

DOI 10.31509/2658-607x-202371-143

УДК 630*181.9:630*187:574.45

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА КРУПНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ОСТАТКОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА «ЛЯЛЬСКИЙ» (СРЕДНЯЯ ТАЙГА, РЕСПУБЛИКА КОМИ)

© 2024 А. Ф. Осипов*, А. В. Манов, М. А. Кузнецов, Р. Г. Гуляев, С. В. Загирова

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН
Россия, 167982, Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28*

*E-mail: osipov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 01.03.2024

После рецензирования: 20.03.2024

Принята к печати: 24.03.2024

Крупные древесные остатки (КДО) являются важным компонентом лесных экосистем, который необходимо учитывать при оценке цикла углерода и экосистемных услуг. Цель настоящей работы - оценить запасы углерода и его распределение по компонентам в КДО лесных экосистем тестового полигона «Ляльский». Исследование выполнено на 29 постоянных пробных площадях, заложенных в различных типах насаждений в границах полигона. Массу КДО оценивали с применением данных базисной плотности с учетом стадии разложения к объему отмершей древесины, который затем переводили в количество углерода, используя коэффициент 0.47. Запасы углерода в КДО варьировали в широких пределах со средним значением в древостоях с преобладанием ели 5.90 ± 0.99 (CV=67%) т/га, сосны - 2.57 ± 0.42 (CV=49%) т/га, мелколиственных пород - 3.72 ± 1.23 (CV=66%) т/га. Сухостойные деревья составляли более 50% КДО, на долю валежа в среднем приходилось 10–26%, пней - 4–8%. Показан вклад древесных пород в формирование КДО, который зависел от доминирующего вида, образующего древесный ярус исследуемого насаждения. В экосистемах на автоморфных почвах возрастало участие сопутствующих древесных пород в массе углерода КДО. Предложены конверсионные коэффициенты для оценки запаса углерода в КДО по данным объема древесины древостоя, которые в среднем составили 0.02–0.04 т/м³ с более высокими величинами в сообществах с преобладанием ели. Полученные данные по запасам углерода в КДО найдут применение при региональных оценках углеродного цикла лесных экосистем.

Ключевые слова: крупные древесные остатки, ельники, сосняки, березняки, осинники, конверсионный коэффициент

Крупные древесные остатки (КДО) резервуаром углерода и элементов – важный компонент лесных экосистем, минерального питания, субстратом для который является долговременным возобновления древесных растений,

средой обитания беспозвоночных животных, растений и грибов (Russell et al., 2015; Kushnevskaya et al., 2022; Shvidenko et al., 2023), а разложение КДО служит источником поступления диоксида углерода в атмосферу (Климченко и др., 2011; Harmon, 2021; Вайс и др., 2023). Следовательно, этот элемент насаждения выполняет значимые экосистемные функции (Тебенюкова и др., 2019). В структуру КДО входят сухостойные деревья, валеж и пни, вклад которых в общие запасы остается слабо изученным (Замолодчиков и др., 2013) вследствие недостатка сведений о длительности стояния сухостоя на корню и его перехода в валеж, с дальнейшим разложением и включением в верхние слои почвы (Швиденко и др., 2009; Стороженко, 2012).

Необходимость учета пула углерода в КДО для отдельных стран отражена в международных соглашениях. Вместе с тем, оценки этого пула для территории России варьируют в широких пределах. Так, в обзоре литературы, выполненном С. Шапхоффом с соавт. (Schaphoff et al., 2016), показано, что на территории Российской Федерации в отмершей древесине сконцентрировано 5.5–11.3 Гт

углерода, а факторы, обуславливающие вариабельность исследуемой величины, разнообразны и до сих пор точно не определены (Шорохова, 2020). Следовательно, для снижения неопределенностей необходима разработка методов подсчета запасов и динамики изменения углерода в этом пуле путем накопления знаний эмпирического уровня, что позволит охарактеризовать вклад КДО в бюджет углерода лесных экосистем (Малышева и др., 2019).

В последнее десятилетие наблюдается рост количества оценок КДО в различных регионах Российской Федерации. Так, на северо-западе России (Ленинградская область и Республика Карелия) детальные исследования базисной плотности запасов, фракционного состава и скорости разложения КДО выполнены коллективами Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова и Института леса Карельского научного центра Российской академии наук (Капица и др., 2012; Мошников и др., 2019; Шорохова, 2020; Шорохова и др., 2021; Romashkin et al., 2021; и др.). Масса валежа в насаждениях разного породного состава и возраста Костромской области изучена Д. Г. Замолодчиковым с

соавторами (2013), а древесного детрита в сосняках Заволжья - Э. А. Курбановым и О. Н. Кранкиной (2001). Исследования отпада (сухостоя) еловых лесов Восточно-Европейской равнины в зональном аспекте проведены В. Г. Стороженко (2012). Достаточно полно описаны пулы и потоки углерода, связанные с КДО, и показана их роль в углеродном цикле лесных экосистем Красноярского края (Трефилова и др., 2009; Климченко и др., 2011; Ведрова и др., 2018; Вайс и др., 2023; и др.).

В Республике Коми сохранились самые крупные массивы малонарушенных лесов на северо-востоке Восточно-Европейской равнины. Несмотря на это, исследования массы и фракционного состава КДО здесь немногочисленны (Бобкова и др., 2015; Осипов, Кутявин, 2017), что вызывает необходимость получения экспериментальных данных в экосистемах разных типов и стадий развития. На решение данной проблемы направлены исследования лесных фитоценозов на постоянных пробных площадях (ППП) в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»,

подразумевающего оценку пулов и потоков углерода в лесных экосистемах. Цель настоящей работы – оценить запасы углерода и его распределение по компонентам КДО в лесных экосистемах тестового полигона «Ляльский».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в подзоне средней тайги на территории тестового полигона «Ляльский» площадью 400 га, расположенного в кварталах 63, 64 Кылтковского участкового лесничества Железнодорожного лесничества, на территории Средне-Восточного лесотаксационного района Европейской части России, в западной части Республики Коми, в условиях средней тайги, в границах государственного природного заказника регионального значения с одноименным названием. Заказник имеет лесной профиль. Район исследования приурочен к плоским пространствам в рельефе местности Мезенско-Вычегодской равнины. Климат района умеренно континентальный со сравнительно долгой и многоснежной зимой. Лето короткое, умеренно тёплое. Весна и осень длительные, холодные. Обилие осадков на фоне слабого испарения ведет к избыточной влажности

климата и почвы. Световой период два летних месяца длится почти круглые сутки, что обуславливает увеличение суммы ФАР, снижая перепады температуры в течение суток. Преобладают ветры южного и юго-западного направления (Атлас ..., 1997).

