

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*181.9(470.317)

**НАТУРНАЯ И МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДА ВАЛЕЖА
В ЛЕСАХ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ***

© 2013 г. Д. Г. Замолодчиков^{1,2}, В. И. Грабовский¹, В. В. Каганов¹

¹ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

²ФГБОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический ф-т

Поступила в редакцию 20.11.2012 г.

Проведены учеты валежа на линейных трансектах в лесах Костромской обл. различного возраста и породного состава. Учетные данные пересчитаны в объемы и запасы углерода валежа на единице площади. Средний объем валежа в обследованных лесах равен $26.99 \pm 4.20 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ при содержании углерода в нем $6.99 \pm 1.05 \text{ т С га}^{-1}$. В насаждениях с преобладанием ели средний запас углерода валежа составил 4.72 ± 1.40 , сосны – 9.14 ± 1.70 , березы и осины – $7.27 \pm 2.63 \text{ т С га}^{-1}$. Выявлена тенденция к увеличению запасов углерода валежа с возрастом насаждения. Полученные натурные значения количественно близки к результатам оценки лесов Костромской обл. по ранее разработанной модели формирования пула крупных древесных остатков. Модельные значения углерода валежа для всей площади лесов Костромской обл. ($4394.5 \times 10^3 \text{ га}$) находятся в пределах $18.9\text{--}37.6 \times 10^6 \text{ т С}$.

Лесные насаждения, преобладающие породы, возраст древостоя, крупные древесные остатки, валеж, разложение, запас углерода, моделирование, линейные трансекты.

В связи с быстрыми наблюдаемыми изменениями климата, существенной причиной которых является возрастание концентрации парниковых газов в атмосфере, все большую важность приобретает адекватная оценка пулов и потоков углерода в наземных экосистемах, в том числе бореальных лесах. Лесная растительность в процессе фотосинтеза связывает углекислый газ (основной по вкладу в современный рост парникового эффекта атмосферы), тем самым перемещая углерод атмосферы в пул биомассы. Процессы отмирания биомассы (опад и отпад) приводят к переходу углерода в пул мертвого органического вещества (МОВ). Важным компонентом пула МОВ в лесных экосистемах является валеж. Его пополнение идет из пулов биомассы и сухостоя. При

разложении валежа углерод переходит в пулы атмосферы и верхнего слоя почвы. Существует ряд работ, в которых осуществлена оценка запасов и величина потоков углерода в пуле крупных древесных остатков (КДО), включающем сухостой и валеж [6, 17, 19]. Однако собственно пул валежа остается менее изученным [17]. Особый интерес представляют сведения по связи запасов валежа с породным и возрастным составом лесов. Накопление массивов натуральных данных позволит в будущем получить типовые значения для различных категорий лесных насаждений и провести уточненные оценки углерода валежа в региональном масштабе.

Основная цель настоящей работы состояла в количественной характеристике запасов углерода валежа лесов Костромской обл. различного породного и возрастного состава. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) проведение учетов валежа на пробных площа-

* Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (соглашение № 8107) и РФФИ (11–04–01486-а).

Таблица 1. Таксационное описание древостоев, длина трансект, объем и запас углерода валежа на пробных площадях Костромской обл.

