

УДК 630*52:630*174.754

МОДЕЛИ И ТАБЛИЦЫ ФИТОМАССЫ ОТМЕРШИХ ВЕТВЕЙ У РАСТУЩИХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ

В. А. Усольцев^{1,2}, И. С. Цепордей¹¹ *Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а*² *Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37*

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.08.2022 г.

В условиях изменяющегося климата возрастает актуальность оценки полного углеродного пула всех компонентов лесных экосистем, причем не только живой надземной и подземной части, но и подстилки, крупных детритов, почв и др. Имеются многочисленные оценки фитомассы надземной части лесных деревьев и древостоев как с учетом массы ветвей, отмерших и сохранившихся на стволах деревьев, так и без их учета. В базах данных о фитомассе деревьев сведения о массе отмерших ветвей на стволах деревьев отсутствуют. Этот показатель не входит в расчет как приходной, так и расходной составляющей углеродного цикла, и при оценках углеродного пула лесных экосистем происходит некоторое его занижение. В опубликованных данных отношение массы отмерших ветвей к надземной фитомассе варьирует от 0.1 до 26 %, однако попытки выявить факторы, объясняющие столь широкий ее диапазон, довольно редки. В настоящем исследовании предпринята первая попытка разработки аллометрических моделей для оценки массы отмерших ветвей растущих деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях степной зоны. Основу исследования составили 465 модельных деревьев, полученные на 35 пробных площадях. Установлено, что в березовом спелом древостое масса отмерших ветвей составляет 1.32 т/га и их относительная масса – 2.5 %, в естественных сосняках – соответственно 0.9–17 т/га и 0.7–13 % и в культурах – соответственно 0.2–13 т/га и 1.3–11 %. Зависимости, построенные для относительной массы ветвей, совмещены с таблицами хода роста по надземной фитомассе древостоев естественного происхождения и культур Тургайского прогиба. Установлено, что в зависимости от происхождения древостоя, его возраста и класса бонитета относительная масса ветвей изменяется от 0.8 до 15 %. Предложенные аллометрические модели и таксационные таблицы могут быть использованы при оценках массы отмерших ветвей древостоев. При расчетах углеродных пулов в лесах степной зоны необходимо учитывать массу отмерших ветвей путем применения повышающих коэффициентов в сосняках от 0.8 до 15 % и в спелых березовых лесах – 2.5 %.

Ключевые слова: *естественные древостои, лесные культуры, Pinus sylvestris L., Betula pendula Roth, масса отмерших ветвей, аллометрические модели, поправки в углеродный пул.*

DOI: 10.15372/SJFS20220606

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменяющегося климата возрастает актуальность оценки полного углеродного бюджета лесных экосистем и углеродного пула всех их компонентов (Курбанов, 2002; Замолодчиков и др., 2005; Zamolodchikov et al., 2005; Бобкова и др., 2006, 2014; Bobkova et al., 2006; Романовская и др., 2018), причем не только живой

надземной и подземной части, но и подстилки (Честных и др., 2007), крупных детритов (Замолодчиков, 2009), почв (Рожков и др., 1997) и др. Имеются многочисленные оценки фитомассы надземной части лесных деревьев и древостоев как с учетом массы ветвей, отмерших и сохранившихся на стволах деревьев (Смирнов, 1971; Семечкина, 1978; Vyskot, 1981; Габеев, 1990; Бабич и др., 2004), так и без их учета (Молчанов,

Таблица 1. Относительная масса отмерших ветвей разных пород по литературным данным

