



Изменение содержания углерода и элементов минерального питания в продукции фитомассы растений на вырубках среднетаежных ельников

© Н.В. Лиханова

Changes in carbon content and mineral nutrient elements in plant phytomass production on clear-cut areas of middle-taiga spruce forests

N.V. Likhanova (Saint-Petersburg State Forest Technical University, Syktyvkar forest institute)

The results of the assessment of changes in carbon and mineral nutrient elements in plant organic matter on clear-cut of spruce forests (moist blueberry spruce forest and polytric-sphagnum spruce forest) are presented. It has been shown that the carbon pool accumulated in the increase of phytomass on 4-year-old spruce clear-cuts amounts to 1,8–2,2 t/ha per year, whereas on 10-year-old clear-cuts of these spruce forests it is 2,1 t/ha per year. It is noted that on 4-year-old spruce clear-cuts, the annual carbon production of phytomass is mainly concentrated in ground cover vegetation (80 and 75 %), while the remaining part (20–25 % of the total carbon in the increase of plant organic matter) belongs to woody plants. On 10-year-old clear-cuts of blueberry moist and polytric-sphagnum spruce forests, the distribution of carbon in phytomass increment between vegetation layers changes: the share of ground cover plants accounts for 76 and 63 %, respectively, while the remaining share belongs to woody plants. For 4-year-old clear-cuts of these cenoses, the annual production formation requires 98–119 kg/ha of nitrogen and ash elements, which is 1,2–1,9 times less than on 10-year-old clear-cuts of spruce forests, where 116–229 kg/ha of mineral nutrients are required. On 4- and 10-year-old clear-cuts a similar pattern of accumulation of mineral nutrients in plant phytomass production is observed – nitrogen–potassium–calcium regimes. The post-logging period in cenoses is characterized by a significant restructuring of the structural ratios of carbon in the annual production of plant organic matter. During the restoration of phytocenoses, the contribution of ground cover vegetation, among which mosses, herbaceous plants, and shrubs strongly dominate, becomes especially important for carbon leaching to the formation of annual growth. These stud-

ies are of great importance for the development of nutrient cycling models in forest ecosystems, especially in the context of post-logging recovery of spruce forests.

Keywords: North Russia, middle taiga, spruce forests, production phytomass, clear-cutting, organic carbon, nitrogen, ash elements

Изменение содержания углерода и элементов минерального питания в продукции фитомассы растений на вырубках среднетаежных ельников

Н.В. Лиханова

Представлены результаты оценки изменений углерода и элементов минерального питания в продукции растительного органического вещества на вырубках ельников (черничного влажного и долгомошно-сфагнового типов леса) после сплошнолесосечных рубок. Показано, что пул углерода, аккумулированный в приросте фитомассы на 4-летних вырубках ельников составляет 1,8–2,2 т/га в год, тогда как на 10-летней вырубке – 2,1 т/га в год. Отмечено, что на 4-летних вырубках ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового годичная продукция углерода фитомассы сосредоточена преимущественно в растениях напочвенного покрова (80 и 75 % соответственно), остальная часть (20 и 25 % от общего углерода в приросте растительного органического вещества) приходится на древесные растения. На 10-летних вырубках ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового распределение углерода в приросте фитомассы между ярусами изменяется: доля растения напочвенного покрова составляет соответственно 76 и 63 %, а оставшаяся – принадлежит древесным растениям. Растениям ценозов 4-летних вырубок ельников ежегодно на формирование продукции потребуется 98–119 кг/га, 10-летних – 116–229 кг/га азота и зольных элементов. На 4- и 10-летних вырубках наблюдается одинаковый характер накопления элементов в продукции фитомассы растений – азотно-калиево-кальциевые режим.