№ пр.пл.	Состав древо-стоя	Преобладающая порода	Координаты		Средний возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, м	Запас насаждения, м ³ га ⁻¹	Длина трансект, м	Объем валежа, м ³ га ⁻¹	Углерод валежа, т С га ⁻¹
			сев. широты	вост. долготы							
1	5Б4Е1С	Е	58°10.114'	44°24.308'	60	28	44	68.1	600	8.20	2.11
2	10Б	Б	58°10.161'	44°24.009'	30	22	17	142.9	200	7.21	1.81
3	5Ос5С	С	58°10.029'	44°23.741'	87	20	31	168.0	140	8.15	2.53
4	6С3Б1Е	С	58°10.029'	44°23.741'	60	25	28	268.2	100	31.72	8.15
5	10С	С	58°09.543'	44°19.733'	83	27	31	300.4	133	51.57	16.02
6	10С	С	58°06.308'	44°12.098'	56	20	22	135.4	150	14.98	3.91
7	10С	С	58°06.278'	44°12.339'	80	25	27	240.5	100	37.89	11.77
8	10С	С	58°06.643'	44°08.903'	60	19	20	107.8	100	32.71	8.40
9	10С	С	58°08.439'	44°27.234'	73	21	27	177.4	100	16.17	3.97
10	8С2Б	С	58°09.945'	44°20.213'	95	27	33	325.5	100	85.88	18.32
11	6Е1С3Б	Е	58°10.132'	44°23.599'	90	24	30	230.9	50	9.63	2.06
12	6Е2С2Б+Ос	Е	58°10.346'	44°24.848'	78	21	29	180.3	200	10.37	2.55
13	5Е1С2Б2Ос	Е	58°10.551'	44°24.511'	97	24	39	281.4	200	12.34	2.63
14	7Е2Б1С+Ос	Е	58°10.486'	44°24.221'	92	26	35	301.1	200	13.95	2.98
15	4Е2С2Б2Ос+Пх	Е	58°10.633'	44°24.397'	89	21	29	178.3	250	6.32	1.96
16	5Лп3Е2Б	Лп	58°48.103'	44°58.774'	150	27	54	320.1	200	50.33	12.89
17	6Е1С3Б	Е	58°10.223'	44°22.822'	73	25	35	328.2	300	9.40	2.31
18	5С3Е2Б	С	58°09.802'	44°23.369'	88	22	32	210.3	250	6.54	2.03
19	4Е3С3Б	Е	58°09.740'	44°23.099'	84	27	37	360.9	150	13.56	4.21
20	4Б2С2Ос1Е	Б	58°09.713'	44°23.130'	52	24	32	299.6	200	17.03	4.65
21	6Б4Е	Б	58°10.219'	44°22.915'	58	25	22	206.8	100	52.32	14.28
22	4Е2С2Б2Ос	Е	58°10.185'	44°22.804'	87	29	38	441.6	150	13.69	4.25
23	7Ос2С1Е1Б	Ос	58°10.334'	44°22.895'	91	30	39	441.4	200	12.63	2.70
24	4С4Б2Е	С	58°10.443'	44°22.806'	71	27	33	356.0	150	47.00	11.55
25	5С5Ос	С	58°10.650'	44°22.808'	105	30	44	460.3	150	54.27	13.90
26	10Е	Е	58°47.044'	43°58.113'	144	30	31	250.8	100	39.21	10.04
27	8Е2Ол	Е	58°00.280'	44°33.872'	120	24	36	215.0	150	65.69	16.83

Примечание. Е – ель, С – сосна, Пх – пихта, Б – береза, Ос – осина, Ол – ольха, Лп – липа

дах методом линейных трансект; 2) расчет типовых значений для различных категорий лесов по натурным данным; 3) сравнение натуральных величин с оценками, полученными по ранее разработанной модели формирования пула КДО [6, 12]; 4) получение модельной оценки углерода валежа для всей площади лесов Костромской обл.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ

Полевые работы проводили в летние месяцы 2007–2011 гг. в Мантуровском, Костромском и Кологривском р-нах Костромской обл. В районах полевых работ в прошлом проводились активные лесохозяйственные мероприятия, потому большинство исследованных участков (табл. 1) представляют собой заросшие вырубki различного возраста. Исключением являются пробные площади № 16 и № 26, расположенные в первичном лесу заповедника “Кологривский лес”. Известно, что последние 300 лет эти насаждения не испытывали нарушений (рубok, пожаров).

На выбранных участках леса проводили оценку таксационных характеристик древостоя по стандартным методикам и учеты валежа на линейных трансектах. Суммарная протяженность трансект за все годы составила 4873 м. Учитывали размеры всех фрагментов дебриса, наибольший диаметр которых был не менее 5 см. Замеряли наибольший и наименьший диаметры, диаметр в месте пересечения с линией трансекты и общую длину фрагмента. Помимо этого оценивали степень разложения валежа. В основу оценки класса разложения валежника положены критерии, предложенные Р.Ф. Трейфельдом с соавторами [14, 15]:

1-й класс – полное покрытие корой, присутствуют как мелкие, так и крупные сучья, может присутствовать листва или хвоя, древесина твердая;

2-й класс – кора начинает отслаиваться, мелкие ветви частично или полностью отсутствуют, следов заметного разложения древесины нет;

3-й класс – кора частично отсутствует, присутствуют только крупные ветви, разложение древесины заметно;

4-й класс – кора отсутствует или покрывает незначительную часть фрагмента, ветви отсутствуют, разложение древесины велико – продавливается пяткой на значительную часть ствола, ствол сохраняет округлую форму;

5-й класс – кора полностью отсутствует, ветвей нет, разрушается пяткой на всю глубину диамет-

Таблица 2. Плотность валежа по классам разложения [по 18]

Класс разложения	Плотность, г см ⁻³	
	хвойные	лиственные
1	0.378	0.502
2	0.319	0.472
3	0.226	0.284
4	0.109	0.126
5	0.065	0.126

ра, форма поперечного сечения ствола сильно деформирована.