Порода	Древостой	Возраст, лет	Страна, регион	Относительная масса отмерших ветвей, %	Авторы
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	Культуры »	58 18	РФ, Архангельская обл. Болгария, Странджа	0.1–9.4 8.3–18.3	Бабич и др., 2004 Патронов, 1984
С. черная (<i>P. nigra</i> J. F. Arnold)	»	18–20	То же	4.8–26.0	Патронов, 1984
С. обыкновенная	Естественные »	25–122 20–77	РФ, Томская обл. РФ, Красноярская лесостепь	0.3–4.5 1.2–22.3	Габеев, 1990 Семечкина, 1978
Ель европейская (<i>Picea abies</i> (L.) Н. Karst.)	» »	18–130 16–20	РФ, Вологодская обл. Чешская Республика, Богемия	2.2–7.9 1.2–5.1	Смирнов, 1971 Vyskot, 1981
Дугласия (<i>Pseudotsuga</i> Carr.)	Культуры	18	Болгария, Странджа	8.2–16.8	Патронов, 1984
Дуб (<i>Quercus</i> L.)	» Поросль	24 20	Болгария, Странджа Болгария, Велико-Тырново	1.1–9.2 1.1–2.3	Патронов, 1984 Мешинев, Николов, 1990
Робиния (<i>Robinia</i> L.)	Культуры	5–50	Словакия, Ипельский Соколец	1.8–7.3	Benčat, 1989
Лиственница европейская (<i>Larix decidua</i> Mill.)	Естественные	36–140	Чешская Республика, Моравия	0.5–3.4	Vyskot, 1982

1971, 1974; Казимиров, Морозова, 1973; Ватковский, 1976; Курбанов, 2002). В существующих базах данных о фитомассе деревьев сведения о массе отмерших ветвей на стволах деревьев отсутствуют (Schepaschenko et al., 2017; Usoltsev, 2020).

Таким образом, масса отмерших ветвей деревьев и древостоев не входит в расчет как приходной (живая биомасса), так и расходной (подстилка, валеж, сухостой, почвы) составляющей углеродного цикла. При оценках углеродного баланса лесных экосистем учитываются углеродные пулы надземной и подземной живой фитомассы, детритов, сухостоя, подстилки, почвы, но игнорируется пул отмерших ветвей растущих деревьев (Ведрова и др., 2000; Курбанов, 2002; Коломыц, 2020), и тем самым, общий углеродный пул лесного покрова несколько занижается.

Доля отмерших ветвей в надземной фитомассе в абсолютно сухом состоянии (далее – относительная масса отмерших ветвей, %) варьирует у разных пород от 0.1 до 26 % (табл. 1), однако попытки выявить факторы, объясняющие столь широкий ее диапазон, довольно редки.

В литературе за некоторыми исключениями (Семечкина, 1978; Уткин, Ермолова, 1982; Бабич и др., 2004; Бобкова и др., 2014) обычно не исследуются связи массы отмерших ветвей с дендрометрическими показателями деревьев и древостоев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследований – разработать модели и таблицы углеродного пула отмерших ветвей у растущих деревьев сосны обыкновенной и березы повислой (*Betula pendula* Roth) и оценить степень занижения углеродного пула лесных экосистем при его игнорировании. Для ее достижения поставлены следующие задачи:

- разработать аллометрические модели, предназначенные для оценки массы отмерших ветвей растущих деревьев сосны обыкновенной естественного и искусственного происхождения и березы повислой по измеренному диаметру ствола;

- выполнить расчет массы отмерших ветвей на единице площади древостоев сосны естественного и искусственного происхождений и спелого древостоя березы повислой;

- разработать эмпирические модели, предназначенные для оценки массы отмерших ветвей на единице площади древостоев сосны естественного и искусственного происхождений по измеренным таксационным показателям;

- совместить полученные модели с таблицами хода роста естественных древостоев и культур сосны и показать возрастную динамику значений массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей.

Таблица 2. Таксационная характеристика древостоев и расчетные значения фитомассы пробных площадей