Послерубочный период в ценозах характеризуется существенной перестройкой структурных соотношений углерода в ежегодной продукции растительного органического вещества. В процессе восстановления фитоценозов вклад растений напочвенного покрова, среди которых значительно преобладают мхи, травянистые растения и кустарнички, становится особенно важным для выноса углерода на построение годичного прироста. Эти исследования имеют большое значение при разработке моделей круговорота веществ в лесных экосистемах, особенно в контексте лесовозобновления после рубок ельников.

Ключевые слова: Север России, средняя тайга, еловые леса, продукция фитомассы, сплошнолесосечная вырубка, углерод растительного органического вещества, азот, зольные элементы

Лиханова Надежда Владимировна – старший преподаватель кафедры «Лесное хозяйство и лесопромышленные технологии», канд. биол. наук

E-mail: lihanad@mail.ru

Сыктывкарский лесной институт (филиал) ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

167000, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Ленина, д. 39

Введение

Развитие концепции о биогеохимическом цикле углерода представляет собой одну из научных задач, имеющую глубокое теоретическое значение и обширный практический потенциал. Этот цикл включает крупные хранилища органического вещества (ОВ), обеспечивающие высокую биопродуктивность [15, 16].

Вырубка лесов — один из ключевых антропогенных факторов, влияющих на экосистемы бореальной зоны, где сосредоточено значительное количество глобального углеродного пула. Преобразование лесных территорий в ходе сплошных рубок служит объективной причиной пространственной неоднородности возникающих вторичных ценозов. В итоге на месте вырубленных коренных еловых лесов формируется гетерогенная мозаика производных сообществ, различающихся по площади и конфигурации, видовому составу, возрасту, товарной и технической ценности, а также по темпам роста и биологической продуктивности [19, 23]. Такие вырубки приводят к перестройке экосистем, включая изменения в циклах углерода и элементов минерального питания (азота, калия, кальция и др.), что влияет на продуктивность, биоразнообразие и устойчивость лесов. С одной стороны, вырубки могут способствовать накоплению углерода, азота и зольных элементов фитомассы в напочвенном покрове и подросте, но с другой — привести к потере питательных веществ из почвы и снижению биоразнообразия [4, 8, 11, 15, 18, 19, 29, 33]. В условиях глобального потепления и интенсивного лесопользования понимание этих процессов критично для устойчивого лесохозяйства и смягчения изменения климата.

Для ельников среднетаежной зоны, подвергшихся рубке, наблюдаются существенные пробелы: отсутствуют сведения о ежегодном приросте фитомассы, балансе выноса элементов минерального питания и

сравнениях по лесорастительным условиям. Данные дистанционного зондирования и модели часто не учитывают локальные вариации. Анализ влияния лесных экосистем на антропогенное воздействие (вырубка), важен для понимания общих и региональных закономерностей лесообразовательных процессов, механизмов структурно-функциональной организации лесных биогеоценозов, а также антропогенной динамики нарушенных лесных сообществ.

Цель настоящего исследования — проанализировать изменения содержания углерода и элементов минерального питания в продукции фитомассы растений на 4- и 10-летних рубках среднетаежных ельников. Задачи включают: оценку запасов углерода и элементов минерального питания в древесных растениях (тонкомерные деревья (недоруб), подлесок, самосев и подрост) и растениях напочвенного покрова; выявление рядов потребления элементов питания в продукции растительного ОВ; сравнение изменений запасов углерода и элементов минерального питания в приросте разных ценозов рубок. Методы исследования основаны на полевых измерениях и химическом анализе растительности. Результаты могут внести вклад в модели углеродного баланса, круговорота веществ и рекомендации по лесовосстановлению.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на территории государственного казенного учреждения Республики Коми «Чернамское лесничество» Сыктывдинского района (62° 17' с. ш., 50° 30' в. д.). Объектами исследования являются два типа ельников: черничный влажный и долгомошно-сфагновый, произрастающих на торфянисто-подзолисто-глеяватой иллювиально-гумусово-железистой почве, сформировавшихся после рубки [4]. В районе исследования до рубки преобладали леса с доминированием ели сибирской (*Picea obovate* (Ledeb.)), характеристики которых

подробно описаны в предыдущих работах [2, 4, 12]. В данной статье приводим краткую характеристику древостоев.