Расчет объемов валежа в дифференциации по классам разложения осуществлен при помощи программного обеспечения, охарактеризованного в работе [4] и представленного на веб-сайте ЦЭПЛ РАН [3]. Пересчет из объема в массу валежа осуществлен по значениям плотности (табл. 2), приведенным в работе [18]. Известно, что содержание углерода на единицу массы мертвых стволов деревьев по мере их разложения меняется несущественно [11], потому перевод массы валежа в углерод осуществлен с использованием единого коэффициента 0.5.

Последующая обработка натуральных данных состояла в расчете средних значений объема и углерода валежа по породным и возрастным категориям лесных насаждений. В качестве меры неопределенности средних значений использовали стандартную ошибку, равную отношению среднеквадратичного отклонения к корню квадратному из размера выборки. Классификацию пробных площадей по группам возраста (средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные) осуществляли при условиях, что класс возраста у хвойных равен 20 годам, у лиственных – 10 годам, возраст рубки для сосны и ели составляет 80 лет, березы и липы – 60 лет, осины – 50 лет.

Ранее нами была предложена модель [12], позволяющая рассчитывать запасы КДО в лесном насаждении по сумме остаточных масс когорт отпада. Под когортой понимается совокупность древесных остатков, отпавших в насаждении за определенный год. Годичные величины отпада оцениваются по запасу древесины лесного насаждения с использованием коэффициентов, идентифицированных по таблицам хода роста [5]. Остаточная масса когорт отпада рассчитывается как функция от времени разложения, среднего диаметра остатков и коэффициента увлажнения [10]. Детальное описание алгоритмов и процедур реализации модели приведено в работах [6, 12].

В качестве исходных данных модель формирования пула КДО использует сведения Государственного лесного реестра либо государственных учетов лесного фонда о площадях и запасах древесины в лесах региона, дифференцированные по группам возраста преобладающих пород. Результатом моделирования являются величины пула КДО для породно-возрастных категорий лесных насаждений и эмиссий от его разложения. Поскольку в настоящей статье речь идет о валеже, в модель были введены дополнительные модификации, позволившие вычленил данный пул из общего запаса КДО. Во-первых, из общей массы отпада была выделена фракция стволов, во-вторых, из сформированного моделью пула мертвой стволовой древесины была удалена масса сухостоя, определенная по коэффициентам из работы [8]. Благодаря указанным модификациям результат моделирования характеризует совокупность когорты разлагающихся стволов, лежащих на поверхности почвы, то есть полностью соответствует фракции КДО, запасы которой были определены в натурных исследованиях. Модельные расчеты осуществлены на данных Государственного лесного реестра для Костромской обл. по состоянию на 1 января 2010 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Найденные значения объема и запаса углерода валежа на пробных площадях представлены в табл. 1. Средний по всем пробам объем валежа составил $26.99 \pm 4.20 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ при диапазоне вариации $6.32\text{--}85.88 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$. Аналогичные характеристики для запаса углерода валежа равны 6.99 ± 1.05 и $1.81\text{--}14.28 \text{ т С га}^{-1}$. Отношение максимального к минимальному значению для объема валежа составляет 13.6, для запаса углерода – 10.1, такое же отношение для объемного запаса растущей части насаждения равно 6.8. Таким образом, относительный диапазон вариаций валежа почти в 2 раза превышает таковой для запаса насаждения.

Распределение объема и запасов углерода валежа по классам разложения для всех обследован-

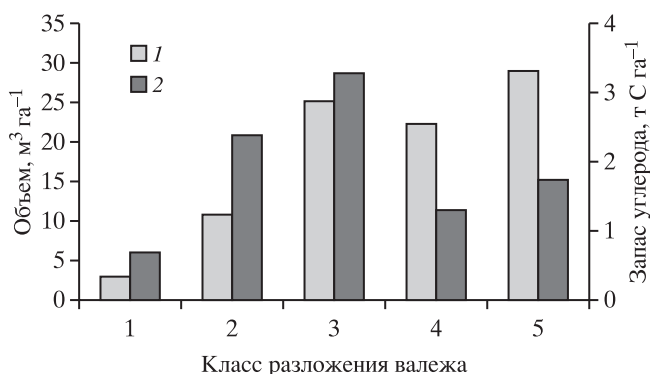


Рис. 1. Объем (1) и запас углерода (2) валежа по классам разложения в лесах Костромской обл.