Объектами исследования послужили лесные насаждения разных типов, в которых заложено 29 ППП размером 0.25 га (табл. 1). На ППП проведен сплошной пересчет древостоя и сухостоя с диаметром деревьев на высоте 1.3 м более 6 см. Определение количества, морфометрических характеристик ва-

лежа и пней выполнено на круговых пробных площадях (КПП) размером 0.03 га, расположенных в середине ППП (Методика ..., 2023). Учетом охвачены все элементы КДО с диаметром более 6 см в комле или на высоте слома. При пересчете измеряли диаметр валежа на высоте 1.3 м (если дерево входило в КПП полностью) или диаметры, очерченные границей КПП (рис. 1). При помощи высотомера Haglöf или рулетки фиксировали высоту/длину элементов КДО. Стадию гниения валежа и пней визуально оценивали по методическим рекомендациям (Методика ..., 2023).

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев

№ ППП	Тип леса	Состав*	Средние			Полнота абсолютная, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			возраст, лет	диаметр, см	высота, м			
Древостои с преобладанием в составе ели								
14	Ельник черничный свежий	4ЕЗБ20с1С ед.Пх	76	16.9	16.1	35.2	357	III
40	Ельник травяно-черничный	4Е40с1С1Б ед.Пх	77	18.8	18.5	35.1	370	III
51	Ельник травяно-сфагновый	7Е1Пх1Б10с ед.С	101	22.7	18.5	32.9	370	IV
82	Ельник травяной	4Е40с2Б+Пх	72	17.6	17.4	35.1	371	III
88	Ельник черничный свежий	4Е4Б2С ед.Пх,Ос	91	22.1	18.5	40.3	431	IV

№ ППП	Тип леса	Состав*	Средние			Полнота абсолютная, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			возраст, лет	диаметр, см	высота, м			
115	Ельник травяной	8Е1Пх1Б+С	91	20.2	16.5	28.6	309	IV
145	Ельник сфагново-черничный	8Е1Пх1Б ед.Ос	83	17.4	15.7	29.5	301	IV
157	Ельник таволговый	5ЕЗБ2Пх+С ед.Ос	78	16.7	14.4	28.9	291	IV
163	Ельник кустарничково-сфагновый	7Е1Пх1Б1Ос	89	20.5	17.8	32.7	358	IV
179	Ельник кустарничково-сфагновый	8Е1Пх1Б	98	21.4	18.4	30.2	325	IV
180	Ельник кустарничково-сфагновый	8Е2Б+Пх ед.С	94	21.0	17.6	28.2	301	IV
208	Ельник сфагново-черничный	7ЕЗС+Б	74	13.5	11.9	17.2	147	IV
270	Ельник сфагново-черничный	8Е1С1Б	72	12.6	11.5	21.2	164	V
293	Ельник чернично-долгомошный	4ЕЗОс2Б1С	64	14.7	15.4	31.8	291	IV
298	Ельник черничный свежий	5ЕЗБ1Пх1Ос	60	15.6	16.0	38.1	358	IV
335	Ельник травяно-сфагновый	8Е2Б+Пх ед.С	75	14.9	14.1	24.2	219	V
Древостои с преобладанием в составе сосны								
38	Сосняк черничный влажный	10С+Е ед. Б,Ос	69	15.0	15.0	27.8	237	IV
86	Сосняк черничный свежий	8С1Е1Ос+Б	59	12.5	13.1	24.4	198	IV
114	Сосняк черничный свежий	8С1Е1Б+Ос	58	12.5	13.1	23.2	189	III

№ ППП	Тип леса	Состав*	Средние			Полнота абсолютная, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			возраст, лет	диаметр, см	высота, м			
228	Сосняк черничный влажный	10С ед.Е	60	11.9	13.4	13.7	103	IV
233	Сосняк сфагново-черничный	8С2Е ед.Пх,Б,Ос	62	11.6	10.9	18.3	138	IV
237	Сосняк черничный влажный	9С1Е ед.Б	66	13.7	14.1	21.1	173	IV
243	Сосняк черничный свежий	10С+Е ед.Б	67	13.9	14.5	28.2	234	IV
280	Сосняк черничный влажный	8С1Е1Б ед.Ос	67	14.1	13.9	27.5	227	IV
346	Сосняк кустарничково-сфагновый	9С1Б ед.Е	67	15.1	15.0	22.1	192	IV
Древостои с преобладанием в составе лиственных пород								
5	Березняк травяной	4Б4Ос2Е+Пх ед.С	62	15.8	16.5	35.9	360	III
266	Осинник черничный свежий	7Ос2Е1Б ед.С	64	16.0	16.7	37.6	395	III
284	Осинник чернично-долгомощный	6Ос2Е2Б+С ед.Пх	60	13.7	14.7	41.9	388	IV
319	Березняк травяно-черничный	4Б3Е3Ос+С ед.Пх	66	15.2	14.7	29.3	273	IV

Примечание: * Состав рассчитан по вкладу древесной породы в общий запас древесины древостоя

Вычисление объема отмершей древесины выполняли дифференцированно для каждого элемента. Расчет запасов древесины в деревьях сухостоя и валежа, расположенного в пределах КПП, выполняли по региональным таблицам

зависимости объема древесины в зависимости от породы, диаметра и высоты/длины ствола (Лесотаксационный ..., 2012). Объем фрагментов валежа, входящих в круговую пробную площадь, и пней вычисляли по формуле

усеченного конуса. Для перевода запасов древесины в массу органического вещества использовали данные по базисной плотности гниющей древесины (Бобкова и др., 2015), с дальнейшей конверсией в запасы углерода применяя коэффициент 0.47. По аналогии с конверсионными коэффициентами пере-

вода запасов древесины в фитомассу, мы рассчитали коэффициенты перевода объема древесины в древостое в массу углерода КДО по формуле:

$$КК = \frac{КДО}{М},$$

где КК – конверсионный коэффициент, т/м³; КДО – запасы углерода в КДО, т/га, М – запасы древесины в древостое, м³/га.