Ельник черничный влажный (*Piceetum myrtillosum*): разновозрастный (70–210 лет) и разновысотный древостой V класса бонитета без выраженной ярусности. Запас стволовой древесины составлял 265 м³/га при составе 7Е2Б1С. Крупные древесные остатки: сухостой (75 экз./га), валеж (170 экз./га) и остолоп (115 экз./га). Подлесок представлен ивой (*Salix* sp.), рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) и шиповником (*Rosa* sp. L.). Растущий подрост — 2,1 тыс. экз./га. Травяно-кустарничковый ярус (ТКЯ) включает чернику обыкновенную (*Vaccinium myrtillus* L.), бруснику обыкновенную (*V. vitis-idaea* L.), морошку приземистую (*V. uliginosum* L.) и другие виды. Мохово-лишайниковый ярус (МЛЯ) представлен *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch. et Gmb., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* (Mich.) Sw. с пятнами *Polytrichum commune* Hedw. и сфагновыми мхами.

Ельник долгомошно-сфагновый (*Piceetum polytrichoso-sphagnosum*): разновозрастный (70–200 лет) и разновысотный древостой V класса бонитета составом 6ЕЗБ1С. Характеризовался значительным количеством сухостоя (100 экз./га) и валежа (126 экз./га). Подлесок — рябина, ива, шиповник. Подрост удовлетворительного состояния — 1,8 тыс. экз./га — представлен в основном елью. ТКЯ образован черникой, брусникой, линнеей северной (*Linnaea borealis* L.), осокой шаровидной (*Carex globularis* L.), хвощом лесным (*Equisetum sylvaticum* L.) и другими видами. Моховой покров почти сплошной, с преобладанием сфагновых, зеленых мхов и *Polytrichum commune* Hedw.

В зимний период 2005–2006 гг. в ельниках проведена сплошнолесосечная рубка с сохранением подроста. В условиях сплошных рубок выделяются несколько клю-

чевых технологических площадок, формирующихся в процессе лесозаготовок. Технологические коридоры (волоки) — линейные коридоры для перемещения древесины от места валки к погрузочным пунктам. Согласно законодательным нормативным документам [24], их размеры при сплошных рубках ограничиваются 20–30 % от площади лесосеки. Пасечные участки — зоны валки и накопления древесины для трелевки, занимают 59–71 % площади лесосеки [8, 23]. Погрузочные площадки, магистральные трелевочные волоки — места концентрации запаса древесины служат для аккумуляции и загрузки древесины на транспорт (в исследовании не рассматриваются).

Значительная часть деловой древесины была вывезена, другая часть оставлена на пасечных участках в виде тонкомерных деревьев (недоруба, семенников) для естественного лесовозобновления и поддержания биоразнообразия. Объем вывезенной деловой древесины составлял 186 м³/га (для ельника долгомошно-сфагнового) и 193 м³/га (для ельника черничного влажного), где хвойные породы (ель, сосна) занимали 71–85 %, лиственные (береза) — 15–29 %. Ресурсы тонкомерной древесины на ежегодно отводимых лесосеках ориентировочно насчитывают 4–5 % [20]. По нашим данным, запасы тонкомерной древесины на рубках были в пределах 7–11 % от общего объема стволовой древесины растущих деревьев до рубки [4].

В 1977 г. в ельнике черничном влажном и в 1981 г. в ельнике долгомошно-сфагновом заложены пробные площади (соответственно 40×50 м и 40×40 м) сотрудниками отдела Лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН. В 2009 и в 2015 гг. на этих участках продолжены исследования. Проведен сплошной пересчет деревьев, оставленных после рубки 2005–2006 гг. (недоруб, самосев, подрост, подлесок) (табл. 1).