ных пробных площадей представлено на рис. 1. Основная часть объема валежа (85%) приходится на 3, 4 и 5-й классы разложения. Такое распределение в первую очередь вызвано различиями в длительности пребывания валежа в разных классах разложения. Допустив, что сильные вариации в величинах годичного отпада за время развития насаждения отсутствуют, можно приблизительно оценить относительные длительности пребывания валежа в разных классах разложения. Приняв длительность пребывания валежа в 1-м классе разложения за 1.0, для последующих классов получим следующие оценки: 3.6, 8.2, 7.3, 9.5. В отличие от объема, наибольшая доля углерода сосредоточена в валеже 3-го класса разложения (35%). Очевидно, такая картина связана с потерей массы углерода на единицу объема валежа в поздних стадиях разложения.

Большие средние объемы валежа присутствуют в сосняках ($35.17 \pm 7.19 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) и лиственных насаждениях ($27.91 \pm 9.69 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$), меньшие – в ельниках ($18.40 \pm 5.43 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$). Сходным образом распределены и запасы углерода валежа (табл. 3). Распределения объема валежа по классам разложения отличаются у насаждений с разными преобладающими породами (рис. 2, А). Если в сосновых насаждениях наибольшим по объему оказывается валеж 5-го класса разложения, то в еловых доминирует 4-й класс, а в лиственных лесах модальный (наиболее весомый) класс сов-

Таблица 3. Объемы и запасы углерода валежа в лесах Костромской обл. с дифференциацией по преобладающим породам

Преобладающая порода	Объем, $\text{м}^3 \text{ га}^{-1}$			Запас углерода, т С га^{-1}			Число проб
	среднее	минимум	максимум	среднее	минимум	максимум	
Сосна	35.17 ± 7.19	6.54	85.88	9.14 ± 1.70	2.03	18.32	11
Ель	18.40 ± 5.43	6.32	65.69	4.72 ± 1.40	1.96	16.83	11
Все лиственные	27.91 ± 9.69	7.21	52.32	7.27 ± 2.63	1.81	14.28	5

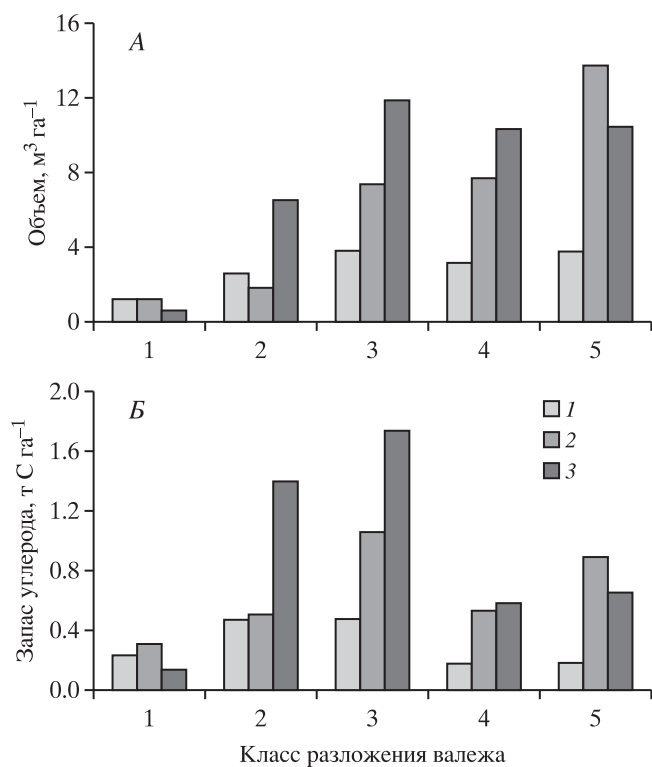


Рис. 2. Объем (А) и запас углерода (Б) по классам разложения в лесах Костромской обл. с различными преобладающими породами: 1 – ель, 2 – сосна, 3 – лиственные.

падает с медианным – 3-м классом разложения. Распределения запаса углерода валежа по классам разложения симметричны для всех пород: медианный класс распределения совпадает с модальным, 3-м классом (рис. 2, Б).

Связь запасов углерода валежа с возрастом древостоя неоднозначна (рис. 3). С одной стороны, прослеживается тенденция к увеличению данного показателя с возрастом, с другой – положительная линейная связь не является статистически значимой ($P = 0.07$). Отсутствие статистической достоверности связи углерода валежа с возрастом древостоя определяется высокой вариацией исходных данных, особенно в интервале возраста от 60 до 100 лет. Высокая дисперсия запасов КДО в целом и валежа в частности отмечалась и в других работах [1, 9]. Эти вариации могут быть вызваны различными причинами, в частности, нарушениями (ветровалы, биогенные и климатогенные усыхания), лесохозяйственными мероприятиями (рубки ухода, очистка леса от захламленности), конкурентными взаимодействиями в смешанных производных древостоях.