Возраст, лет	Густота, тыс. экз./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Запас, м ³ /га	Класс бонитета	Число модельных деревьев	Фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га		1 : 2, %
							отмерших ветвей (1)	надземная (2)	
Естественные сосняки островных боров Тургайского прогиба (52°20'–53°10' с. ш., 64° в. д.)									
13	82.40	1.7	2.7	63	IV	10	0.90	33.21	2.7
21	6.050	7.0	6.6	130	III	10	2.32	52.06	4.5
22	43.81	3.3	5.6	142	III	8	1.39	71.21	2.0
25	19.28	4.3	6.8	123	III	10	4.01	56.61	7.1
27	37.7	3.2	5.7	113	IV	10	2.70	58.42	4.6
31	12.80	6.9	9.5	247	III	10	10.20	105.27	9.7
31	26.25	4.0	7.8	163	III	10	2.10	73.49	2.9
32	19.91	5.1	7.6	199	IV	10	1.98	88.58	2.2
35	9.12	7.7	10.4	255	III	10	5.84	110.55	5.3
35	6.95	9.0	11.8	276	II	10	5.19	111.28	4.7
36	2.049	15.2	14.2	277	I	10	16.62	127.37	13.0
39	9.621	8.3	12.8	370	II	10	2.81	161.00	1.7
40	3.197	12.6	13.8	241	II	9	12.13	110.85	10.9
40	2.271	17.0	17.8	423	Ia	10	16.29	177.47	9.2
54	2.39	12.8	15.3	232	III	10	5.76	108.51	5.3
65	2.14	13.3	14.8	202	III	10	2.51	90.38	2.8
68	3.95	11.6	14.3	315	IV	10	3.41	126.50	2.7
70	0.874	22.4	21.6	339	I	10	3.89	149.56	2.6
110	1.350	22.0	21.4	558	III	10	1.62	228.55	0.7
Культуры сосны островных боров Тургайского прогиба (52°20' с. ш., 64° в. д.)									
9	11.532	2.5	2.6	16	III	5	0.18	13.07	1.4
10	18.875	3.3	4.0	50	I	10	0.92	27.42	3.4
12	19.266	3.5	3.4	51	III	10	0.49	38.86	1.3
13	9.203	4.4	4.3	44	II	9	1.15	27.26	4.2
15	8.438	4.1	3.7	41	III	10	0.69	22.28	3.1
19	4.446	7.9	6.1	88	III	10	1.46	51.82	2.8
19	7.002	9.0	9.5	233	Ia	10	11.64	110.67	10.5
20	6.333	7.0	7.0	100	II	9	4.57	47.51	9.6
21	3.238	7.7	5.5	54	III	9	1.03	32.12	3.2
22	3.846	10.8	9.0	182	I	5	6.68	93.14	7.2
22	4.244	9.6	9.2	166	I	9	6.36	85.28	7.5
24	5.340	10.5	11.4	295	Ia	9	12.87	130.57	9.9
25	8.637	7.0	7.5	149	III	10	5.37	76.74	7.0
26	6.085	8.8	9.9	192	I	11	7.90	84.21	9.4
50	1.810	16.0	16.4	262	I	10	8.16	111.63	7.3
Березняк порослевого происхождения Казахского мелкосопочника (53°00' с. ш., 70°10' в. д.)									
50	0.650	15.4	15.3	134	III	104	1,32	51,62	2,5

Объектами исследования послужили чистые сосняки естественного и искусственного происхождения степной зоны, в которых было заложено 34 пробные площади. Кроме того, была исследована надземная фитомасса 50-летнего древостоя березы повислой порослевого происхождения с полнотой 0.9. На площади 0.16 га были срублены и обработаны все деревья в чис-

ле 104. Таксационная характеристика объектов представлена в табл. 2. На каждой пробной площади сосновых древостоев по ступеням толщины в диапазоне их варьирования было взято до 10–11 модельных деревьев. У каждого модельного дерева сосны и березы определена масса отмерших ветвей, а также хвои (листы), живых ветвей и ствола.

Таблица 3. Характеристика 465 модельных деревьев, взятых на пробных площадях в сосновых и березовых древостоях степной зоны