Таблица 1

Количество деревьев и запасы древесины на вырубке ельников						
Период после рубки	Порода	Недоруб		Подлесок	Самосев	Подрост
		Число деревьев, экз./га	Запас древесины, м ³ /га	Число деревьев, экз./га	Число деревьев, экз./га	Число деревьев, экз./га
Ельник черничный влажный						
4 года	Ель	295	24	-	1130	1355
	Сосна	5	3	-	10	10
	Береза	100	15	-	3815	930
	Рябина	-	-	1045	-	-
	Ива	-	-	5	-	-
	Итого	400	42	1050	4955	2295
10 лет	Ель	145	12	-	605	2395
	Сосна	1	1	-	370	15
	Береза	90	22	-	1994	9071
	Рябина	-	-	1340	-	-
	Ива	-	-	15	-	-
	Итого	236	35	1355	2969	11481
Ельник долгомошно-сфагновый						
4 года	Ель	456	27	-	406	1952
	Сосна	19	1	-	-	-
	Береза	113	10	-	2888	1524
	Рябина	-	-	156	-	-
	Ива	-	-	13	-	-
	Итого	588	38	169	3294	3476
10 лет	Ель	344	40	-	176	1566
	Сосна	25	8	-	5	55
	Береза	94	13	-	1642	4158
	Рябина	-	-	181	-	-
	Ива	-	-	25	-	-
	Итого	463	61	206	1823	5779

К самосеву отнесены древесные растения в возрасте от 1 до 5 лет, естественно возобновившиеся из семян, к подросту – молодое поколение старше 5 лет, способное сформировать древостой в данных условиях роста. После рубки началась сукцессия, позволившая изучить динамику восстановления растительности [14] и биогеохимических процессов [4].

Данная статья продолжает изложение результатов исследований на вырубках среднетажных ельников, с акцентом на изменения содержания углерода, азота и зольных элементов в продукции массы растительного органического вещества в зависимости от возраста рубки. Такой методологический подход, опирающийся на данные длительных

наблюдений на постоянных пробных площадях, позволяет выявить ключевые биогеохимические сдвиги, определяющие траектории углеродного цикла и питательного статуса экосистем бореальных лесов, что в свою очередь способствует пониманию долгосрочных последствий антропогенного воздействия на устойчивость лесных сообществ [37, 41, 42].

4-летняя вырубка ельника черничного влажного. На вырубке наблюдалось активное заселение самосева и подроста (7,3 тыс. экз./га) преимущественно ели и березы (см. табл. 1). Формирующийся молодняк представлен категориями мелкой и средней крупности. Подлесок формируют ива и рябина (1,0 тыс. экз./га). Рябина в основном вегетативного происхождения. После рубки в роли семенников остались ель (295 экз./га), сосна (5 экз./га), береза (100 экз./га) с общим запасом древесины 42 м³/га, сухостойные деревья (90 экз./га) – 1,3 м³/га. Валеж – 245 экз./га с запасом древесины 12,9 м³/га и остолопы – 65 экз./га, в которых заключено 4,8 м³/га древесины. На вырубке ТКЯ пасечных участков с общим проективным покрытием (ОПП) 60 % образован черничкой обыкновенной, брусничкой обыкновенной, линнеей северной, майником двулистным (*Maianthemum bifolium* (L.) F. Schmidt), осокой шаровидной, хвощом лесным, луговиком извилистым (*Avenella flexuosa* (L.) Dreil.). МЛЯ представлен преимущественно *Pleurozium schreberi* и *Sphagnum wulfianum* Girg., *S. girgensohnii* Russ., *S. russowii* Warnst, которые занимают 80–90 % проективного покрытия. Встречаются пятнами *Polytrichum commune* Hedw. и *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch. et Gmb., реже – *Dicranum polysetum* (Mich.) Sw. ТКЯ волока с ОПП 50–60 % характеризуется доминированием бруснички, линнеей северной, майника, ожики волосистой (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), хвоща лесного, луговика извилистого, кипрея узколистного (*Epilobium angustifolium* L.) и иван-чая узколистного (*Chamaenerion angustifolium* L.). Моховой покров на волоке занимает 20–30 % и формируется за счет

Polytrichum commune, *Sphagnum wulfianum*, *S. girgensohnii*, *S. russowii*, *Pleurozium schreberi*, а также пятнами присутствует *Dicranum polysetum* (Mich.) Sw.