Более выраженной связью углерода валежа с возрастом древостоя становится при рассмотре-

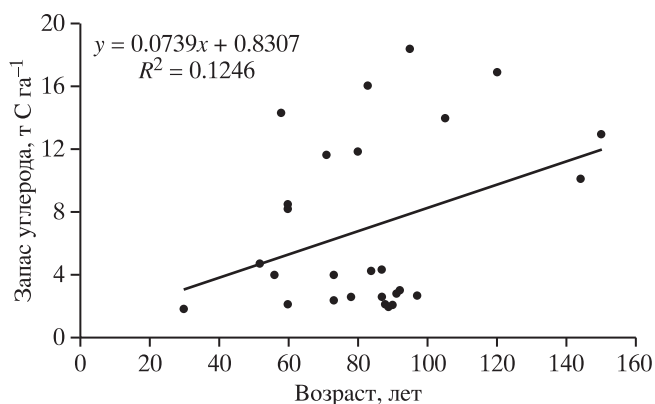


Рис. 3. Связь запаса углерода валежа с возрастом древостоя в лесах Костромской обл.

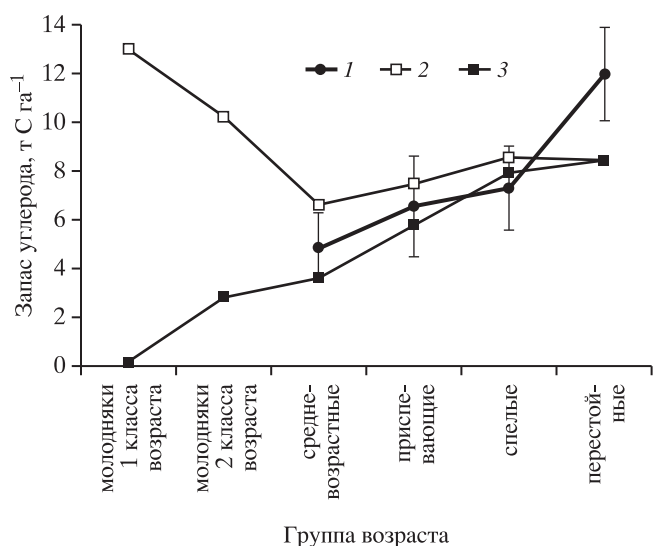


Рис. 4. Распределение запасов углерода валежа по группам возраста в лесах Костромской обл.: 1 – полевые данные, 2 и 3 – модельные оценки U- и S-формы соответственно.

нии динамики средних значений по группам возраста (рис. 4). В средневозрастных насаждениях запас углерода валежа равен 4.88 ± 1.43 т С га⁻¹, далее он постепенно увеличивается вплоть до максимального значения в группе перестойных (11.97 ± 1.93 т С га⁻¹). К сожалению, обследованные пробные площади не включали насаждений, относящихся к группам молодняков. Такая ситуация не позволяет нам по натурным данным сделать заключение о характерной форме возрастной зависимости запаса валежа в лесах Костромской обл.

Известны две основные характерные формы возрастного распределения КДО в лесных насаждениях: S- и U-образное [2, 19–21]. S-образное распределение формируется в том случае, когда

лесное насаждение возобновляется на месте, где полностью отсутствуют запасы КДО от предшествующих насаждений. Примерами таких ситуаций являются зарастание заброшенных пахотных земель или лесовосстановление на местах применения огневого способа очистки лесосек. В малых возрастах насаждения запасы КДО близки к нулю, затем они начинают постепенно возрастать за счет новообразования, в старших возрастах стабилизируются на определенном уровне. *U*-образное распределение возникает при наличии больших запасов КДО, наследуемых насаждением, возобновляющимся от предшествующего погибшего, например, в случае естественного лесовозобновления на горячих, ветровалах, вырубках без применения мер очистки. Значительные запасы наследуемых КДО здесь приходится на наиболее молодые насаждения. Далее за счет разложения запас наследуемых КДО снижается, причем темпы формирования новообразованных КДО не компенсируют данное снижение. Минимальное значение *U*-образного распределения достигается в том возрасте насаждения, когда темпы новообразования древесных остатков сравниваются с уровнем разложения наследуемых КДО.

Модель формирования пула КДО позволяет осуществить имитацию обоих изложенных выше вариантов. В случае *S*-формы запас валежа в начале развития насаждения принимается равным нулю. Для *U*-формы задаются правила наследования валежа от предшествующего насаждения с учетом типа нарушения (сплошная рубка, деструктивный пожар) и потери его массы за время, необходимое для появления сомкнутого лесного насаждения на вырубке либо гари. Отметим, что согласно сведениям Государственного лесного реестра на 1 января 2010 г., в Костромской обл. имелось 66.5×10^3 га вырубок, 1.6×10^3 га погибших насаждений, 0.5×10^3 га гарей. Следовательно, основной тип деструктивного нарушения лесного покрова представлен в области сплошными рубками.