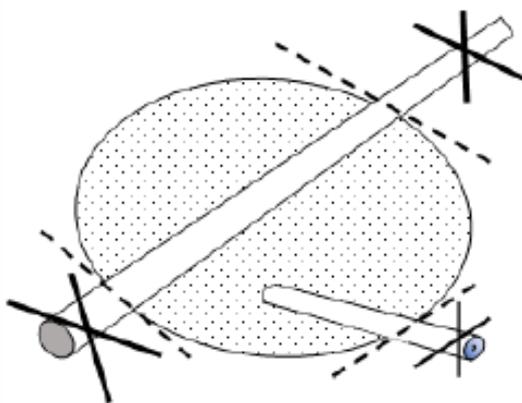


Рисунок 1. Учет валежа на круговой пробной площади (Методические..., 2023)

Статистический анализ данных заключался в проведении описательной статистики с расчетом средних значений, его ошибок, коэффициента вариации (*CV*), минимальных и максимальных величин. Для парных сравнений применяли *t*-критерий Стьюдента (*p*_{*t*}). Оценка влияния преобладающей древесной породы на запасы и структуру КДО выполнена с помощью критерия Краскела-Уоллиса, вследствие ненор-

мального распределения исходного набора данных и отсутствия однородности групповых дисперсий в большинстве случаев. Переменные были объединены в следующие группы по преобладающей в составе древостоя древесной породе: «ель», «сосна», «лиственные». Обработка полученных данных и их графическое представление выполнено в Microsoft Excel 2019 и R (R Core Team, 2022) при 95% уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Запасы углерода в КДО насаждений с преобладанием ели в составе древостоя. Запасы углерода КДО в еловых биогеоценозах на тестовом полигоне «Ляльский» варьировали от 1.2 до 13.8 т/га (рис. 2А). Меньший его пул отмечен в ельнике сфагново-черничном, произрастающем на ППП 145, больший – в ельнике кустарничково-сфагновом на ППП 180. В среднем в сообществах на почвах полугидроморфных ландшафтов сосредоточено 5.42 ± 1.41 т С/га ($CV=82\%$), на автоморфных почвах несколько выше – 6.69 ± 1.28 т С/га ($CV=47\%$). Следует отметить, что условия увлажнения почв в насаждениях с преобладанием ели не оказывали влияния на запасы углерода в КДО ($p_t=0.514$). Коэффициенты конверсии для оценки массы углерода в КДО по данным объема древесины в древостое варьировали от 0.01 до 0.10 т/м³, со средним значением 0.04 ± 0.01 ($CV=70\%$) и отсутствием достоверных различий в ельниках, различающихся степенью увлажнения почвы.

Сухостойные деревья образуют 24–98% от запаса углерода КДО, с более высоким средним вкладом (86% vs 59%)

в еловых насаждениях на автоморфных почвах ($p_t=0.015$). Валеж отсутствует в ельнике чернично-долгомошном. В остальных сообществах его участие варьирует от 2 до 68% с большей средней долей (35% vs 12%) в ельниках на полугидроморфных почвах ($p_t=0.029$). Пни не были выявлены при перечете на трети изученных сообществ, а в насаждениях, где они обнаружены, пни формировали от менее 1 до 24% от запасов углерода КДО.

В ельниках на тестовом полигоне «Ляльский» отмершие деревья ели формируют 18–100% от запасов КДО экосистемы и встречаются во всех исследованных насаждениях (рис. 2Б). Элементы КДО, образованные березой, выявлены в 15 насаждениях, где ее участие изменялось от 3 до 15%. Также значим (2–31%) вклад пихты, участие которой в формировании пула углерода КДО отмечено в 10 ельниках. Отмершие деревья осины и сосны наблюдали в 7 и 6 сообществах, соответственно, а их доля в запасе углерода КДО варьировала от 1 до 36% и от 1 до 43%, соответственно. Следует отметить, что в насаждениях на автоморфных почвах ель выполняет менее значимую (44% vs 73%) роль в запасах углерода КДО ($p_t=0.038$), по

сравнению с насаждениями, формирующимися на полугидроморфных почвах. Вместе с тем, в запасах КДО еловых сообществ в более благоприятных условиях почвенного увлажнения возрастает значение березы (30% vs 10%; $p_t=0.032$). Также на автоморфных почвах в среднем

выше участие отмерших деревьев сосны и осины, однако эти различия не достоверны ($p_t > 0.05$). Различия в породном составе КДО насаждений по степени увлажнения почв во многом обусловлены участием древесных видов в образовании древостоя.

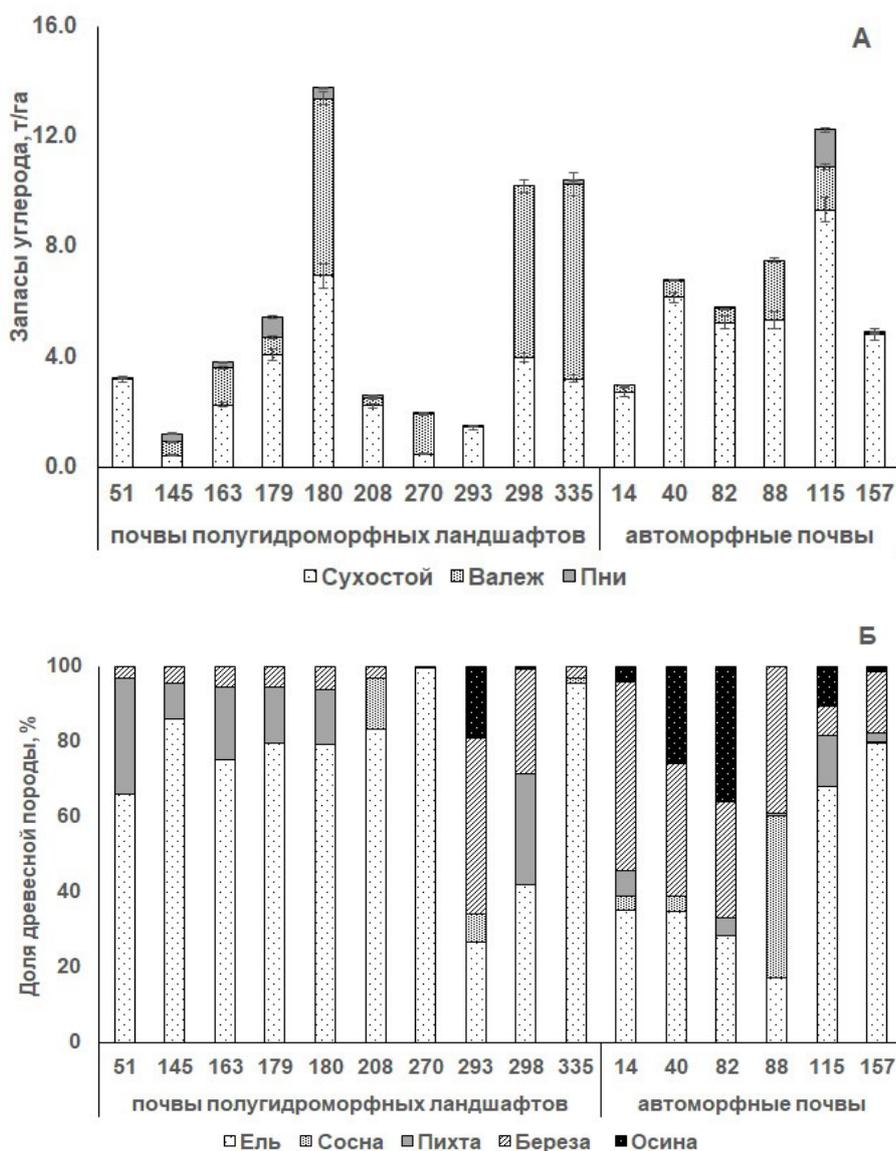


Рисунок 2. Запасы углерода (А) и вклад древесных пород (Б) в образование КДО насаждений с преобладанием в составе ели на тестовом полигоне «Ляльский». По оси абсцисс – номер ППП