4-летняя вырубка ельника долгомошно-сфагнового. На территории рубки присутствовал подрост (6,8 тыс. экз./га) удовлетворительного состояния. После рубки в недорубе сохранились ель (456 экз./га), сосна (19 экз./га), береза (113 экз./га) с общим запасом древесины 38 м³/га (см. табл. 1). Сухостойные деревья (449 экз./га) представлены елью и березой – 28,2 м³/га, валеж (223 экз./га) – 5,9 м³/га и остолопы (81 экз./га) – 2,1 м³/га. В подлеске встречаются кусты рябины и ивы (169 экз./га). На пасечных участках рубки ельника с ОПП около 70 % произрастают такие виды, как черника обыкновенная, брусничка обыкновенная, линнеей северная, осока шаровидная, хвощ, луговик извилистый и иван-чай узколистный. Моховой ярус представлен практически сплошным покровом, в котором доминируют *Polytrichum commune* и сфагновые мхи – *Sphagnum wulfianum*, *S. girgensohnii*, *S. russowii*, а также пятнами встречается *Dicranum polysetum*. ТКЯ волока с ОПП около 70 % формируется брусничкой, линнеей северной, хвощом, луговиком извилистым и иван-чаем. Моховой покров, занимающий около 60 % площади, представлен *Polytrichum commune* в сочетании с *Sphagnum angustifolium*, *S. russowii*, *S. girgensohnii* и редко встречающимися зелеными мхами.

10-летняя вырубка ельника черничного влажного. На вырубке зафиксирован недоруб из ели, сосны и березы – 236 экз./га (35 м³/га) (см. табл. 1). Количество сухостойных деревьев составляло 30 экз./га (преимущественно ель) с запасом древесины 0,6 м³/га, валеж – 510 экз./га (27 м³/га), остолопы – 28 экз./га (1,1 м³/га). Общее количество самосева и подроста на исследуемой вырубке достигало 14,5 тыс. экз./га. Подрост характеризовался в основном здоровым состоянием и представлен различными категориями высот: мелкий (30 %), средний (40 %) и крупный (30 %).

В ТКЯ пасечных участков вырубки (ОПП – 20–30 %) преобладают осока шаровидная, марьянник луговой, линнея северная, иван-чай узколистный, а также кустарнички в виде черники обыкновенной и брусники обыкновенной. Хвощ лесной отмечается реже. Характерно высокое изобилие ожики волосистой и кислицы обыкновенной. МЛЯ с ОПП 40–50 % в основном состоит из *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi* Brid., *Polytrichum commune* и *Sphagnum russowii* Warnst. Изредка встречаются *Dicranum polysetum* Sw., *Sphagnum girgensohnii* Russ. и *S. wulfianum* Girg. В зоне волока ОПП ТКЯ варьирует от 30 до 40 % и определяется осокой шаровидной, хвощом лесным, черникой обыкновенной и брусникой обыкновенной. Встречаются в меньшей степени иван-чай узколистный, голокучник обыкновенный, линнея северная и седмичник европейский, появляется морозка приземистая. МЛЯ с ОПП 40–50 % формируется видами *Polytrichum commune*, *Pleurozium schreberi*, *Sphagnum wulfianum*, *S. girgensohnii*. Отмечается присутствие *S. russowii*, а также наблюдается полное исчезновение *Dicranum polysetum*.

