

## Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми

© 2019. Н. В. Лиханова<sup>1</sup>, к. б. н., ведущий специалист,  
К. С. Бобкова<sup>2</sup>, д. б. н., профессор, г. н. с.,

<sup>1</sup>Сыктывкарский государственный университет им. П. Сорокина,  
167001, Россия, г. Сыктывкар, ул. Октябрьский проспект, д. 55,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: lihanad@mail.ru, bobkova@ib.komisc.ru

Приведена количественная характеристика запасов и распределения углерода органического вещества в системе почва–фитоценоз вырубки после сплошнолесосечной рубки древостоя двух типов ельников на торфянисто-подзолисто-глеватых почвах. Установлено, что в экосистемах 4–6-летней вырубки ельников аккумулируется 115–121 тыс. кгС/га, большая часть которого концентрируется в почве. Оценены продукционно-деструкционные процессы фитомассы в системе фитоценоз–почва. На вырубке ельников затраты углерода атмосферы на продукцию фитомассы (1,8–2,2 тыс. кг/га) преобладают над его возвратом с опадом (1,4–1,7 тыс. кг/га). В годичном биологическом круговороте углерода вырубки ельников ведущую роль выполняют растения напочвенного покрова. В углеродном цикле вырубки большое значение имеет крупный древесный дебрис (сухостой, валеж, порубочные остатки, корни вырубленных деревьев), в массе которого концентрируется 22,0–27,6 тыс. кгС/га и лесная подстилка, где аккумулируется 18,6–27,8 тыс. кгС/га.

**Ключевые слова:** Север, средняя тайга, сплошнолесосечная рубка, вырубка, ельники, запас углерода, потоки углерода.

## Pools and carbon fluxes in felling ecosystems spruce forests of the middle taiga of the Komi Republic

© 2019. N. V. Likhanova<sup>1</sup> ORCID:0000-0002-4317-7872, K. S. Bobkova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-0346-2879,  
<sup>1</sup>Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,

55, Oktyabrsky Prospect, Syktyvkar, Russia, 167001,

<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: lihanad@mail.ru, bobkova@ib.komisc.ru

The quantitative characteristics of the reserves and distribution of carbon of organic matter in the soil–phytocenosis system after clearing the stand of two types of spruce forests on peaty-podzolic-gleyed soils are shown. It is established that in the ecosystems of 4–6 years old felling of spruce forests 115–121 thousand kgC/ha are accumulated, most of which is concentrated in the soil. The production-destructive processes of organic matter in the phytocenosis-soil system are estimated. It is shown that on the cutting of spruce forests the carbon costs of the atmosphere for phytomass production (1.8–2.2 thousand kg/ha) prevail over its return with fall (1.4–1.7 thousand kg/ha). In the annual biological carbon cycle, felling of spruce forests is dominated by the plants of the ground cover. In the carbon cycle of cutting down, large-scale wood debris (deadwood, brushwood, felling remains, roots of cut trees) is of great importance, in the mass of which 22.0–27.6 thousand kgC/ha are concentrated, and forest litter accumulating 18.6–27.8 thousand kgC/ha.

**Keywords:** North, middle taiga, clear-cutting, felling, spruce forests, carbon stock, carbon flows.

На европейском Севере России на протяжении всей истории развития лесной отрасли промышленности еловые леса были одним из основных объектов лесопользова-

ния. Рубка леса является одним из мощных факторов динамики лесных сообществ, обуславливающих трансформацию структурных компонентов лесных экосистем и нарушение

в них обменных процессов. Оценку изменений функционирования лесных биогеоценозов в процессе рубки невозможно проводить без всестороннего изучения связей между фитоценозами и почвой. При этом следует отметить, что фитоценоз является определяющим компонентом биогеоценоза, формирующим его структурную организацию. В лесных сообществах после рубки происходят существенные изменения экологических условий среды, физико-химических свойств почв и в трансформации потоков вещества между почвой и фитоценозом [1–3]. Следует отметить, что количественная характеристика состояния и взаимодействия основных звеньев углеродного бюджета на вырубке является основой развития теории биопродукционного процесса, почвообразования в производных биогеоценозах на ранних стадиях их развития.

Цель настоящей работы – определение запасов и основных параметров годичного биологического круговорота углерода в системе почва–фитоценоз в экосистемах вырубок среднетаёжных ельников на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах. В ходе работы мы проверяли гипотезу, что на вырубках ельников в годичном углеродном цикле ведущая роль принадлежит растениям напочвенного покрова – эдификаторам экосистем. В углеродном бюджете данных сообществ также значима роль крупных древесных остатков (КДО): валежа, сухостоя, порубочных остатков, корней вырубленных деревьев.

### Объекты и методы

Исследования проводили в 2009–2014 гг. на территории Чернамского лесного стационара Института биологии Коми НЦ УрО РАН (62°01' с.ш., 52°28' в.д.). Работа выполнена на двух постоянных пробных площадях (ППП) размерами 0,20 и 0,25 га, заложенных в спелых ельниках в 1978 г. согласно ГОСТ 16128-70. В еловых сообществах до рубки проведены исследования углеродного цикла и освещены нами ранее [4, 5]. В зимний период 2005–2006 гг. в рассматриваемых еловых сообществах на 500 га проведена сплошнолесосечная рубка с хлыстовой трелёвкой древесины.

**Вырубка ельника черничного влажного.** При рубке ельника сохранились тонкомерные деревья (недоруб, семенники) в количестве 400 и сухостойные – 30 экз./га. Валеж составляет 185 экз./га с запасом древесины 12,5 м<sup>3</sup>/га. Самосев и подрост (8315 экз./га)

имеют состав 6ЕЗБ1Рб+ед СОс. Травяно-кустарничковый ярус с общим проективным покрытием (ОПП) 50–60%, образован брусникой, черникой, линнеей северной, осокой шаровидной, хвощом, луговиком извилистым. Моховый покров с ОПП 80–90% формируют *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Sphagnum wulfianum* Girg., *S. girgensohni* Russ., *S. russowii* Warnst., пятнами встречаются *Polytrichum commune* Hedw., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. и *Dicranum polysetum* (Mich.) Sw.

