но ошибка оценки массы хвои и ветвей в первом случае ниже соответственно на 25 и 31% по сравнению со вторым, а R^2 соответственно выше ($0,914 > 0,858$ и $0,945 > 0,886$).

3. В разных экорегионах фракционная структура фитомассы равновеликих деревьев лиственницы различается, и долевое участие массы хвои, ветвей и стволов в общей надземной фитомассе равновеликих деревьев имеет региональную специфику.

4. Предложенные таблицы для оценки фитомассы деревьев могут служить основой для определения фитомассы лиственных древостоев в разных экорегионах.

Список использованной литературы

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Москалюк Т.А. Фитомасса модельных деревьев как основа изучения биологической продуктивности лесов Магаданской области // *Эко-Потенциал*. 2015. № 2(10). С. 17-25 (статья в настоящем выпуске).

Нагимов З.Я., Усольцев В.А., Гаврилин Д.С. Фитомасса деревьев лиственницы сибирской в низовьях р. Пур // Сборник научных трудов ученых и специалистов факультета экономики и управления УГЛТУ. Вып. 4. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. С. 182-185.

Новик И.Б., Пегов С.А., Ростопшин Ю.А. Введение // *Природа моделей и модели природы*. М.: Мысль, 1986. С. 3-8.

Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1978. 165 с.

Тябера А.П. Простой способ определения вида уравнений множественной регрессии // *Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот / Тез. докл.* М.: Лаб. лесоведения АН СССР, 1987. С. 277-280.

Усольцев В.А. Вес кроны березы и осины в насаждениях Северного Казахстана // *Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана*. 1972. № 4. С. 77-80.

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988. 253 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).

Усольцев В.А. Регрессия в пассивном эксперименте: от Налимова – к Нагимову // *Лесной комплекс: состояние и перспективы развития*. Вып. 3. Брянск: БГИТА, 2002. С. 50-54 (http://science-bsea.bgita.ru/2002/leskomp_2002/usoltsev_regres.htm).

Усольцев В.А. О применении регрессионного анализа в лесоводственных задачах // *Лесная таксация и лесоустройство / Международный научно-практич. журн.* 2004. № 1 (33). С. 49-55.

Усольцев В.А. Фитомасса деревьев в лесах Евразии: монография. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2015. (в печати)

Уткин А.И. Методика исследований первичной биологической продуктивности лесов // *Биологическая продуктивность лесов Поволжья*. М.: Наука, 1982. С. 59-72.

Hou L., Xi W., Zhang S. Effect of understory on a natural secondary forest ecosystem carbon budget // *Russian Journal of Ecology*. 2015. Vol. 46. No. 1. P. 51–58.

Ogawa H., Yoda K., Ogino K., Kira T. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. 2. Plant biomass // *Nature and Life in Southeast Asia*. 1965. Vol. 4. P. 49-80.

Prodan M. Holzmeßlehre. Frankfurt a.M.: J.D. Sauerländer's Verlag, 1965. 644 s.

Рецензент статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор, проректор по научной работе Уральского государственного лесотехнического университета С.В. Залесов.