Результаты модельной оценки запасов углерода валежа представлены на рис. 4. Для групп средневозрастных, приспевающих и спелых модельные оценки находятся в пределах неопределенности натуральных величин, что позволяет сделать вывод об их количественном совпадении. Отметим, что для средневозрастных и спелых натурные величины располагаются между модельными оценками *S*- и *U*-формы. Этот факт вполне логично объясняется тем, что деятельность по очистке вырубок снижает запасы наследуемого валежа, но не приводит к его полному отсутствию. В группе перестойных натурная оценка несколько

выше модельных, здесь может сказываться малая выборка натуральных данных, включающая всего 2 пробные площади.

Отсутствие натуральных данных по молодым лесным насаждениям не позволяет осуществить однозначный выбор между *S*- и *U*-формой модельной имитации. Следует принять, что *S*-форма дает минимальную, а *U*-форма – максимальную оценку. Модельный расчет суммарных запасов углерода валежа для лесов Костромской области представлен в табл. 4. Для общей площади лесов 4394.5×10^3 га минимальная оценка углерода валежа равна 18.89×10^6 т С, максимальная – 37.64×10^6 т С. Воспользовавшись результатами расчетов углеродного пула фитомассы лесов Костромской обл. [7], получим, что в валеже сосредоточено 8.9–17.6% от запаса углерода в надземной фитомассе древостоя. Доля валежа от надземного пула углерода КДО (сумма сухостоя и валежа) составляет 45.0–61.9%.

В связи с отсутствием информации по молоднякам суммарная оценка углерода валежа на основе натуральных данных возможна лишь для групп средневозрастных и более старших лесных насаждений. Для общей площади этих групп возраста, равной 3145.3×10^3 га, запас углерода валежа составляет $22.85 \pm 7.03 \times 10^6$ т С. Эта величина находится между минимальной (16.97×10^6 т С) и максимальной (23.15×10^6 т С) модельными оценками, причем оба модельных значения находятся в пределах неопределенности натурального. Данное сравнение подтверждает тезис о количественном совпадении натуральных и модельных результатов.

Вклад в общую площадь лесов Костромской обл. насаждений с преобладанием сосны составляет 23.3%, ели – 23.8%, березы – 41.8%, осины – 0.90%. Вклады этих пород в запас углерода валежа средневозрастных и более старших лесов равны 27.0, 10.3, 50.6 и 9.5% соответственно. По сравнению с площадью, ель уменьшает свой вклад в суммарный углерод валежа, остальные породы увеличивают. Такая картина определяется наименьшими в расчете на единицу площади натурными величинами углерода валежа в еловых насаждениях (табл. 3). Модель уверенно воспроизводит различия средних значений углерода валежа между сосной и елью, отношение которых составляет 1.5–1.6. Модельная оценка среднего значения углерода валежа для осины практически идентична натурному значению по всем листовым, а вот для березы присутствует некоторое занижение. Следует признать, что модель удовлетворительно воспроизводит породные различия

Таблица 4. Площади, запасы древесины и оценки суммарного углерода валежа в лесах Костромской обл.

Порода, группа пород	Группа возраста	Площадь, 10 ³ га	Запас, 10 ⁶ м ³	Углерод валежа, 10 ⁶ т С		
				натурная оценка	модельная оценка	
					S-форма	U-форма
Сосна	молодняки	350.2	30.9	6.17±1.14	0.93	4.17
	средневозрастные и старше	674.6	155.7		4.50	7.03
	итого	1024.8	186.6		5.44	11.20
Ель	молодняки	545.8	29.3	2.35±0.70	0.76	8.17
	средневозрастные и старше	498.4	128.1		2.94	4.31
	итого	1044.2	157.4		3.71	12.48
Все хвойные	молодняки	896.4	60.3	8.52±1.84	1.70	12.34
	средневозрастные и старше	1173.4	283.8		7.75	11.65
	итого	2069.8	344.1		9.45	23.99
Береза	молодняки	243.6	7.9	11.57±4.19	0.14	1.51
	средневозрастные и старше	1592.4	277.6		7.18	9.09
	итого	1836.0	285.4		7.31	10.60
Осина	молодняки	97.1	4.1	2.17±0.79	0.09	0.59
	средневозрастные и старше	299.3	65.9		2.21	2.48
	итого	396.4	70.0		2.30	3.07
Все мягко-лиственные	молодняки	352.8	12.3	14.33±5.19	0.22	2.15
	средневозрастные и старше	1971.4	351.8		9.85	12.12
	итого	2324.2	364.1		10.07	14.27
Все породы	молодняки	1249.2	72.6	22.85±7.03	1.92	14.49
	средневозрастные и старше	3145.3	635.7		16.97	23.15
	итого	4394.5	708.3		18.89	37.64

в средних на единицу площади запасах углерода валежа.