**Вырубка ельника долгомошно-сфагнового.** На вырубке сохранены тонкомерные деревья ели, сосны, берёзы и семенники – 588, сухостойные – 212 экз./га, валеж – 223 экз./га с запасом древесины 5,9 м<sup>3</sup>/га. Подрост и самосев (6760 экз./га) имеют состав 7ЕЗБ. Травяно-кустарничковый ярус с ОПП 60–70% образован брусникой, черникой, линнеей северной, осокой шаровидной, хвощом, луговиком извилистым и иван-чаем. Моховый покров почти сплошной образуют *Polytrichum commune* и *Sphagnum wulfianum*, *S. girgensohnii*, *S. russowii*, пятнами встречается *Dicranum polysetum*. Почва на вырубке обоих исследуемых ельников торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-гумусовая [6].

Углеродный бюджет на вырубке изучен по биопродуктивности. Массу и прирост органического вещества (ОВ) древесных растений определяли методом модельных деревьев [7, 8]. Проанализировано 20 модельных деревьев на вырубке ельника черничного и 23 – на вырубке ельника долгомошно-сфагнового, 10 модельных экземпляров подростка ели, 10 – берёзы, 8 – рябины. Массу стволов сухостоя, валежа, порубочных остатков вычисляли по их объёму и базисной плотности древесины. Прирост стволовой древесины оценивали по текущему приросту объёма ствола модельных деревьев, при помощи прибора LINTAB 5 с использованием программы Tsap Win Basic. Расчёт текущего прироста корней древесных растений определяли по [9], используя формулу 1:

$$P_{кр} = \frac{P_c \cdot K}{C}, \quad (1)$$

где  $P_{кр}$  – прирост корней (единицы массы);  $P_c$  – прирост стволов и ветвей (единицы массы);  $K$  – доля корней от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %;  $C$  – доля ствола и ветвей от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %.

Надземную массу растений напочвенного покрова определяли методом укосов на пло-

щадках размером 0,20 x 0,20 м в 20-кратной повторности. Годичная продукция травянистых растений равняется их надземной фитомассе. У кустарничков прирост принимался равным массе побегов текущего года с листьями. Годичную продукцию мхов определяли, срезая побеги текущего года у 100 растений каждого вида. Опад древесных растений учитывали с помощью опадоулавливателей размером 50 x 50 см в 20-кратной повторности. Массу опада кустарничков и мхов определяли по их приросту. Ежегодно отмирающую массу мхов принимали равной 70, черники – 100, брусники – 30% от прироста [1, 9]. Прирост и опад корней многолетних растений травяно-кустарничкового яруса составляют в среднем 25% от общей массы корней [5, 10]. Разложение компонентов и учёт потерь массы растительных остатков опада изучали по [11]. Образцы разных фракций растительного опада в 5-кратной повторности закладывали в мешочках из нейлоновой сетки (размер ячеек 1×2 мм) на поверхность лесной подстилки и по истечении 12 и 24 мес. определяли убыль в весе. Определяли скорость разложения (весовые потери) отдельных подгоризонтов (листовой, ферментативный, гумусовый) лесной подстилки. Запасы подстилки определяли с помощью монолитов, взятых металлическим шаблоном площадью 98 см<sup>2</sup> в 20-кратной повторности с учётом техногенной нагрузки (пасека, волок). Содержание углерода в древесных растениях вычисляли на основании полученных нами данных фитомассы и концентрации углерода в отдельных её фракциях, используя коэффициенты, приведённые в работе [12]. Для КДО использовали коэффициент 0,5.

Запасы С [т/га] в почве вырубке определяли по формуле 2 [13]:

$$C \text{ [т/га]} = C \text{ [%]} \rho_b h, \quad (2)$$

где С [%] – содержание гумуса относительно массы сухой почвы отдельных горизонтов,  $\rho_b$  [г/см<sup>3</sup>] – плотность почвы, h [см] – мощность слоя почвы, в котором сосредоточен углерод.

Концентрацию углерода и азота в образцах растений и растительных остатков подстилки определяли на базе аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН (аттестат РОСС RU.0001.511257 от 26.02.2014 г., действует до 26.02.2019 г.). Содержание углерода и азота в почвенных образцах определяли методом газовой хроматографии на автоматическом анализаторе EA-1100 фирмы Carlo Erba

(Италия). Математико-статистические расчёты выполнялись по [14]. Анализ, обработка материала проводилась на персональном компьютере с использованием программ Microsoft Word, Microsoft Excel.

### Результаты и их обсуждение

Оценку бюджета углерода в растительных сообществах следует проводить по 4 пулам: фитомассе, мёртвой древесине, почве и подстилке.

*Углерод фитомассы.* На вырубке углерод фитомассы образуют тонкомерные деревья недоруба, семенники, подрост, самосев, растения живого напочвенного покрова. На основе анализа модельных деревьев нами выведены регрессионные уравнения связи массы отдельных органов древесных растений с диаметром ствола на высоте 1,3 м, растений подроста с массой отдельных органов и высотой. Определены запасы ОВ древесных растений [15]. Показано, что в фитоценозах вырубки ельников аккумулируется 55,35–72,96 тыс. кгС/га (табл. 1). Так, содержание углерода органического вещества в древесных растениях на вырубке ельника черничного влажного составило 16281, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового – 22263 кг/га, из них в тонкомерных деревьях, недоруба и семенников 91,3 и 94,4% соответственно. В фитомассе растущих органов древесных растений самосева и подроста на вырубке ельника черничного влажного концентрируется 972, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового – 883 кгС/га. В фитомассе растений напочвенного покрова на вырубке ельника черничного влажного аккумулируется 4143 кгС/га, из них 56% сосредоточено в корнях трав и кустарничков. В концентрации углерода надземных органов растений напочвенного покрова приоритетную роль выполняют мхи (табл. 1).