Обозначение статистик	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>P_s</i>	<i>P_b</i>	<i>P_f</i>	<i>P_a</i>	<i>P_d</i>
Естественные сосняки островных боров Тургайского прогиба								
Среднее	49	10.6	11.1	40.6	4.6	2.1	47.3	1.7
Минимальное	13	0.4	1.4	0.04	0.001	0.01	0.05	0.002
Максимальное	110	34.5	26.1	436.2	48.6	13.3	483.2	23.3
Стандартное отклонение	26.6	7.5	5.3	61.4	8.3	2.9	71.3	3.2
Коэффициент вариации, %	54.6	71.2	47.6	151.3	179.4	141.9	150.7	184.4
Число наблюдений	222	222	222	222	222	222	222	222
Культуры сосны островных боров Тургайского прогиба								
Среднее	21	6.6	6.8	9.0	1.5	1.3	11.8	0.9
Минимальное	9	0.6	1.6	0.09	0.012	0.02	0.14	0.002
Максимальное	50	21.7	16.2	107.0	9.8	7.8	120.2	9.8
Стандартное отклонение	9.6	4.1	3.4	14.4	2.0	1.5	17.0	1.5
Коэффициент вариации, %	46.3	62.0	50.2	159.9	136.4	121.6	144.2	166.3
Число наблюдений	139	139	139	139	139	139	139	138
Березняк порослевого происхождения Казахского мелкосопочника (сплошная рубка)								
Среднее	50	14.4	14.1	61.7	13.5	3.2	78.5	1.9
Минимальное	50	5.6	5.8	4.7	0.6	0.2	6.2	0.05
Максимальное	50	28.0	18.3	235.6	92.6	13.7	304.3	11.3
Стандартное отклонение	–	5.4	2.5	49.4	17.0	2.9	67.9	2.5
Коэффициент вариации, %	–	37.2	17.8	80.0	125.5	89.0	86.5	128.3
Число наблюдений	104	104	104	104	104	104	104	104

Примечание. Здесь и далее: *A* – возраст дерева, лет; *D* – диаметр ствола на высоте груди, см; *H* – высота дерева, м; *P_s*, *P_b*, *P_f*, *P_a* и *P_d* – соответственно фитомасса ствола, живых ветвей, хвои, надземная и отмерших ветвей в абсолютно сухом состоянии, кг.

Методика выборочного учета и приведения показателей фитомассы к абсолютно сухому состоянию изложена ранее (Усольцев, 1985). Статистики выборок анализируемых показателей взятых модельных деревьев показаны в табл. 3. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки массы отмерших ветвей и надземной фитомассы на единице площади естественных сосняков, культур сосны и естественного березняка рассчитаны аллометрические модели:

$$\ln P_d \text{ и } \ln P_a = a_0 + a_1(\ln D). \quad (1)$$

Все полученные модели характеризуются достаточной степенью адекватности. Коэффициенты детерминации моделей (1) для *P_d* и *P_a* у березы составили 0.72 и 0.98, у сосны естественного происхождения – 0.41–0.90 и 0.96–0.99, у культур – 0.38–0.98 и 0.93–0.99, все на уровне значимости $p < 0.05$ и выше.

По материалам перечета деревьев на пробных площадях рассчитаны масса отмерших ветвей, надземная фитомасса (т/га) и относительная масса отмерших ветвей (%) (см. табл. 2). Для единственной пробной площади спелого березняка значения названных показателей составили соответственно 1.32 и 51.6 т/га и 2.5 % в естественных сосняках – соответственно 0.9–17 и 33–228 т/га и 0.7–13 %, а в культурах – соответственно 0.2–13 и 13–130 т/га и 1.3–11 %.

Далее построены зависимости массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей сосняков от возраста и средней высоты древостоя (густота и средний диаметр древостоя оказались статистически незначимыми). Ввод в модель бинарной переменной, кодирующей происхождение древостоев, показал ее значимость на уровне $p < 0,001$, а ее вклад в объяснение изменчивости массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей составил 29 %. Вследствие столь большой разницы отмеченных вкладов, регрессионные модели зависимости массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей от возраста и средней высоты древостоя рассчитаны для естественных сосня-

ков и культур отдельно. Получены модели для естественных сосняков:

$$P_d = 3.8309 - 2.6573 \ln A + 3.1077 \ln H; \\ \text{adj}R^2 = 0.729; \text{SE} = 0.44; \quad (2)$$

$$P_d/P_a = 5.8124 - 2.6843 \ln A + 2.3247 \ln H; \\ \text{adj}R^2 = 0.598; \text{SE} = 0.46; \quad (3)$$

и для лесных культур:

$$P_d = -1.2099 - 1.5262 \ln A + 3.5731 \ln H; \\ \text{adj}R^2 = 0.920; \text{SE} = 0.37; \quad (4)$$

$$P_d/P_a = 0.9011 - 0.9227 \ln A + 1.8505 \ln H; \\ \text{adj}R^2 = 0.748; \text{SE} = 0.35, \quad (5)$$

где P_d – масса отмерших ветвей, т/га; P_d/P_a – относительная масса отмерших ветвей, %; A – возраст древостоя, лет; H – средняя высота древостоя, м.