На 10-летней вырубке ельника долгомошно-сфагнового присутствуют тонкомерные деревья в количестве 463 экз./га с общим запасом древесины 61 м³, сухостойные деревья представлены 24 экз./га с запасом 1,4 м³, валеж включает 140 экз. ели и 12 экз. березы (6,2 м³), остолопов насчитывается 52 экз. (3,4 м³). Самосев и подрост в количестве 7,6 тыс. экз./га представлен преимущественно березой (74 %), ель составляет 25 %, сосна – 1 %. Большая часть подроста относится к категории здоровых, однако у 15 % елей отмечено сомнительное состояние или признаки усыхания. На пасечных участках в ТКЯ с ОПП 20–30 % встречаются осока шаровидная, хвощ лесной, линнея северная, а также кустарнички: черника обыкновенная и брусника обыкновенная. Марьянник луговой наблюдается редко. Моховый ярус с ОПП 50–70 % характеризуется доминированием *Sphagnum*

girgensohnii и *S. russowii*, за которыми следуют *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*. В зоне волока ТКЯ с ОПП 20–30 % включает осоку шаровидную, линнею северную, голокучник обыкновенный, с добавлением иван-чая узколистного, кустарничков черники обыкновенной и брусники обыкновенной. Здесь также появляется марьянник луговой. МЛЯ с ОПП 40–60 % формируется *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *Sphagnum girgensohnii* и *S. russowii*.

Прирост надземной части древесных растений определяли методом модельных деревьев [32]. В том числе проанализировано 20 экземпляров недоруба, по 10 шт. – самосева и подростка ели, по 10 шт. – рябины, ивы. С помощью регрессионных уравнений рассчитаны отдельные фракции прироста древесных растений.

Прирост корней определяли по формуле: $P_{кр} = (n_c * K) / C$, где $P_{кр}$ – прирост корней (единицы массы), n_c – прирост стволов и ветвей (единицы массы), K – доля корней от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %, C – доля массы ствола и ветвей от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %.

Продукцию растений напочвенного покрова определяли путем отделения побегов текущего года у 80–100 растений с учетом технологического участка вырубки (волока, пасечный участок) на площадях 400 см². На основе соотношений массы однолетних побегов текущего года к массе многолетних частей растения и общему запасу растения рассчитывали общий прирост массы. Прирост корней ТКЯ был принят равным 1/4 от их массы [7].

Пересчет продукции ОВ растений на углерод проводили дифференцированно по компонентам с применением конверсионных коэффициентов (0,45–0,53), характерных для отдельных фракций [6].

Содержание азота (N) в растительных образцах определяли методом газовой хроматографии. Количественное определение химических элементов (Ca, Si, Mg, Mn, K, Na, P,

Fe, Al) отдельных компонентов растений осуществляли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Расчет годичного потребления азота и зольных элементов выполнялся путем умножения массы структурных компонентов прироста на значения содержания в них химических элементов [27].

Статистическая обработка данных представлена в виде среднего арифметического значения со стандартным отклонением и проверки статистических гипотез с помощью t-критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (при p-значении $\leq 0,05$ нулевая гипотеза об отсутствии различий отвергается, при p-значении $> 0,05$ считается, что различия статистически незначимы).

Результаты и их обсуждение

Одним из ключевых показателей функционирования лесных экосистем является интенсивность продуцирования ОВ, которая отражает способность лесов к поглощению и аккумуляции углерода ОВ [39]. Ранее проведенные исследования продемонстрировали, что текущий прирост фитомассы спелых ельников подзоны средней тайги колеблется в широких пределах – от 3,5 до 9,0 т/га. В лесных экосистемах этот показатель зависит от состава и возраста древостоя [3, 4, 10]. Прирост фитомассы в ельнике черничном влажном составлял 7,4 т/га в год, в ельнике долгомошно-сфагновом – 5,2 т/га в год [4, 35]. Кроме этого, представляем показатели запасов растительного ОВ на вырубках ельников. На 4-летней вырубке ельника черничного влажного фитомасса равна 73,6 т/га или 31,2 тС/га, ельника долгомошно-сфагнового – 88,6 т/га или 39,8 тС/га. Спустя 4 года после рубки углерод ОВ древесных растений составлял 52–56 %, растений напочвенного покрова – 11–13 %, крупных древесных остатков (сухостой, сухие ветви, валеж, остолопы, порубочные остатки вершин и обломков деревьев, пни) – 33–35 % от общей фитомассы. Спустя 10 лет после рубки масса ра-