На вырубке долгомошно-сфагнового ельника запасы углерода в растениях напочвенного покрова равны 4574 кг/га, из них в корнях трав и кустарничков концентрируется 66%. Следует отметить, что на вырубке происходит интенсивное развитие брусники, травянистых растений и мхов, особенно на волочных пространствах (табл. 1).

*Углерод КДО.* В лесных экосистемах фитодетрит является динамичным и значительным компонентом углеродного пула, участвующим в круговороте веществ и выполняющим промежуточную функцию в его потоках в системе почва–фитоценоз [16]. В КДО на вырубке ельника черничного ак-

кумулируется 21,96 тыс. кгС/га, из них 23% концентрируется в порубочных остатках, в валеже – 25, в сухостойных деревьях и сухих ветвях растущих деревьев – 1, в корнях – 51%. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового в КДО заключено 27,57 тыс. кгС/га, из них в сухостойных деревьях и сухих ветвях – 8%, в порубочных остатках – 24, в валеже – 15, в корнях – 53%.

Таким образом, на вырубке ельника черничного влажного пул углерода фитомассы составляет 42,38 тыс. кг/га. На начальном этапе формирования фитоценоза после рубки древостоя в аккумуляции углерода значима (51,8%) роль КДО. В концентрации углерода доля участия тонкомерных деревьев недоруба и семенников составляет 36,3%, древесных растений самосева и подроста – 2,3, растений напочвенного покрова – 9,6%. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового пул углерода фитомассы равен 54,41 тыс. кг/га и распределяется: 50,7, 39,3, 1,6 и 8,4% соответственно. Следует отметить, что различия между пулами углерода на вырубке двух типов ельников, развивающихся на полугидроморфных почвах, недостоверны ( $p > 0,05$ ) и находятся в пределах случайных колебаний этого показателя (табл. 1).

**Запасы углерода в почве.** В верхней части почвенного профиля вырубке ельника черничного влажного чётко выражена оторфованная подстилка  $A_0$  мощностью на пасеке  $12,2 \pm 1,0$ , на волоке –  $11,8 \pm 0,9$  см, под которой залегает подзолистый горизонт  $A_2$  (мощностью 12–17(20) см) со следами оглеения в нижней части, переходящий в горизонт  $A_2V_{fg}$  мощностью 17(20)–41 см. В метровом слое почвы данной вырубке ельника аккумулируется 72,1 тыс. кгС/га, из них 25,8% концентрируется в органогенном горизонте (табл. 2).

В почвенном профиле вырубке ельника долгомошно-сфагнового горизонт  $A_0$  имеет мощность на пасеке  $19,0 \pm 1,1$ , на волоке  $18,4 \pm 0,7$  см, под которым залегает подзолистый горизонт  $A_2g'$  (мощностью 15–19 см), переходящий в горизонт  $A_2g''$  мощностью 19–26 см и  $A_2V_{fg}$  мощностью 26–31 см. В метровом слое почвы вырубке данного ельника аккумулируется 66,7 тыс. кгС/га, в том числе в подстилке – 41,0% (табл. 2). В целом, в торфянисто-подзолисто-глеевой почве вырубке ельника черничного влажного запасы углерода гумуса ( $C_{орг.}$ ) в минеральной части метрового слоя составили 53,5, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового – 38,7 тыс. кг/га. Общие запасы органического углерода в метровом слое торфянисто-подзолисто-глеевой почвы вырубке ельников

составили 66,7–72,1 тыс. кг/га. Эти данные вписываются в пределы колебаний запасов углерода (от 44 до 151 т/га) в метровом слое почвы ельников средней тайги [5, 17, 18]. Следует отметить, что различия между запасами углерода в метровом слое торфянисто-подзолисто-глеевой почвы на вырубке ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового недостоверны ( $p > 0,05$ ).

**Продукция углерода фитоценозов.** В годичном приросте фитомассы на вырубке ельника черничного влажного ежегодно накапливается 1827 кгС/га, который сформирован в основном растениями напочвенного покрова (79%). Продукция углерода фитомассы древесных растений составила 367 кг/га в год, из них 46,7% накапливает берёза, 47,9 – ель, 5,4% – сосна. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового в продукции фитомассы ежегодно накапливается 2189 кгС/га, из них 75% депонируют растения напочвенного покрова. Продукция углерода древесных растений на данной вырубке равна 543 кг/га • год и сформирована она в основном елью (52,7%). Берёза и сосна накапливают 38,1 и 9,2% соответственно (табл. 1). Анализ показал, что отличия между продукцией углерода фитоценозов на исследуемой вырубке ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового недостоверны ( $p > 0,05$ ).

Таким образом, общий пул углерода в экосистемах вырубке еловых сообществ на торфянисто-подзолисто-глеевых почвах составляет 114,4–121,1 тыс. кг/га, из них 18–22% сосредоточено в растущих растениях фитоценозов, 19–23 в – КДО, 55–63% – в метровом слое почвы, включая подстилку (рис.).

**Углерод в деструкционном звене.** Нами рассмотрены структура опада и процессы его разложения [19]. Масса углерода, поступающего в почву с растительным опадом, на вырубке ельника черничного влажного равна 1439, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового – 1679 кг/га • год, что составляет 58–78% от ежегодной его продукции (табл. 1). На вырубке ельников на опад надземных органов растений приходится 55–60% от общей его массы. Основную часть (89%) растительных остатков опада формируют мхи и травянистые растения. Согласно [20], в условиях Архангельской области на 1–4-летних рубках ельников черничных на хвою и листву древесных растений приходится 2,8–3,7, на ежегодный опад травяно-моховой растительности 96–97% от общей массы опада.