При расчете моделей (2)–(5) применена поправка свободного члена на логарифмическое преобразование (Baskerville, 1972). Все регрессионные коэффициенты в (2)–(5) достоверны на уровне $p < 0.001$. Модели (2) и (4) могут быть применены для оценки массы отмерших ветвей по данным таксации древостоев пробных площадей.

Для оценки возрастной динамики массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей модели (3) и (5) протабулированы по значениям возраста древостоя, средней высоты и надземной фитомассы таблиц хода роста по фитомассе древостоев естественного происхождения и культур Тургайского прогиба (Усольцев, 2002) (табл. 4).

Представленные данные могут быть переведены на показатели углеродного пула по коэффициенту 0.5 (Кобак, 1988).

Полученные закономерности показывают, что в естественных сосняках I класса бонитета масса отмерших ветвей в возрастном диапазоне 20–120 лет вначале увеличивается, достигая максимума в 80 лет (11.5 т/га), а к возрасту 120 лет снижается до 8.8 т/га (табл. 4). В древостоях II, III и IV классов бонитета происходит снижение массы отмерших ветвей соответственно на 35, 43 и 45 % по отношению к I классу. Аналогичный колоколообразный тренд в естественных древостоях наблюдается и для относительной массы отмерших ветвей с максимумом в возрасте 40 лет, и эти максимальные значения по классам бонитета составляют соответственно 7.1, 5.1, 3.5 и 2.2 %.

В культурах сосны в возрастном диапазоне 10–40 лет происходит монотонное увеличение массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей, с максимальными значениями в возрасте 40 лет в Ib, Ia и I классах бонитета соответственно по показателям массы отмерших ветвей 18.4, 13.1 и 9.0 т/га и относительной массы отмерших ветвей 14.7, 11.8 и 9.4 % (табл. 4).

Относительная масса отмерших ветвей спелого березняка на уровне 2.5 % и древостоев сосны в некоторых возрастах и классах бонитета на уровне 1–2 %, конечно, невелика, и может возникнуть вопрос о целесообразности учета массы отмерших ветвей в подобных случаях (табл. 4). Как известно, в статистическом оценивании различают две основные разновидности ошибок – случайные и систематические. Если случайная ошибка может быть скорректирована, например увеличением числа наблюдений, то систематическую ошибку этим снизить нельзя, и в расчетах углеродных пулов в лесах степной зоны необходимо вносить поправки на массу отмерших ветвей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлены положительные связи массы отмерших ветвей с диаметром ствола в естественных сосняках, культурах сосны и естественном спелом березняке, значимые на уровне $p < 0.05$ и выше. Коэффициент детерминации у березы составил 0.72, в естественном сосняке варьирует от 0.41 до 0.90 и в культурах – от 0.38 до 0.98.

В расчете на единицу площади в березняке масса отмерших ветвей составила 1.32 т/га и относительная масса отмерших ветвей – 2.5 %, в естественных сосняках – соответственно от 0.9 до 17 т/га и от 0.7 до 13 %, а в культурах – от 0.2 до 13 т/га и от 1.3 до 11 %.

Построенные зависимости массы отмерших ветвей и относительной массы отмерших ветвей на единице площади сосняков от возраста и средней высоты древостоя характеризуются коэффициентами детерминации от 0.60 до 0.92, и все достоверны на уровне $p < 0.001$. Предложенные модели могут быть применены для оценки массы отмерших ветвей по данным таксации древостоев пробных площадей.