Запасы углерода в КДО насаждений с преобладанием сосны в составе древостоя. Запасы углерода в КДО сосняков на тестовом полигоне «Ляльский» варьируют от 1.4 до 4.7 т/га (рис. 3А) с относительно низкими величинами в сосняке черничном влажном на ППП 237, высокими – в насаждении аналогичного типа на ППП 280. В КДО насаждений на полугидроморфных почвах в среднем содержится 2.87 ± 0.60 т С/га ($CV=52\%$), на автоморфных почвах – 1.96 ± 0.10 т С/га ($CV=9\%$). Как и в случае с ельниками, достоверной разницы между насаждениями, формирующимися в различающихся условиях почвенного увлажнения, не выявлено ($p_t=0.192$). Коэффициенты конверсии перевода запасов древесины в древостое в массу углерода КДО в сосняках варьировали от 0.02 до 0.04 т/м³, со средним значением 0.03 ± 0.003 ($CV=35\%$).

Стоящие на корню отмершие деревья формируют большую (54–97%) часть КДО в сосняках. Валеж выявили практически во всех насаждениях, за исключением сосняка черничного влажного на ППП 228, и его вклад составлял 7–46%. Доля пней не превышала 10% в насаждениях, где

они были учтены во время исследования. Следует отметить, что достоверных различий в доле отдельных структурных компонентов в общей массе КДО в зависимости от условий почвенного увлажнения не выявлено ($p_t > 0.05$).

Деревья сосны практически во всех насаждениях формируют большую часть запасов углерода в КДО, что обусловлено небольшой примесью других пород в древостоях сосняков. Исключение составляет сосняк черничный свежий на ППП 114, где доминирующая (66%) роль принадлежит деревьям березы (рис. 3Б). Следует также отметить насаждение аналогичного типа на ППП 86, в котором суммарная доля мелколиственных пород составляет 45% от массы КДО и примерно сопоставима с вкладом сосны (46%). Древесные остатки, образованные березой и осинкой в анализируемых выше насаждениях, формирует преимущественно сухостой, что свидетельствует о постепенном выпадении этих пород из состава древесного яруса сосняков, что отмечено было ранее для древостоев средней (Осипов, Бобкова, 2016) и северной (Кутявин и др., 2023) тайги Республики Коми, находящихся на сходных этапах возрастного развития.

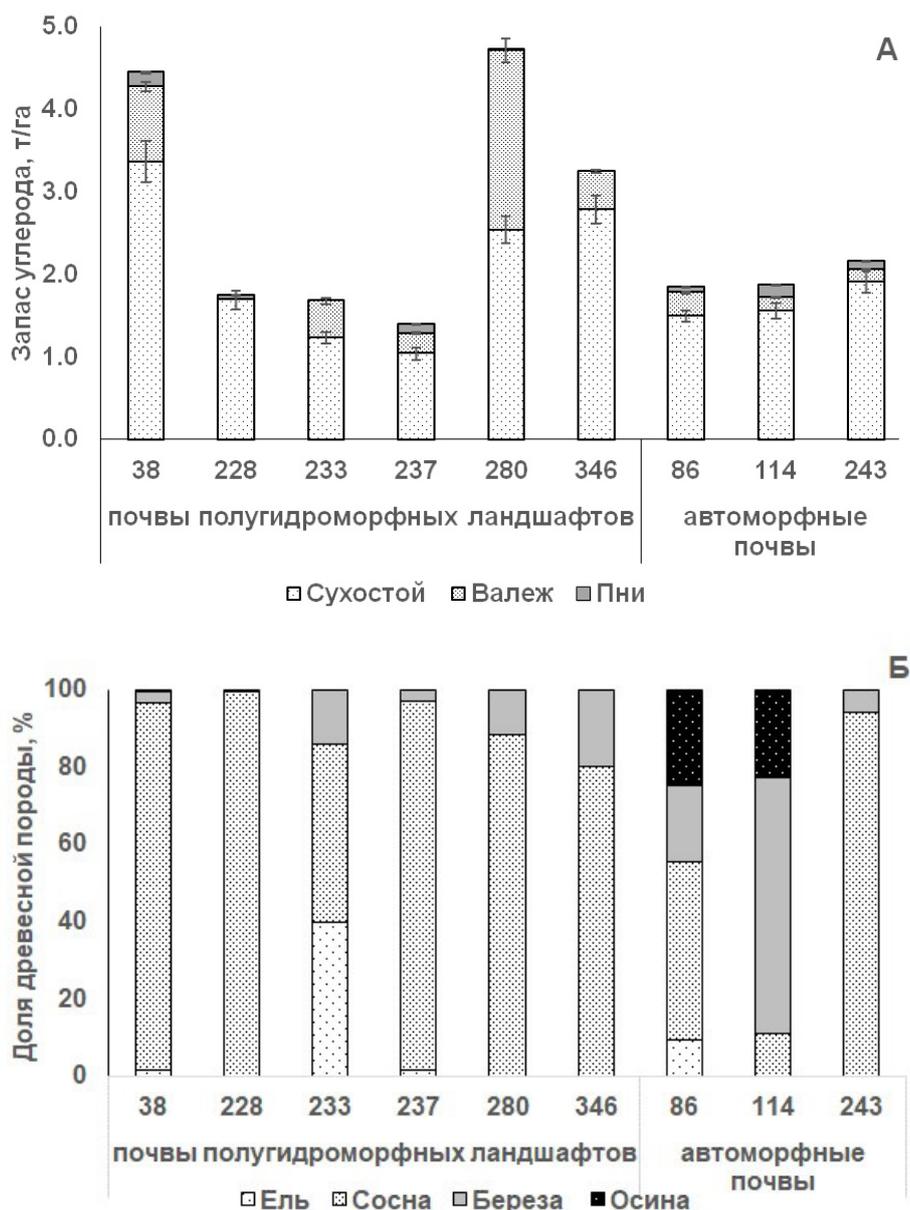


Рисунок 3. Запасы углерода (А) и вклад древесных пород (Б) в образование КДО сосняков на тестовом полигоне «Ляльский».

По оси абсцисс – номер ППП

Запасы углерода в КДО насаждений с преобладанием мелколиственных пород в составе древостоя. Запасы углерода в спелых мелколиственных насаждениях составили 1.6–6.9 т/га, большая часть которых (79–90%) сформирована сухо-

стойными деревьями (рис. 4А). Валеж отмечен в двух насаждениях, где его доля составила 20%. Пни наблюдались во всех исследованных сообществах, а их участие варьировало от 1 до 19%. Коэффициенты конверсии перевода

запасов древесины в массу углерода КДО лиственных насаждений варьировали от 0.01 до 0.04 т/м³, со средним значением 0.02±0.01 (CV=63%).