Сравним общие величины объемных запасов и углерода валежа, полученные нами и другими исследователями в относительно близких типах лесного покрова. Цитируемые оценки представляют собой средние значения и пределы вариации либо по совокупности обследованных пробных площадей [1, 9, 16], либо по породно-возрастным категориям лесных насаждений [2, 13, 17, 19, 21]. Если исходная работа содержала лишь значения суммарной величины КДО без детализации по фракциям, они были пересчитаны нами в валеж с использованием коэффициента 0.53, найденного по модели формирования пула КДО для лесов Костромской обл.

Средние региональные оценки объема валежа в цитируемых работах варьируют от 8.5 [19] до 52.7 [9] м³ га⁻¹ (табл. 5), наша натурная оценка (27.0 м³ га⁻¹) оказывается близкой к медиане данного диапазона. Средние региональные запасы углерода валежа изменяются от 3.0 [2] до 20.1 [1] т С га⁻¹, наша модельная оценка S-формы ближе к минимальному значению, а U-формы – к середине диапазона. Следовательно, наши результаты

вполне согласуются с данными, полученными другими авторами.

Обратим более детальное внимание на региональные значения углерода валежа. Большинство из них группируется в области 3–5 т С га⁻¹ [2, 13, 16, 17], сюда же относится и наша модельная оценка S-формы. В основном эти оценки относятся к лесным регионам с преобладанием вторичных лесных насаждений. Работа, осуществленная в коренных типах леса, сохранившихся в национальных парках, привела к получению более высокой оценки углерода валежа [9]. Наиболее высокие средние запасы углерода валежа в темнохвойных лесах южной тайги [1]. Авторы цитируемой работы полагают, что причина состоит в оставлении больших объемов порубочных остатков, что, в свою очередь, может быть связано с проведением санитарных рубок в местах вспышек сибирского шелкопряда.

Проведенное сравнение опубликованных данных по объемам и углероду валежа приводит к выводу, что на их географические вариации в большей степени влияют режимы нарушений и история лесохозяйственной деятельности, чем естественный отпад или климатические факторы, контролирующие скорость разложения КДО.

Таблица 5. Сравнение различных оценок объема и запаса углерода валежа

Регион, категория лесов	Объем, м ³ га ⁻¹	Запас углерода, т С га ⁻¹	Источник
Костромская обл., средневозрастные и более старые леса	27.0±4.2 (6.3–85.9)	7.0±1.1 (1.8–18.3)	Настоящая работа, среднее по пробным площадям
Костромская обл., все леса	–	4.3 (0.2–8.4)	Настоящая работа, модельная оценка, S-форма
Костромская обл., все леса	–	8.6 (6.6–13.0)	Настоящая работа, модельная оценка, U-форма
Марийское Заволжье, сосняки	17.3 (8.4–29.2)	3.0 (1.8–4.5)	[2]
Красноярский край, темнохвойные леса южной тайги	–	20.1 (2.7–37.2)	[1]
Среднее Поволжье, сосняки	37.5 (1.1–115.5)	4.5 (0.3–13.0)	[13]
Леса национальных парков северо-запада Русской равнины	52.7 (1.1–173.8)	9.8 (0.2–28.9)	[9]
Приенисейская Сибирь, сосняки лишайниковые	–	3.2 (0.5–7.8)	[16]
Россия, южная тайга	23.2	3.5	[17]
Ленинградская обл., все леса	10.1 (6.4–12.7)	–	[19]
Центральный округ России, все леса	8.5 (5.3–17.0)	–	[19]
Новгородская обл., все леса	36.1 (8.6–87.8)	–	[21]

Примечание. В скобках приведены диапазоны вариации, курсивом выделены значения, пересчитанные из суммарной величины КДО.

Значительные изменения землепользования (за-растание лесом выбывших из оборота земель сельскохозяйственного назначения) и интенсивные формы лесопользования (очистка вырубок и гарей, создание лесных культур) способствуют формированию низких запасов валежа в молодых и средневозрастных лесах. Эффект снижения запасов валежа в этом случае может прослеживаться до приспевающих и даже спелых насаждений (рис. 4). Уменьшение интенсивности лесохозяйственной деятельности ведет к активизации процессов наследования валежа и формированию его высоких запасов, особенно в тех случаях, когда распространенным типом нарушения становятся лесные пожары либо вспышки лесных вредителей.