Зависимости, построенные для относительной массы отмерших ветвей, совмещены с таблицами хода роста по надземной фитомассе древостоев естественного происхождения и культур Тургайского прогиба. Установлено, что

Таблица 4. Возрастная динамика расчетных значений массы отмерших ветвей (P_d , т/га) и относительной массы отмерших ветвей (P_d/P_a , %), совмещенных с ТХР по надземной фитомассе сосняков Тургайского прогиба

Возраст древостоя, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Сумма площадей сечений, м ² /га	Число стволов, тыс. экз./га	Запас, м ³ /га	Фитомасса, т/га					P_d/P_a , %
						стволы	хвоя	ветви	над- земная	P_d	
Сомкнутые сосняки островных боров Тургайского прогиба (Усольцев, 2002, С. 406)											
Класс бонитета I											
20	5.1	4.2	16.9	12.20	56	24.5	4.98	4.3	33.8	1.61	4.8
40	13.5	12.9	30.6	2.341	208	90.6	6.15	10.0	106.8	7.59	7.1
60	20.4	21.0	37.9	1.094	364	159.2	6.59	14.2	180.0	11.2	6.2
80	25.3	28.5	42.6	0.668	495	217.7	6.93	18.0	242.6	11.5	4.8
100	28.8	35.5	46.0	0.465	601	266.0	7.21	21.4	294.6	10.4	3.5
120	31.3	42.0	48.6	0.351	680	302.8	7.37	24.4	334.6	8.80	2.6
Класс бонитета II											
20	4.4	3.5	15.3	15.90	47	20.7	4.76	3.8	29.3	0.99	3.4
40	11.7	10.7	27.8	3.092	169	74.1	5.63	8.3	88.0	4.48	5.1
60	17.8	17.4	34.4	1.446	291	128.2	5.88	11.5	145.6	6.63	4.6
80	21.9	23.7	38.8	0.880	397	176.0	6.28	14.9	197.2	6.71	3.4
100	24.9	29.5	41.8	0.612	479	213.6	6.50	17.7	237.8	5.99	2.5
120	27.0	34.9	44.2	0.462	544	244.1	6.69	20.2	271.0	5.05	1.9
Класс бонитета III											
20	3.7	2.9	13.8	20.91	38	16.9	4.51	3.3	24.7	0.56	2.3
40	9.9	8.8	25.1	4.127	133	58.8	5.14	6.9	70.8	2.45	3.5
60	14.9	14.4	31.1	1.909	229	101.7	5.46	9.8	117.0	3.52	3.0
80	18.6	19.5	35.0	1.172	311	139.0	5.68	12.2	156.9	3.65	2.3
100	21.1	24.3	37.7	0.839	373	167.8	5.82	14.4	188.0	3.22	1.7
120	22.9	28.8	39.9	0.612	424	191.9	6.04	16.6	214.5	2.73	1.3
Класс бонитета IV											
20	3.0	2.3	12.3	29.66	31	13.9	4.45	2.9	21.3	0.29	1.4
40	8.1	7.0	22.4	5.816	102	45.5	4.71	5.7	55.9	1.21	2.2
60	12.2	11.4	27.7	2.713	173	77.6	4.92	7.9	90.4	1.71	1.9
80	15.1	15.5	31.2	1.652	232	104.7	5.12	9.9	119.7	1.72	1.4
100	17.2	19.3	33.7	1.150	280	127.2	5.28	11.7	144.2	1.54	1.1
120	18.7	22.9	35.6	0.863	317	144.9	5.42	13.4	163.7	1.30	0.8
Культуры сосны островных боров Тургайского прогиба (Усольцев, 2002, С. 463)											
Класс бонитета Ib											
10	4.0	4.6	11.4	6.829	32	11.3	5.96	3.9	21.2	0.81	3.8
20	8.5	10.9	26.3	2.813	121	41.8	8.81	8.7	59.3	4.83	8.1
30	12.7	15.2	35.0	1.927	210	74.2	8.95	10.4	93.5	11.0	11.8
40	16.5	17.4	39.1	1.646	293	106.5	8.55	10.7	125.7	18.4	14.7
Класс бонитета Ia											
10	3.6	4.2	10.6	7.646	30	10.6	6.17	3.9	20.7	0.65	3.1
20	7.6	9.5	24.5	3.475	104	36.4	8.23	7.7	52.3	3.46	6.6
30	11.3	13.5	32.6	2.281	179	63.9	8.42	9.4	81.7	7.75	9.5
40	14.7	15.6	36.5	1.912	252	92.4	8.14	9.8	110.3	13.1	11.8
Класс бонитета I											
10	3.1	3.8	9.8	8.677	26	9.2	6.19	3.8	19.2	0.46	2.4
20	6.7	8.2	22.8	4.308	89	31.5	7.77	6.9	46.2	2.42	5.2
30	10.0	12.0	30.3	2.680	153	55.1	8.01	8.6	71.7	5.43	7.6
40	13.0	13.6	33.9	2.334	214	79.4	7.63	8.8	95.8	9.03	9.4