В исследованных мелколиственных насаждениях более значительный вклад (в среднем 36%) в формирование КДО вносят деревья осины, доля которых изменяется от 19 до 59% (рис. 4Б). Участие отмерших деревьев березы в

общей массе КДО варьирует от 13 до 49%, ели – от 15 до 59% (в среднем для этих пород по 29%). Сосна принимает участие в формировании КДО трех насаждений, составляя 8–9% от общего его запаса, тогда как выпавшие из состава древостоя деревья пихты наблюдались только в березняке травяном с незначительной (1%) долей в аккумуляции углерода КДО.

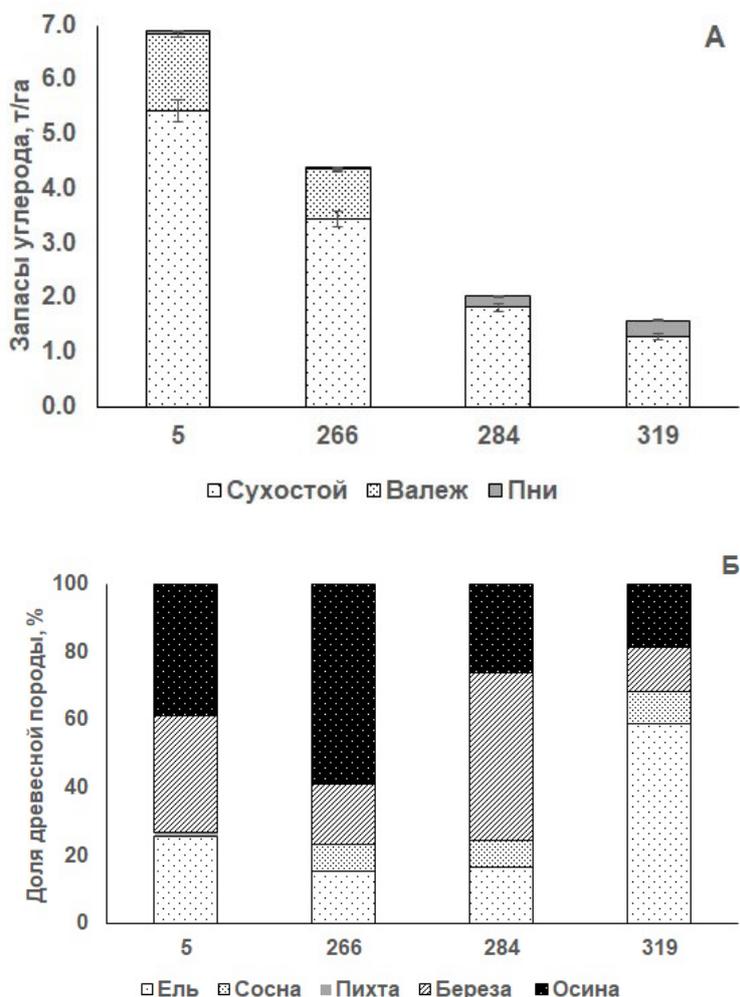


Рисунок 4. Запасы углерода (А) и вклад древесных пород (Б) в образование КДО насаждений с преобладанием в составе древостоя мелколиственных пород на тестовом полигоне «Ляльский»
По оси абсцисс – номер ППП

Влияние доминирующей породы в составе древостоя на запасы и структуру КДО. В результате анализа полученных данных не выявлено достоверного влияния доминирующей породы в составе древостоя на общую массу углерода в КДО и отдельных его компонентов (табл. 2). Однако попарные сравнения показали относительно низкие (в 1.8–3.4 раза ниже) значения общего пула углерода, массы сухостоя и валежа в сосняках по сравнению с ельниками ($p_t < 0.05$), тогда как масса пней в них была сопоставима. Насаждения с преобладанием в составе древостоя ели и лиственных пород характеризовались сходными величинами как общей массы углерода КДО, так и их составляющих ($p_t > 0.05$). Следует также отметить, что вклад структурных элементов КДО и показатели коэффициентов конверсии объема древесины в запасы углерода не зависели от преобладающей в составе древостоя древесной породы. Вместе с тем участие древесных пород в общем пуле углерода в большинстве случаев (за исключением деревьев березы) определялось видом, формирующим большую часть древесного яруса ($p < 0.05$). Сопоставимая доля деревьев березы в массе КДО, вероятно,

связана с тем, что исследуемые насаждения на тестовом полигоне «Ляльский» образованы после рубок, которые на начальных этапах восстановительной сукцессии активно заселялись этой древесной породой, с дальнейшим ее отпадом, вследствие достижения предельного возраста.

Опубликованные другими авторами оценки запасов КДО варьируют в широких пределах и зависят от стадии развития насаждения, породного состава и истории нарушений. Так, в ельниках и вторичных лесах Ленинградской области сконцентрировано 0–339 м³/га (Капица и др., 2012; Шорохова и др., 2021), в сосновых экосистемах Карелии – 2–198 м³/га (Мошников и др., 2019), в ельниках Республики Коми 50–93 м³/га, что соответствует 20–35 т/га органического вещества (Бобкова и др., 2015). Запасы КДО в сосняках этого же региона составляют 1–131 м³/га или 0.3–63 т С/га (Осипов, Кутявин, 2017), в сосняках Заволжья – 2–17 т С/га (Курбанов, Кранкина, 2001), в хвойно-широколиственных лесах Дальнего Востока 0.8–9.9 т С/га (Иванов и др., 2020). Достаточно хорошо исследованы запасы КДО в Сибири. По данным ряда авторов, в сосновых экосистемах

Красноярского края сосредоточено 0.8–28.4 т С/га (Трефилова и др., 2009; Ведрова и др., 2018; Вайс и др., 2023). В сосняках зоны охвата международной обсерватории ZOTTO средние запасы органического вещества КДО составили 18 т/га, лиственных насаждениях – 30 т/га, темнохвойных – 50 т/га (Клим-

ченко и др., 2011). Близкие к этим данные для лиственных и темнохвойных насаждений Центральной Сибири приведены в работе Э. Ф. Ведровой с соавторами (2018). Следовательно, полученные значения массы КДО на тестовом полигоне «Ляльский» вполне согласуются с опубликованными данными.