На вырубке ельника черничного влажного распределение углерода надземного опада рас-

Таблица 1 / Table 1  
Структура углерода фитомассы на вырубке ельников / The carbon structure of phytomass in the felling of spruce forests

Фракция фитомассы/ Faction phytomass	Вырубка ельника черничного влажного / Felling of spruce myrtillus moist			Вырубка ельника долгомошно-сфагнового / Felling of spruce polytric-sphagnum		
	фитомасса, кг/га/ phytomass, kg·ha <sup>-1</sup>	продукция, кг/га · год / products, kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup>	опад, кг/га · год / plant debris kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup>	фитомасса, кг/га · год / phytomass, kg·ha <sup>-1</sup>	продукция, кг/га · год / products, kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup>	опад, кг/га · год / plant debris kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup>
<b>Ель / Spruce:</b>	<b>10234±640,9*</b>	<b>176±21,7</b>	<b>87±9,7</b>	<b>11722±721,9</b>	<b>293±46,5</b>	<b>106±12,2</b>
древесина стволовая / timber stem	4789±431,0	55±1,1	–	6176±555,8	76±1,5	–
кора стволовая / stem bark	615±92,3	13±0,2	0,7±0,5	534±80,1	17±0,3	0,3±0,2
ветви живые / living branches	1014±283,9	32±10,0	20±5,9	1064±287,3	45±13,1	23±7,2
хвоя / needles	1662±299,2	48±19,2	48±5,6	1557±202,4	112±44,5	61±7,1
корни / roots	2154±215,4	28±1,6	18±5,3	2391±286,9	43±2,5	22±6,8
<b>Сосна / Pine:</b>	<b>820±110,2</b>	<b>20±2,6</b>	<b>11±3,2</b>	<b>2010±310,3</b>	<b>51±6,2</b>	<b>10±2,1</b>
древесина стволовая / timber stem	560±100,8	8±0,1	–	1300±299,0	21±0,3	–
кора стволовая / stem bark	20±4,4	0,8±0,2	2±1,3	80±10,4	2±0,6	1±0,5
ветви живые / living branches	70±17,5	3±0,9	3±0,7	170±34,0	7±2,0	3±0,4
хвоя / needles	20±3,0	6±2,4	4±2,8	70±12,6	15±5,8	4±2,0
корни / roots	150±40,5	2±0,1	2±0,5	390±74,1	6±0,3	2±0,3
<b>Берёза / Birch:</b>	<b>5227±1020,7</b>	<b>171±3,6</b>	<b>54±26,5</b>	<b>8531±1438,1</b>	<b>199±4,1</b>	<b>60±23,3</b>
древесина стволовая / timber stem	2922±993,5	25±0,4	–	3909±1329,1	29±0,5	–
кора стволовая / stem bark	595±148,8	8±0,1	6±0,4	735±183,8	11±0,2	–
ветви живые / living branches	506±75,9	23±3,2	2±1,0	442±66,3	27±3,7	10±2,3
листья / foliage	179±57,3	100±1,3	44±26,5	289±92,5	111±1,4	44±23,1
корни / roots	1025±153,8	15±0,8	2±0,9	3156±504,9	21±1,1	6±1,4
<b>ИТОГО / TOTAL</b>	<b>16281±1210,3</b>	<b>367±22,2</b>	<b>152±28,4</b>	<b>22263±1638,8</b>	<b>543±47,1</b>	<b>176±26,3</b>
Кустарнички / Shrubs:	406±15,5	327,9±14,1	271±0,6	414±24,8	352,3±19,6	334±4,4
черника / blueberries	256±13,4	278,3±13,9	256±0,5	325±20,3	325,4±19,5	325±4,4
брусника / lingonberry	150±7,7	49,6±2,1	15±0,4	89±14,2	26,9±1,6	9±0,3
Травы / Herbs	165±14,2	165,0±9,5	165±1,9	168±15,2	168,4±6,7	168±0,4
Корни кустарничков и трав / The roots of shrubs and herbs	2339±171,8	584,7±40,9	585±0,5	3016±241,3	754,0 ±37,7	754±4,6
Мхи / Mosses:	1233±48,3	382,7±10,8	266±2,2	976±32,3	371,1±18,3	247±4,3
зелёные / true mosses	485±26,7	94,9±4,6	69±1,0	197±14,4	39,8±1,6	28±3,7
политриховые / polytrichidae	351±25,2	89,9±5,5	63±0,9	288±17,2	76,5±3,8	52±1,0
сфагновые / muskeg moss	397±31,9	197,9±8,1	134±1,8	491±23,2	254,8±17,8	167±1,9
<b>ИТОГО / TOTAL</b>	<b>4143±179,8</b>	<b>1460,3±45,6</b>	<b>1287±3,1</b>	<b>4574±245,2</b>	<b>1645,8±46,7</b>	<b>1503±7,7</b>
<b>ВСЕГО / TOTAL</b>	<b>20424±1223,6 ▲</b>	<b>1827,3±50,7 ▲</b>	<b>1439±28,6 ▲</b>	<b>26837±1657,0▲</b>	<b>2188,8±66,3▲</b>	<b>1679±27,4▲</b>

Примечание: \* – среднее значение ± ошибка, ▲ – различия между запасами углерода фитомассы, её продукция и растительных остатков опада на вырубке ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового не достоверны (p > 0,05).

Note: \* – average value ± error, ▲ – differences between carbon stocks of phytomass, its products and plant debris on felling of spruce myrtillus moist and polytric-sphagnum are not reliable (p > 0.05).