Примечание. Значения P_d и P_d/P_a получены расчетом по моделям (3) и (5), а остальные показатели перенесены из таблиц хода роста по фитомассе древостоев естественного происхождения и культур Тургайского прогиба.

с возрастом относительная масса отмерших ветвей естественных сосняков изменяется по колоколообразной кривой, достигая максимального значения (7.1 %) в I классе бонитета. В культурах относительная масса отмерших ветвей монотонно увеличивается с возрастом, достигая в 40 лет в Ib классе бонитета около 15 %.

Предложенные аллометрические модели и таксационные таблицы могут быть использованы при оценках массы отмерших ветвей сосны обыкновенной. При расчетах углеродных пулов в лесах степной зоны необходимо применять повышающий коэффициент на пул массы отмерших ветвей: в сосняках – от 0.8 до 15 % и в спелых березовых лесах – 2.5 %.

Работа выполнена по государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабич Н. А., Мерзленко М. Д., Евдокимов И. В. Фитомасса культур сосны и ели в Европейской части России. Архангельск: Соломбальская тип., 2004. 112 с.
- Бобкова К. С., Тужилкина В. В., Кузин С. Н. Углеродный цикл в еловых экосистемах северной тайги // Экология. 2006. № 1. С. 23–31.
- Бобкова К. С., Машика А. В., Смагин А. В. Динамика содержания углерода органического вещества в средне-таежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
- Ватковский О. С. Анализ формирования первичной продуктивности лесов. М.: Наука, 1976. 116 с.
- Ведрова Э. Ф., Спиридонова Л. В., Стаканов В. Д. Круговорот углерода в молодняках основных лесообразующих пород Сибири // Лесоведение. 2000. № 3. С. 40–48.
- Габеев В. Н. Экология и продуктивность сосновых лесов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 229 с.
- Замолодчиков Д. Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
- Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Коровин Г. Н., Честных О. В. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России // Экология. 2005. № 5. С. 323–333.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1973. 175 с.
- Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 248 с.
- Коломыц Э. Г. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука, 2020. 423 с.
- Курбанов Э. А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 300 с.
- Мешнев Т., Николов В. Биологическая продуктивность ассоциации *Quercus cerris* – *Quercus frainetto* – *Carpinus orientalis* – *Mixtoherbosa* из района Еленского предгорья // Наука за гората. 1990. № 3. С. 34–39 (на болгар. яз., реф. на рус.).
- Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.
- Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в березовых древостоях Московской области // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 141–161.
- Патронов Д. Вверху фракционного распределение на надземната фитомаса в млади насаждения в Странджа // Горскостопанска наука. 1984. Т. 21. № 1. С. 37–46 (на болгар. яз., реф. на рус.).
- Рожков В. А., Вагнер В. В., Козут Б. М., Конюшков Д. Е., Шеремет Б. В. Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В. Н. Сукачева, М.: Наука, 1997. Т. 15. С. 5–58.
- Романовская А. А., Трунов А. А., Коротков В. Н., Карabanь Р. Т. Проблема учета поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. 2018. № 5. С. 323–334.
- Семечкина М. Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 165 с.
- Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах Европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362 с.
- Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. ун-та, 1985. 192 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>
- Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии. Нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>
- Уткин А. И., Ермолова Л. С. Первичная продуктивность культур сосны обыкновенной Ульяновского Поволжья // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука, 1982. С. 186–195.
- Честных О. В., Лыжин В. А., Кокиарова А. В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.
- Benčat T. Black locust biomass production in Southern Slovakia. Bratislava: VEDA, 1989. 191 p.
- Bobkova K. S., Tuzhilkina V. V., Kuzin S. N. Carbon cycle in spruce ecosystems of the northern Taiga subzone // Rus. J. Ecol. 2006. V. 37. Iss. 1. P. 19–27 (Original Rus. Text © K. S. Bobkova, V. V. Tuzhilkina, S. N. Kuzin, 2006, publ. in Ekologiya. 2006. N. 1. P. 23–31).
- Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V. A., Lakyda P., Luo Y., Vasylyshyn R., Lakyda I., Myklush Y., See L., McCallum I., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A dataset of forest biomass structure for Eurasia // Sci. Data. 2017. V. 4. № 1. Article number: 170070.
- Statgraphics-19. Statgraphics Technologies, Inc. The Plains, Virginia, 2022. <http://www.statgraphics.com/>
- Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural St. For. Engineer. Univ.; Bot. Garden Ural Br. Rus. Acad. Sci., 2020.