Таблица 2. Оценка влияния доминирующей в составе древесной породы на запасы и структуру КДО

Параметр	Преобладающая порода в составе древостоя ¹			Результат дисперсионного анализа
	ель	сосна	лиственные	
Запас углерода, т/га, в т.ч.	5.90±0.99	2.57±0.42	3.72±1.23	$\chi^2=5.23; p=0.073$
сухостое	3.86±0.60	1.95±0.26	3.00±0.93	$\chi^2=4.56; p=0.102$
валеже	1.82±0.61	0.54±0.22	0.58±0.35	$\chi^2=2.79; p=0.247$
пнях	0.22±0.09	0.08±0.02	0.14±0.06	$\chi^2=0.83; p=0.661$
Доля в общем запасе, %:				
сухостоя	69±7	79±4	82±3	$\chi^2=0.39; p=0.824$
валежа	26±6	17±4	10±6	$\chi^2=1.26; p=0.533$
пней	5±2	4±1	8±4	$\chi^2=1.38; p=0.502$
Конверсионный коэффициент, т/м ³	0.04±0.01	0.03±0.003	0.02±0.01	$\chi^2=3.42; p=0.181$
Вклад пород, %:				
ели	62±7	6±4	29±10	$\chi^2=18.05; p<0.001$
сосны	5±3	73±10	6±2	$\chi^2=19.07; p<0.001$
пихты	9±3	- ²	0.2±0.2	$\chi^2=10.00; p=0.007$
березы	18±4	16±7	29±8	$\chi^2=2.19; p=0.334$
осины	6±3	5±4	36±9	$\chi^2=9.77; p=0.008$

Примечание: ¹ – приведено среднее значение и ошибка среднего; ² – не выявлено

При анализе структуры КДО всех изученных сообществ выявлена доминирующая роль сухостойных деревьев в формировании запасов углерода КДО в большинстве биогеоценозов, что во многом объясняется стадией развития. Исследуемые насаждения на тестовом полигоне «Ляльский» в большинстве своем (за исключением лиственных) находятся на стадии приспевания, когда в древостоях происходит интенсивная дифференциация деревьев по состоянию, сопровождающаяся переходом живых деревьев в сухостой, длительность стояния на корню которого в таежной зоне достигает нескольких десятилетий (Швиденко и др., 2009). Аналогичные данные, показывающие преобладание сухостоя в КДО сосняков Сибири, приведены А. А. Вайсом с соавт. (2023). В качестве примера положительного влияния поздней стадии развития древостоя на участие валежа в КДО можно привести среднетаёжные перестойные ельники Республики Коми, где его доля составила 23–80% (Бобкова и др., 2015), и данные Д. Г. Замолотчикова с соавт. (2013), показывающие увеличение массы этого компонента КДО в ельниках Костромской области с возрастом. Переход сухостоя в валеж является

стохастическим процессом, на который может оказать воздействие тип корневой системы и степень развития кроны дерева, что определяет сопротивление к снеговой и ветровой нагрузке. Вероятно, этим объясняется меньшая доля валежа в сосняках, где КДО преимущественно сформированы деревьями сосны, обладающими менее развитой кроной и стержневой корневой системой, по сравнению с насаждениями с преобладанием в составе древостоя ели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитаны запасы углерода в КДО лесных насаждений тестового полигона «Ляльский», на котором представлены репрезентативные лесные экосистемы средней тайги Республики Коми. Установлено, что в лесах с преобладанием в древесном ярусе ели и мелколиственных пород пул углерода КДО сопоставим и составляет 3.7–5.9 т/га, тогда как в сосняках величина запаса меньше (2.6 т/га). В сухостойных деревьях сконцентрирована большая часть углерода КДО, что определяется стадией развития исследуемых насаждений. Вклад валежа составляет 10–26%, пней – 4–8%. Породный состав КДО определяется участием отдельных

видов древесных растений в образовании древесного яруса, за исключением березы, которая выявлена в КДО большинства исследованных насаждений, вследствие их послерубочного происхождения. Следует отметить, что в хвойных лесах на автоморфных почвах в формировании КДО возрастает роль сопутствующих древесных пород. Рассчитаны конверсионные коэффициенты для перевода объёма древесины в древесное в запасы углерода КДО, которые в среднем составили 0.02–0.04 т/м³ с более высокими величинами в сообществах с преобладанием ели. Полученные данные по запасам углерода в КДО найдут применение при региональных оценках углеродного цикла лесных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.

Бобкова К. С., Кузнецов М. А., Осипов А. Ф. Запасы крупных древесных остатков в ельниках средней тайги европейского Северо-Востока // ИВУЗ «Лесной журнал». 2015. № 2. С. 9–20.

Вайс А. А., Вараксин Г. С., Мамедова С. К., Ануев Е. А., Герасимова О. А. Детрит в

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Сергея Павловича Швецова за помощь при сборе экспериментальных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) на выполнение темы «Оценка запасов углерода и мониторинг потоков парниковых газов в лесных экосистемах на европейском северо-востоке России» (Рег. № 124013000679-5).

высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири // ИВУЗ Лесной журнал. 2023. № 3. С. 9–20.

Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В., Трефилова О. В. Участие старовозрастных лесов в бюджете углерода бореальной зоны Центральной Сибири // Известия РАН. Серия биологическая. 2018. № 3. С. 326–336.

Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Каганов В. В. Натурная и модельная

- оценки углерода валежа в лесах Костромской области // Лесоведение. 2013. № 4. С. 3–11.
- Иванов А. В., Замолодчиков Д. Г., Лошаков С. Ю., Комин А. Э., Косинов Д. Е., Браун М., Грабовский В. И.* Вклад крупных древесных остатков в биогенный цикл углерода хвойно-широколиственных лесов юга Дальнего Востока России // Лесоведение. 2020. № 4. С. 357–366.
- Капица Е. А., Шумский К. А., Зайцев Д. А., Щуровский С. Ю.* Запас крупных древесных остатков в учебно-опытном лесничестве «ЛОГКУ Ленобллес» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 209. С. 64–71.
- Климченко А. В., Верховец С. В., Слинкина О. А., Кошурникова Н. Н.* Запасы крупных древесных остатков в средне-таежных экосистемах Приенисейской Сибири // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 91–97.
- Курбанов Э. А., Кранкина О. Н.* Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья // ИВУЗ «Лесной журнал». 2001. № 4. С. 28–32.
- Кутявин И. Н., Манов А. В., Осипов А. Ф., Бобкова К. С.* Долговременная динамика состава, строения и состояния древостоев северо-таежных сосняков на европейском северо-востоке России // Сибирский лесной журнал. 2023. № 2. С. 17–25.
- Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей, Республики Коми) / отв. сост. Г. С. Войнов, Н. П. Чупров, С. В. Ярославцев. Архангельск: Правда Севера, 2012. 672 с.
- Малышева Н. А., Филипчук А. Н., Золина Т. А., Сильнягина Г. В.* Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ // Лесохозяйственная информация. 2019. № 1. С. 101–128.
- Методика полевых работ по таксации леса на тестовом полигоне в рамках реализации важного инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». 2023. URL: <https://goo.su/XWYhVu> (дата обращения 07.07.2023).
- Мошников С. А., Ананьев В. А., Матюшкин В. А.* Оценка запасов крупных древесных остатков в средне-
- А. Ф. Осипов, А. В. Манов, М. А. Кузнецов, Р. Г. Гуляев, С. В. Загирова*