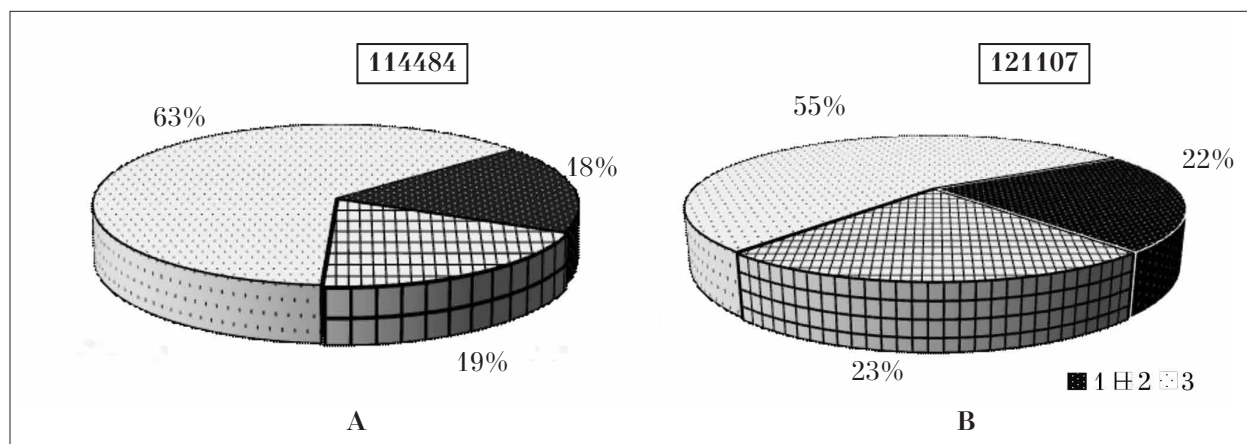
Таблица 2 / Table 2

Запасы углерода органического вещества почв на вырубке ельников/  
The carbon stock of soil organic matter on cutting down spruce

Объект, почва/ Object, soil	Запас углерода Carbon stock	Среднее значение, тыс. кг/га Medium value, thousand kg·ha <sup>-1</sup>	σ
Вырубка ельника черничного влажного, торфянисто-подзолисто- глееватая иллювиально-гумусовая / Felling of spruce myrtillus moist, peaty-podzolic-gleyey illuvial-humus	C <sub>орг</sub> до 20 см / C <sub>орг</sub> to 20 cm	6,2	±0,5
	C <sub>орг</sub> до 50 см / C <sub>орг</sub> to 50 cm	22,7	±2,8
	C <sub>орг</sub> до 100 см / C <sub>орг</sub> to 100 cm	53,5	±4,0
	углерод подстилки / carbon litter	18,6	±1,0
	углерод в слое 0–100 см / carbon in the layer 0–100 cm	72,1	±29,1
Вырубка ельника долгомошно- сфагнового, торфянисто-подзолисто- глееватая иллювиально-гумусовая / Felling of spruce polytric-sphagnum, peaty-podzolic-gleyey illuvial-humus	C <sub>орг</sub> до 20 см / C <sub>орг</sub> to 20 cm	8,0	±0,05
	C <sub>орг</sub> до 50 см / C <sub>орг</sub> to 50 cm	24,4	±0,55
	C <sub>орг</sub> до 100 см / C <sub>орг</sub> to 100 cm	38,7	±0,95
	углерод подстилки / carbon litter	27,8	±5,3
	углерод в слое 0–100 см / carbon in the layer 0–100 cm	66,7	±14,4

Примечание: σ – среднеквадратичное отклонение.

Note: σ – is the standard deviation.



**Рис.** Пул углерода на вырубке ельника черничного влажного (А), ельника долгомошно-сфагнового (В): 1 – углерод фитомассы, 2 – КДО, 3 – почва.  
**Fig.** Carbon pool on felling of spruce myrtillus moist (A), spruce polytric sphagnum (B): 1 – carbon of phytomass, 2 – coarse woody debris, 3 – soil.  
Within the total carbon stocks in the logging ecosystems, kgC · ha<sup>-1</sup>

тений напочвенного покрова (702 кг/га · год) следующее: кустарнички занимают 38,6%, травы – 23,5, мхи – 37,9% от общего их количества. В корнях кустарничков и трав содержится 45,5% углерода опада растительных остатков. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового углерод опада надземных частей растений напочвенного покрова (749 кг/га · год) распределяется следующим образом: кустарнички занимают 44,6, травы – 22,4 и мхи – 33,0%. В корнях трав и кустарничков концентрируется 50,0% углерода от содержа-

ния его в растительных остатках опада напочвенного покрова. Расхождения в содержании углерода в растительных остатках опада на вырубке двух типов исследуемых ельников на полугидроморфных почвах недостоверны (p > 0,05) (табл. 1). Выявлено, что интенсивность разложения отдельных компонентов опада за год на вырубке ельников колеблется от 2,2 до 69,5% [19]. Скорость минерализации растительных остатков опада невысокая – убыль в весе их в течение первого года на вырубке ельников около 36,0%.

Сплошнолесосечные рубки в еловых сообществах оказывают сильное воздействие на обменные процессы углерода в системе почва–фитоценоз. Нами показано, что в рассматриваемых среднетаёжных ельниках в процессе зимней сплошнолесосечной рубки при хлыстовой трелёвке деревьев вывозится 40–44% углерода от его запасов, аккумулированных в фитомассе ценозов [15]. Показано, что масса растений травяно-кустарничкового и мохового покрова, значит и углерода, на 4–6-летней вырубке в 2–2,5 раза больше, чем в спелых ельниках [19]. С КДО после рубки дополнительно в почву поступает 21,96–27,57 тыс. кгС/га. Следует отметить, что в настоящее время роль древесного дебриса, особенно корней вырубленных деревьев, в углеродном цикле и в целом в почвообразовании на вырубке в производных экосистемах практически не исследована. Продукция углерода фитомассы на вырубке исследуемых ельников в 1,3–1,8 раза меньше, чем в спелых ельниках до рубки. Разница в накоплении углерода в продукции фитомассы спелого ельника и на вырубке достоверна при  $p < 0,05$  (табл. 3).