Усыкот М. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.
Усыкот М. *Larix decidua* Mill. in biomass // Rozprawy Československé Akademie Véd. Rada Matematických a Prirodních Véd. Praha. 1982. V. 92. Iss. 8. 162 p.

Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Korovin G. N., Chestnykh O. V. Dynamics of carbon pools and fluxes in Russia's forest lands // Rus. J. Ecol. 2005. V. 36. Iss. 5. P. 291–301 (Original Rus. Text © 2005, D. G. Zamolodchikov, A. I. Utkin, G. N. Korovin, O. V. Chestnykh, publ. in Ekologiya. 2005. N. 5. P. 323–333).

MODELS AND TABLES OF THE PHYTOMASS OF DEAD BRANCHES IN GROWING TREES OF SCOTS PINE AND SILVER BIRCH IN THE STEPPE ZONE

V. A. Usoltsev^{1,2}, I. S. Tsepordey¹

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskii trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru

Under conditions of a changing climate, the relevance of assessing the full carbon pool of all components of forest ecosystems increases, not only of the living aboveground and underground parts, but also of litter, large detritus, soils, etc. There are numerous estimates of the phytomass of the aboveground part of forest trees and stands, both taking into account the mass of branches that have died and preserved on tree stems, and without taking them into account. There is no information about the mass of dead branches on tree stems in the available databases on the phytomass of trees. Thus, the mass of dead branches of trees and stands is not included in the calculation of both the input and output components of the carbon cycle, and when estimating the carbon pool of forest ecosystems, it is underestimated by some unknown amount. In the published data on the phytomass of trees, the relative mass of dead branches, i.e. the ratio of the mass of dead branches to the aboveground phytomass, varies from 0.1 to 26 %, however, attempts to identify factors explaining such a wide range of it are quite rare. In this study, the first attempt was made to develop allometric models designed to estimate the mass of dead branches of growing trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of the steppe zone. The study was based on 465 model trees obtained on 35 sample plots. It was found that in the mature birch stand, the mass of dead branches is 1.32 t/ha and relative mass of dead branches is 2.5 %, in natural pine forests 0.9–17 t/ha and 0.7–13 %, respectively, and in plantations 0.2–13 t/ha and 1.3–11 %, respectively. The dependencies constructed for the relative mass of dead branches are combined with yield tables of the aboveground phytomass of stands of natural origin and plantations of the Turgay Depression. It was found that, depending on the origin of the stand, its age and site index, the relative mass of dead branches varies from 0.8 to 15 %. The proposed allometric models and inventory tables can be used in the assessment of the mass of dead branches on tree stems of pine stands. When calculating carbon pools in the forests of the steppe zone, it is necessary to take into account the mass of dead branches by applying increasing coefficients in pine forests from 0.8 to 15% and in mature birch forests 2.5 %.

Keywords: natural tree stands, forest crops, *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, mass of dead branches, allometric models, corrections to the carbon pool.

How to cite: Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Models and tables of the phytomass of dead branches in growing trees of Scots pine and Silver birch in the steppe zone // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 6. P. 58–65 (in Russian with English abstract and references).