- таежных сосновых лесах Карелии // Лесоведение. 2019. № 4. С. 266–273.
- Осипов А. Ф., Бобкова К. С.* Биологическая продуктивность и фиксация углерода среднетаежными сосняками при переходе из средневозрастных в спелые // Лесоведение. 2016. № 5. С. 346–354.
- Осипов А. Ф., Кутявин И. Н.* Соотношение между запасами органического вещества в крупных древесных остатках и фитомассе древостоя среднетаежных сосняков европейского Северо-Востока России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 221. С. 175–187.
- Стороженко В. Г.* Характеристика древесного опада в коренных ельниках восточноевропейской тайги // Лесоведение. 2012. № 3. С. 43–50.
- Тебенькова Д. Н., Лукина Н. В., Чумаченко С. И., Данилова М. А., Кузнецова А. И., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Катаев А. Д., Гагарин Ю. Н.* Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем // Лесоведение. 2019. № 5. С. 341–356.
- 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.
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Нильссон С.* Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 133–147.
- Шорохова Е. В.* Запасы и экосистемные функции крупных древесных остатков в таежных лесах. Автореф. дисс. д-ра биол. наук. СПб., 2020. 45 с.
- Шорохова М. А., Березин Г. В., Капица Е. А., Шорохова Е. В.* Характеристики крупных древесных остатков в лесном массиве «Вепский лес» - эталоне природы средней тайги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 236. С. 198–211.
- Harmon M. E.* The role of woody detritus in biogeochemical cycles: past, present, and future // Biogeochemistry, 2021. Vol. 154. P. 359–369.
- Kushnevskaya N., Borovichev E., Shorohova E.* Epixylic diversity in an old-growth boreal forest is influenced by dynamic substrate attributes // Biological Communications. 2022. Vol. 67(4). P. 253–265.
- R Core Team: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation

for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2022. URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 07.07.2023).

Romashkin I. V., Shorohova E. V., Kapitsa E. A., Galibina N. A., Nikerova K. M. Substrate quality regulates density loss, cellulose degradation and nitrogen dynamics in downed woody debris in a boreal forest // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 491. Article 119143.

Russell M. B., Fraver S., Aakala T., Gove J. H., Woodall C. W., D'Amato A. W., Ducey M. J. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: a review // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 350. P. 107–128.

Schaphoff S., Reyer C. P. O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 361. P. 432–444.

Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D. A modelling system for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 45.

REFERENCES

Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii (Atlas of Komi Republic on climate and hydrology), Moscow: Drofa; DiK, 1997, 116 p.

Bobkova K. S., Kuznecov M. A., Osipov A. F., Zapasy krupnyh drevesnyh ostatkov v el'nikah srednej tajgi evropejskogo Severo-Vostoka (Stock of coarse woody debris in spruce forests of the middle taiga in the European North-East), *IVUZ «Lesnoj zhurnal»*, 2015, No 2, pp. 9–20.

Harmon M. E., The role of woody detritus in biogeochemical cycles: past, present, and future, *Biogeochemistry*, 2021, Vol. 154, pp. 359–369.

Ivanov A. V., Zamolodchikov D. G., Loshakov S. Ju., Komin A. Je., Kosinov D. E., Braun M., Grabovskij V. I., Vklad krupnyh drevesnyh ostatkov v biogenyj cikl ugljeroda hvojno-shirokolistvennyh lesov juga Dal'nego Vostoka Rossii (Large wooden debris' contribution into a biogenic carbon cycle in coniferous-deciduous forests of the southern regions of Russian Far East), *Lesovedenie*, 2020, No 4, pp. 357–366.

Kapitsa E. A., Shumskij K. A., Zajcev D. A., Shhurovskij S. Ju., Zapas krupnyh drevesnyh ostatkov v uchebno-opytном

- lesnichestve «LOGKU Lenobles» (Coarse woody debris stores in the experimental forestry enterprise «LOGKU Lenobles»), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2014, Vol. 209, pp. 64–71.
- Klimchenko A. V., Verhovec S. V., Slinkina O. A., Koshurnikova N. N., Zapasy krupnyh drevesnyh ostatkov v srednetaezhnyh jekosistemah Prienisejskoj Sibiri (Stocks of coarse woody debris in middle taiga ecosystems of Siberia located near Yenisei river), *Geografija i prirodnye resursy*, 2011, No 2, pp. 91–97.
- Kurbanov Je. A., Krankina O. N., Drevesnyj detrit v sosnovyh nasazhdenijah Srednego Zavolzh'ja (Wood detritus in pine stands of middle Volga area), *IVUZ "Lesnoj zhurnal"*, 2001, No 4, pp. 28–32.
- Kushnevskaya H., Borovichev E., Shorohova E., Epixylic diversity in an old-growth boreal forest is influenced by dynamic substrate attributes, *Biological Communications*, 2022, Vol. 67, No 4, pp. 253–265.
- Kutjavin I. N., Manov A. V., Osipov A. F., Bobkova K. S., Dolgovremennaja dinamika sostava, stroenija i sostojanija drevostoev severotaezhnyh sosnjakov na evropejskom severo-vostoke Rossii, (Long-term dynamics of the composition, structure and state of tree stands of northern taiga pine forests in the European North-East of Russia), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2023, No 2, pp. 17–25.
- Lesotaksacionnyj spravocnik dlja severo-vostoka evropejskoj chasti Rossijskoj Federacii (normativnye materialy dlja Neneckogo avtonomnogo okruga, Arhangel'skoj, Vologodskoj oblastej, Respubliki Komi)* (Reference book on forest taxation for the North-East of the European part of the Russian Federation) / otv. sost. G. S. Vojnov, N. P. Chuprov, S. V. Jaroslavcev, Arhangel'sk: Pravda Severa, 2012, 672 p.
- Malysheva N. A., Filipchuk A. N., Zolina T. A., Sil'njagina G. V., Kolichestvennaja ocenka zapasov drevesnogo detrita v lesah Rossijskoj Federacii po dannym GIL (Quantitative assessment of coarse woody debris in the forests of the Russian Federation according to the State Forest Inventory data), *Lesohozjajstvennaja informacija*, 2019, No 1, pp. 101–128.
- Metodika polevyh rabot po taksacii lesa na testovom poligone v ramkah realizacii vazhnogo innovacionnogo proekta gosudarstvennogo znachenija «Uglerod v*