Было отмечено, что в депонировании углерода в фитомассе спелых ельников основную роль (83–92%) выполняют древесные растения, а на вырубке, как показывают приведён-

ные в данной работе материалы, – растения напочвенного покрова (75–79%) [4, 5].

Следует также отметить, что с порубочными остатками и корнями вырубленных древесных растений в почву в этих экосистемах поступает большое количество углерода, примерно в 3 раза превышающее величину годового его поступления с опадом. Постепенно освобождаемый в процессе разложения и минерализации порубочных остатков и отмерших корней вырубленных деревьев углерод будет накапливаться в почве, выполняя значительную роль в почвообразовании [21].

Следовательно, при исследовании функционирования экосистем вырубке весьма важна оценка запасов мёртвого ОВ, пространственного распределения их, соотношения углерода живой и мёртвой фитомассы. Запас последнего складывается из древесного детрита (КДО) и лесной подстилки [16, 18]. Общие запасы углерода мёртвого ОВ (КДО+лесная подстилка) в исследуемых нами сообществах значительны и составляют 38,53–55,37 тыс. кг/га.

Формирование углерода ОВ в лесных экосистемах определяется двумя группами процессов: первая контролирует его продуцирование, вторая – потерю при отторжении с опадом, отпадом с последующей трансформацией на поверхности почвы. Мёртвое

Таблица 3 / Table 3  
Показатели потоков углерода в спелых ельниках и на 6-летней вырубке/  
Indicators of carbon fluxes in mature spruce forests and a 6-year old cutting

Углерод / Carbon	Ельники / Spruce			
	черничный влажный / myrtillus moist		долгомошно-сфагновый / polytric-sphagnum	
	спелый / ripe *	вырубка / cutting down	спелый / ripe **	вырубка / cutting down
Фитомассы (кг · га <sup>-1</sup> ) / Phytomass (kg · ha <sup>-1</sup> ):	<b>86480<sup>▲</sup></b>	<b>20424<sup>▲</sup></b>	<b>77710<sup>▲</sup></b>	<b>26837<sup>▲</sup></b>
древесные растения / woody plants	84870	16281	75810	22263
растения напочвенного покрова / ground cover plants	1610	4143	1900	4574
Продукции (кг · га <sup>-1</sup> · год <sup>-1</sup> ) / Products (kg · ha <sup>-1</sup> · year <sup>-1</sup> ):	<b>3432<sup>▲</sup></b>	<b>1827<sup>▲</sup></b>	<b>2810<sup>▲</sup></b>	<b>2189<sup>▲</sup></b>
древесные растения / woody plants	3130	367	2290	543
растения напочвенного покрова / ground cover plants	302	1460	520	1646
Опада (кг · га <sup>-1</sup> · год <sup>-1</sup> ) / plant debris (kg · ha <sup>-1</sup> · year <sup>-1</sup> )	<b>2117<sup>▲</sup></b>	<b>1439<sup>▲</sup></b>	<b>2060<sup>▲</sup></b>	<b>1679<sup>▲</sup></b>
древесные растения / woody plants	1815	152	1570	176
растения напочвенного покрова / ground cover plants	302	1287	490	1503

Примечание: \* – по [5], \*\* – по [4], ▲ – различия между запасами углерода фитомассы, его продукции и растительных остатков опада в спелых ельниках и на вырубке ельников достоверны ( $p > 0,05$ ).

Note: \* – according to [5], \*\* – to [4], ▲ – the differences between the carbon stocks of phytomass, its products and plant debris in mature spruce forests and felling of spruce forests are reliable ( $p > 0,05$ ).

ОВ на поверхности почвы, в свою очередь, является основой формирования компонента фитоценоза – лесной подстилки, как ельников, так и вырубков [19, 22, 23]. На вырубке среднетаёжных ельников на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах консервация ОВ значительно преобладает над процессом минерализации. Показатель C/N косвенно характеризует степень разложения и гумификации растительных остатков [24]. Согласно [19], наиболее интенсивно разлагаются листья берёзы, величина C/N в которых составляет 35–38. Это соотношение у хвой ели и сосны изменяется от 40 до 66. Показатель C/N в растительных остатках органогенного горизонта на вырубке составляет 32,7–35,0 (табл. 4).

Интенсивность минерализации подстилки тесно связана с особенностями распада растительных остатков и определяется массой, составом опада и гидротермическими условиями почв [23, 25, 26]. На вырубке ельника черничного влажного углерод, высвободившийся при разложении растительных остатков опада, составляет 536 кг/га · год или 37,2% от ежегодного накопления его фитоценозом. На вырубке долгомошно-сфагнового ельника в течение первого года освобождение углерода равно 631 кг/га, что составляет 37,6% от годового разложения растительных остатков опада. На вырубке ельников отмечено снижение, по сравнению со спелыми ельниками, запасов углерода в органогенном горизонте почвы. В спелом ельнике черничном влажном до рубки запас углерода подстилки составлял 26,0, в ельнике долгомошно-сфагновом – 32,6 тыс. кг/га. На 4–6-летней вырубке рассматриваемых ельников он в 1,3–1,4 раза меньше. Причиной слабой интенсивности разложения растительных остатков на фоне недостаточного тепла является относительно высокая влажность почв.