Заключение. Сравнительный анализ натуральных и модельных оценок запасов углерода валежа лесов Костромской обл. выявил их количественное сходство, вплоть до воспроизведения моделью изменчивости значений по преобладающим породам. Полученные оценки логично встраиваются в совокупность опубликованных данных по региональным характеристикам валежа. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в по-

следнее десятилетие, валежная и подземная части КДО остаются наименее охваченным натурными исследованиями по сравнению с другими ключевыми пулами углерода лесов. Расширение пространственного охвата исследований КДО и получение статистически достоверных оценок для большего разнообразия породно-возрастных категорий лесных насаждений по-прежнему следует считать актуальной научной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведрова Э.Ф., Кошурникова Н.Н. Масса и состав фитодетрита в темнохвойных лесах южной тайги // Лесоведение. 2007. № 5. С. 3–11.
2. Воробьев О.Н. Структура, пространственное распределение и депонирование углерода в древесном детрите сосняков Марийского Заволжья // Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола, 2006. 23 с.
3. Грабовский В.И., Замолотчиков Д.Г. Расчет запасов углерода в валежнике по данным линейных трансект. М.: ЦЭПЛ РАН, 2011. <http://www.cepl.rssi.ru/estimation.htm>. (Дата обращения: 15.10.2012).
4. Грабовский В.И., Замолотчиков Д.Г. Модели оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.

5. Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
6. Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
7. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
8. Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.
9. Катица Е.А., Шорохова Е.В., Кузнецов А.А. Пул углерода крупных древесных остатков в коренных лесах северо-запада Русской равнины // Лесоведение. 2012. № 5. С. 36–43.
10. Карелин Д.В., Уткин А.И. Скорость разложения крупных древесных остатков в лесных экосистемах // Лесоведение. 2006. № 2. С. 26–33.
11. Климченко А.В. Аккумуляция углерода в валежнике лиственничников северной тайги Средней Сибири // Лесное хозяйство. 2005. № 5. С. 33–34.
12. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
13. Курбанов Э.А., Кранкина О.Н. Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья // Лесной журнал. 2001. № 4. С. 27–32.
14. Трейфельд Р.Ф., Кранкина О.Н. Определение запасов и фитомассы древесного детрита на основе данных лесоустройства // Лесное хозяйство. 2001. № 4. С. 23–26.
15. Трейфельд Р.Ф., Кранкина О.Н., Поваров Е.Д. Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства // М.: ВНИИЛМ, 2002. 44 с.
16. Трефилова О.В., Ведрова Э.Ф., Оскорбин П.А. Запас и структура крупных древесных остатков в сосняках Енисейской равнины // Лесоведение. 2009. № 4. С. 16–23.
17. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. Вып. 1(41). С. 133–147.
18. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the Dead Wood Carbon Pool in Northwestern Russian Boreal Forests // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. P. 227–238.
19. Krankina O.N., Harmon M.E., Kukuev Y.A., Treyfeld R.F., Kashpor N.N., Kresnov V.G., Skudin V.M., Protasov N.A., Yatskov M., Spycher G., Povarov E.D. Coarse woody debris in forest regions of Russia // Can. J. Forest Res. 2002. V. 32. P. 768–778.
20. Krankina O.N., Treyfeld R.F., Harmon M.E., Spycher G., Povarov E.D. Coarse woody debris in the forests of the St. Petersburg region, Russia // Ecol. Bull. 2001. V. 49. P. 93–104.
21. Shorohova E., Tetiukhin S., Pussinen A. Coarse woody debris in the forest of the Novgorod region, Russia // EFI Proceedings. No 48. Joensuu: EFI, 2003. P. 111–124.

Natural and Model Assessment of Carbon Pool in Slash of Forests in Kostroma Region

D. G. Zamolodchikov, V. I. Grabovsky, V. V. Kaganov

The volume of slash was determined on linear transects in forests of different ages and species composition in Kostroma region. The data obtained were represented as volumes and reserves of carbon per unit area. The mean slash volume in the forests studied was $26.99 \pm 4.20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; the carbon content in the slash, $6.99 \pm 1.05 \text{ t C ha}^{-1}$. A trend of increasing the carbon reserves in slash with age of stands was revealed. The natural values were close to the quantitative estimates obtained in forests of Kostroma region using the earlier developed model for the formation of carbon pool in large woody remains. The model values of carbon in the slash over the whole area of Kostroma region ($4394.5 \times 10^3 \text{ ha}$) ranges from 18.9 to $37.6 \times 10^6 \text{ t C ha}^{-1}$.

Forest stands, dominant species, age of stand, large woody remains, slash, decomposition, carbon pool, modeling, linear transects.