- jekosistemah: monitoring»* (Methodology for field work on forest taxation at a test site as part of the implementation of an important innovative project of national importance «Carbon in ecosystems: monitoring»), 2023, available at: [https:// goo.su/XWYhVu](https://goo.su/XWYhVu) (July 07, 2023).
- Moshnikov S. A., Anan'ev V. A., Matjushkin V. A., Ocenka zapasov krupnyh drevesnyh ostatkov v srednetaezhnyh sosnovykh lesah Karelii (Storages of coarse woody debris in pine forests of middle taiga of Northwestern Russia (case study in Karelia)), *Lesovedenie*, 2019, No 4, pp. 266–273.
- Osipov A. F., Bobkova K. S., Biologicheskaja produktivnost' i fiksacija ugleroda srednetaezhnymi sosnjakami pri perehode iz srednevozzrastnykh v spelye (Bio-productivity and carbon sequestration of pine forests at transition from middle aged to mature in middle taiga), *Lesovedenie*, 2016, No 5, pp. 346–354.
- Osipov A. F., Kutjavin I. N., Sootnoshenie mezhdru zapasami organicheskogo veshhestva v krupnykh drevesnyh ostatkah i fitomasse drevostoja srednetaezhnykh sosnjakov evropejskogo Severo-Vostoka Rossii (The relationship between organic matter stocks in coarse woody debris and the stand phytomass in middle taiga pine forests on the European North-East Russia), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, Vol. 221, pp. 175–187.
- R Core Team: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, available at: [https:// www.R-project.org/](https://www.R-project.org/) (July 07, 2023).
- Romashkin I. V., Shorohova E. V., Kapitsa E. A., Galibina N. A., Nikerova K. M., Substrate quality regulates density loss, cellulose degradation and nitrogen dynamics in downed woody debris in a boreal forest, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 491, Article 119143.
- Russell M. B., Fraver S., Aakala T., Gove J. H., Woodall C. W., D'Amato A. W., Ducey M. J., Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: a review, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 350, pp. 107–128.
- Schaphoff S., Reyer C. P. O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A., Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 361, pp. 432–444.

- Shorohova E. V., *Zapasy i jekosistemnye funkcii krupnyh drevesnyh ostatkov v taezhnyh leash* (Stocks and ecosystem functions of large woody residues in taiga forests), Avtoref. diss. d-ra biol. nauk. Sankt Peterburg, 2020. 45 p.
- Shorohova M. A., Berezin G. V., Kapica E. A., Shorohova E. V., *Harakteristiki krupnyh drevesnyh ostatkov v lesnom massive «Vepsskij les» - jetalone prirody srednej tajgi* (Characteristics of coarse woody debris in the «Vepssky Forest» reserve, a reference of primeval middle boreal forests), *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2021. Vol. 236, pp. 198–211.
- Shvidenko A. Z., Shhepashhenko D. G., Nil'sson S., *Ocenka zapasov drevesnogo detrita v lesah Rossii* (Estimation of woody detritus stocks in forests of Russia), *Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo*, 2009, Vol. 41, No 1, pp. 133–147.
- Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D. A., *modelling system for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia*, *Forests*, 2023, Vol. 14, p. 45.
- Storozhenko V. G., *Harakteristika drevesnogo otpada v korennyh el'nikah vostochno-evropejskoj tajgi* (Characterization of current deadwood and slash in natural spruce forests of East European taiga), *Lesovedenie*, 2012, No 3, pp. 43–50.
- Teben'kova D. N., Lukina N. V., Chumachenko S. I., Danilova M. A., Kuznecova A. I., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Kataev A. D., Gagarin Ju. N., *Mul'tifunkcional'nost' i bioraznoobrazie lesnyh jekosistem* (Multifunctionality and biodiversity of forest ecosystems), *Lesovedenie*, 2019, No 5, pp. 341–356.
- Trefilova O. V., Vedrova Je. F., Oskorbin P. A., *Zapas i struktura krupnyh drevesnyh ostatkov v sosnjakah Enisejskoj ravniny* (The stock and structure of coarse woody debris in pine forests of the Yenisey Plain), *Lesovedenie*, 2009, No 4, pp. 16–23.
- Vajs A. A., Varaksin G. S., Mamedova S. K., Anuev E. A., Gerasimova O. A., *Detrit v vysokopolnotnyh sosnovykh nasazhdenijah podtaezhno-lesostepnogo rajona Srednej Sibiri* (Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia), *IVUZ «Lesnoj zhurnal»*, 2023, No 3, pp. 9–20.

Vedrova Je. F., Muhortova L. V., Trefilova O. V., Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Kaganov V. V., Uchastie starovoostnyh lesov v bjudzhetе ugleroda boreal'noj zony Central'noj Sibiri (Contribution of old growth forests to the carbon budget of the boreal zone in Central Siberia), *Izvestija RAN. Serija biologicheskaja*, 2018, No 3, pp. 326–336.

Zamolodchikov D. G., Grabovskij V. I., Kaganov V. V., Naturnaja i model'naja ocenki ugleroda vlezha v lesah Kostromskoj oblasti (Natural and model assessment of carbon pool in slash of forests in Kostroma Region), *Lesovedenie*, 2013, No 4, pp. 3–11.

CARBON STOCKS OF COARSE WOODY DEBRIS IN FOREST ECOSYSTEMS OF THE LYALSKY TEST SITE (MIDDLE TAIGA, KOMI REPUBLIC)

A. F. Osipov*, A. V. Manov, M. A. Kuznetsov, R. G. Gulyaev, S. V. Zagirova

*Institute of Biology Komi Scientific Center Ural Branch RAS
Syktyvkar, GSP-2, st. Kommunisticheskaya, 28, 167982, Russia*

*Email: osipov@ib.komisc.ru.

Received: 01.03.2024

Revised: 20.03.2024

Accepted: 24.03.2024

Coarse woody debris (CWD) are important component of forest ecosystems, which must be taken into carbon cycle and ecosystem services determination. The purpose of this work is to assess the carbon reserves and its distribution among components in the CWD of forest ecosystems in the Lyalsky test site. The study was carried out on 29 permanent sample plots established in various types of stands inside the boundaries of the test site. The CWD mass was measured using basal density data, taking into account the stage of decomposition by volume of dead wood, which was then converted to the carbon stock using a factor of 0.47. The carbon reserves of CWD varied in a wide range with mean values in forest stands with a predominance of spruce 5.90 ± 0.99 (CV=67%) t/ha, pine – 2.57 ± 0.42 (CV=49%) t/ha, small-leaved species – 3.72 ± 1.23 (CV=66%) t/ha. Standing dead trees formed more than 50% of CWD, mean share of downed woody debris was 10–26%, and stumps – 4–8%. The contribution of tree species to the CWD is shown, which depended on the dominated specie forming the tree layer of the studying stand. However, in ecosystems on automorphic soils, the participation of accompanying tree species in the carbon mass of CWD increased. Conversion coefficients were proposed for estimating the carbon stock in CWD based on the volume of wood in the forest stand, which averaged 0.02–0.04 t/m³ with higher values in communities with a predominance of spruce. The data obtained will be used in regional assessing the carbon cycle of forest ecosystems.

Keywords: coarse woody debris, spruce forests, pine forests, birch forests, aspen forests, conversion coefficient

Рецензент: К.С.-Х.Н. Мошников С. А.