Следует отметить, что на вырубке ельников на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах в накоплении массы растений напочвенного покрова значительную роль выполняют сфагновые мхи. Следовательно, состав подстилки формируется под их влиянием. Растительные остатки, в составе которых доминируют сфагновые мхи, разлагаются медленнее, чем компоненты, сложенные из остатков сосудистых растений. Это объясняется химическим составом сфагновых мхов, в тканях которых содержатся полифенольные комплексы, ослабляющие минерализацию клеток [27]. На вырубке ельника черничного влажного в течение года убыль в массе лесной подстилки составила 13,4%, при этом высвободилось 2463 кг/га углерода. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового в период первого года наблюдений масса лесной подстилки уменьшилась на 11,9%, из неё высвободилось 3321 кг/га углерода (табл. 4).

### Заключение

В экосистемах вырубков среднетаёжных ельников на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах пул углерода растительного ОВ составляет 114–121 тыс. кг/га, большая часть (55–63%) которого концентрируется в почве, включая органогенный горизонт. Годовой прирост углерода растений в фитоценозах 4–6-летней вырубке ельников равен 1,8–2,2 тыс. кг/га и с опадом возвращается в почву 1,4–1,7 тыс. кг/га. В формировании нетто-продукции углерода и его годичного потока в почву основной вклад вносят растения напочвенного покрова. Особенностью экосистем вырубке ельников являются довольно большие запасы (22–28 тыс. кг/га) углерода КДО, большая часть которых формируется порубочными остатками и корнями вырублен-

Таблица 4 / Table 4  
Высвобождение углерода органического вещества лесной подстилки в процессе разложения на вырубке ельников / The release of carbon from the organic matter of forest litter in the process of decomposition on felling of spruce forests

Показатели / Indicators	Ельники / Spruce	
	черничный влажный / myrtillus moist	долгомошно-сфагновый / polytric-sphagnum
Запасы углерода подстилки, тыс. кг/га Carbon stocks of litter, thousand kg · ha <sup>-1</sup>	18,6±1,5	27,8±2,2
Потеря массы при разложении, (% год <sup>-1</sup> ) / Loss of mass when decomposed, (% year <sup>-1</sup> )	12,7	11,7
C/N	35,0	32,7
Высвобождение углерода из подстилки (тыс. кг/га · год) / Carbon release from the substrate (thousand kg · ha <sup>-1</sup> · year <sup>-1</sup> )	2,5±0,3	3,3±0,26



ных деревьев (подземный детрит). Освобожденный в процессе минерализации этих компонентов углерод на ранних стадиях развития производного фитоценоза, возникшего после рубки, послужит основой для образования органического углерода в почвах. На вырубке ельников на полугидроморфных почвах отношение C/N в растительных остатках опада составляет от 35 до 66, лесной подстилки – от 32,7 до 35, что свидетельствует о слабой интенсивности их деструкции. Суммарная потеря углерода в процессе минерализации растительных остатков опада на поверхности почвы составляет 530–630 кгC/га · год. Накопление углерода в почве за счёт закрепления его в минеральном субстрате в результате разложения растительных остатков органогенного горизонта равно 1,5–1,7 тыс. кг/га в год.

Сплошнолесосечная рубка приводит к значительным изменениям, как запасов, так и потоков углерода в лесных экосистемах. Подтверждается наша исходная гипотеза, что в годичном круговороте углерода в системе почва-фитоценоз в экосистемах вырубок на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах значима роль растений напочвенного покрова и КДО. Следовательно, для оценки баланса углерода в экосистемах вырубки необходимы данные эмиссионных потоков углерода с поверхности почвы и выделения CO<sub>2</sub> с гниющего древесного дебриса. Следовательно, знание влияния промышленных рубок на углеродный цикл хвойных лесов, в частности ельников, важно для понимания механизмов влияния антропогенных нагрузок на лесные сообщества и для оценки углерод депонирующей функции лесов при интенсивной их эксплуатации.

*Работа выполнена при поддержке проектов Комплексной программы Уральского отделения РАН № 15-12-4-39 и № 18-4-4-29.*

### Литература

1. Казимиров Н.И., Морозова Р.М., Куликова В.К. Органическая масса и потоки вещества в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.
2. Holtmark B. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt // *Climatic Change*. 2012. V. 112 (2). P. 415–428.
3. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // *Почвоведение*. 2017. № 7. С. 787–798.
4. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность и компоненты баланса углерода в заболоченных коренных ельниках Севера // *Лесоведение*. 2007. № 6. С. 45–54.

5. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 337 с.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
7. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // *Лесоведение и лесоводство. Итоги науки и техники» М.: ВИНТИ. 1975. С. 9–189.*
8. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.
9. Методы изучения лесных сообществ. СПб: НИИ химии СПбГУ, 2002. 240 с.
10. Dahlman K.C., Kuceera C.L. Root productivity and turnover in native prairie // *Ecology*. 1965. V. 46. P. 40–48.
11. Heath G.W., Edwards C.A., Arnold M.K. Some methods for assessing the activity of soil animals in the breakdown of leaves // *Pedobiologia*. 1964. V. 4. No. 1–2. P. 80–87.
12. Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // *Экология*. 2001. № 1. С. 69–71.
13. Глаголев М.В., Губер А.К., Садовникова Н.Б., Смагин А.В., Смагина М.В., Хайданова Д.Д., Шевченко Е.М. Моделирование динамики органического вещества почв. М: МГУ, 2001. 120 с.
14. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. Учебное пособие. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.
15. Bobkova K.S., Likhanova N.V. Removal of carbon and mineral nutrients upon clear felling of spruce forests in the middle taiga // *Contemporary Problems of Ecology*. 2012. V. 5. No. 7. P. 633–644.
16. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков 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 / Отв. ред. Г.А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 315 с.
17. Russel 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. V. 350. P. 107–128.
18. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // *Лесоведение*. 2007. № 6. С. 114–121.
19. Лиханова Н.В. Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2014. № 3. С. 52–66.
20. Чертовской В.Г. Долгомощные вырубки, их образование и облесение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 134 с.
21. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K.Jr., Cummins K.W. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems // *Adv. Ecol. Res*. 1986. V. 15. P. 133–202.

22. Ведрова Э.Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.

23. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: Издательство Кольского НЦ РАН, 1996. Ч. 1. 216 с. Ч. 2. 194 с.

24. Аристовская Т.В. Микробиология подзолистых почв. М.; Л.: Наука, 1965. 183 с.

25. Berg B., Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter // Terrestrial nitrogen cycles. Processes, ecosystem strategies and management impacts // Ecol. Bull. 1981. V. 33. P. 163–178.

26. Berg B., Staaf H. Release of nutrients from decomposing white birch leaves and Scots pine needle litter // Pedobiologia. 1987. V. 30. No. 1. P. 55–63.

27. Scheffer R.A., van Logtestijn R.S.P., Verhoeven J.T.A. Decomposition of *Carex* and *Sphagnum* litter in two mesotrophic fens differing in dominant plant species // Oikos. 2001. V. 92. P. 44–54.

### References

1. Kazimirov N.I., Morozova R.M., Kulikova V.K. Organic matter and substance flows in the birch forests of middle taiga. Leningrad: Nauka, 1978. 216 p. (in Russian).

2. Holtmark B. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt // Climatic Change. 2012. V. 112 (2). P. 415–428.

3. Dymov A.A. The effect of clear cuttings in the boreal forests of Russia on soils (review) // Pochvovedeniye. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian).

4. Bobkova K.S. Biological productivity and carbon balance components in the marshy spruce forests of the North // Lesovedeniye. 2007. No. 6. P. 45–54 (in Russian).

5. Indigenous spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions. Sankt-Peterburg: Nauka, 2006. 337 p. (in Russian).

6. Classification and diagnosis of the soil of the USSR. Moskva: Kolos, 1977. 223 p. (in Russian).

7. Utkin A.I. Biological productivity of forests (methods of study and results) // Lesovedeniye i lesovodstvo. Itogi nauki i tekhniki. Moskva: VINITI, 1975. P. 9–189 (in Russian).

8. Usoltsev V.A., Zalesov S.V. Methods for determining the biological productivity of plantations. Ekaterinburg: Ural. lesotekhn. universitet, 2005. 147 p. (in Russian).

9. Methods of studying forest communities. Sankt-Peterburg: NII Khimii. SPbGU, 2002. 240 p. (in Russian).

10. Dahlman K.C., Kuceera C.L. Root productivity and turnover in native prairie // Ecology. 1965. V. 46. P. 40–48.

11. Heath G.W., Edwards C.A., Arnold M.K. Some methods for assessing the activity of soil animals in the breakdown of leaves // Pedobiologia. 1964. V. 4. No. 1–2. P. 80–87.

12. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon content and calorific capacity of organic matter in the forest ecosystems of the North // Ekologiya. 2001. No. 1. P. 69–71 (in Russian).

13. Glagolev M.V., Guber A.K., Sadovnikova N.B., Smagin A.V., Smagina M.V., Khaidanova D.D., Shevchenko E.M.

Modeling the dynamics of soil organic matter. Moskva: MGU, 2001. 120 p. (in Russian).

14. Lagutin M.B. Visual mathematical statistics. Tutorial. Moskva: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007. 472 p. (in Russian).

15. Bobkova K.S., Likhanova N.V. Removal of carbon and mineral nutrients upon clear felling of spruce forests in the middle taiga // Contemporary Problems of Ecology. 2012. V. 5. No. 7. P. 633–644 (in Russian). doi: 10.1134/S1995425512070037

16. Kudayarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatsky S.A., Borisov A.V., Voronin P.Yu., Demkin V.A., Demkina T.S., Evdokimov I.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Komarov A.S., Kurganova I.N., Larionova A.A. Lopes de Gertnyu V.O., Utkin A.I., Chertov O.G. Pools and carbon fluxes in terrestrial ecosystems of Russia / Ed. G.A. Zavarzin. Moskva: Nauka, 2007. 315 p. (in Russian).

17. Russel 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. V. 350. P. 107–128.

18. Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V. Carbon stocks in the litter of forests of Russia // Lesovedeniye. 2007. No. 6. P. 114–121 (in Russian).

19. Likhanova N.V. The role of plant waste in the formation of forest litter on the cuttings of spruce forests of middle taiga // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2014. V. 3. P. 52–66 (in Russian).

20. Chertovskoy V.G. Cutting areas in haircap-moss forests, their formation and afforestation. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1963. 134 p. (in Russian).

21. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory, S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K.Jr., Cummins K.W. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems // Adv. Ecol. Res. 1986. V. 15. P. 133–202.

22. Vedrova E.F. Decomposition of the organic matter of forest litter // Pochvovedeniye. 1997. No. 2. P. 216–223 (in Russian).

23. Lukina N.V., Nikonov V.V. Biochemical cycles in the forests of the North in the conditions of aereotechnogenic pollution. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo NTs RAN. 1996. Ch. 1. 216 p. Ch. 2. 194 p. (in Russian).

24. Aristovskaya T.V. Microbiology of podzolic soils. Moskva; Leningrad: Nauka, 1965. 183 p. (in Russian).

25. Berg B., Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter // Terrestrial nitrogen cycles. Processes, ecosystem strategies and management impacts // Ecol. Bull. 1981. V. 33. P. 163–178.

26. Berg B., Staaf H. Release of nutrients from decomposing white birch leaves and Scots pine needle litter // Pedobiologia. 1987. V. 30. No. 1. P. 55–63.

27. Scheffer R.A., van Logtestijn R.S.P., Verhoeven J.T.A. Decomposition of *Carex* and *Sphagnum* litter in two mesotrophic fens differing in dominant plant species // Oikos. 2001. V. 92. P. 44–54.