стительного ОВ на вырубке ельника черничного влажного составляла 56,6 т/га или 25,2 тС/га, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового – 75,5 т/га или 34,0 тС/га. Распределение углерода растительного ОВ следующее: древесные растения – 65–70 %, растений напочвенного покрова – 10–18 %, крупные древесные остатки – 17–20 %.

При развитии естественных лесных сообществ на вырубках выделяются четыре последовательных стадии: этап послерубочной адаптации, этап заселения территории, этап смыкания крон молодых деревьев и этап дифференциации деревьев по классам роста, сопровождающейся прореживанием и стабилизацией ценотической структуры древостоя [19, 21]. Продолжительность и содержание этих стадий различаются в зависимости от типа вырубки и древесных пород. При порослевом возобновлении березы и осины первые две стадии почти полностью совпадают во времени, способствуя быстрому начальному приросту фитомассы благодаря интенсивному росту поросли. В то время как семенное возобновление лиственных деревьев занимает длительный период и завершается лишь после смыкания крон молодых деревьев, что замедляет прирост до начала конкуренции за ресурсы. Для подростка и тонкомерных деревьев ели особенно значима стадия послерубочной адаптации, когда происходит быстрая дифференциация по классам роста и отпад ослабленных и поврежденных во время рубки и трелевки деревьев, что напрямую влияет на продукцию ОВ, ускоряя их рост в высоту и диаметре в условиях сниженной конкуренции. Вместе с тем стадия заселения территории вырубок для ели продолжается на протяжении всего цикла формирования, роста, спелости и распада вторичных лиственных сообществ, постепенно интегрируя прирост ели с динамикой фитомассы лиственных пород и способствуя долгосрочному накоплению углерода через увеличение продуктивности [23].

В рассматриваемом исследовании 4-летней вырубки ельников черничного влажного

и долгомошно-сфагнового находились на стадии послерубочной адаптации. В то же время 10-летние рубки этих ценозов были на этапе заселения территории, характеризующимся постепенным внедрением ели в формирующееся вторичное листовое сообщество, что повлияло на прирост через образование фитомассы лиственных пород, способствуя накоп-

лению углерода и повышению общей продуктивности ценоза по мере развития конкуренции и сукцессии.

Древесные растения. Годичная продукция фитомассы древесных растений на рубках формировалась за счет тонкомерных деревьев (недоруба), самосева, подроста и подлеска (табл. 2).

Таблица 2

Годичная продукция фитомассы и содержание в ней углерода в древесных растениях на рубках ельников							
Порода	Продукция фитомассы и содержание в ней углерода (абс. сух. в-во), кг/га						
	Хвоя (ли- стья)	Ветви	Ствол		Итого надземная часть	Корни	Всего
			Древесина	Кора			
4-летняя рубка ельника черничного влажного							
Недоруб	149 ± 59 65 ± 26	98 ± 29 47 ± 13	159 ± 48 71 ± 21	41 ± 10 20 ± 5	447 ± 127 203 ± 58	67 ± 18 31 ± 8	514 ± 138 234 ± 14
Подлесок	-	-	-	-	-	-	15 ± 6 7 ± 2
Самосев	209 ± 83	24 ± 7	23 ± 7	3 ± 1	259 ± 72	27 ± 6	286 ± 77
Подрост	95 ± 38	11 ± 3	11 ± 3	1 ± 0	118 ± 34	12 ± 4	130 ± 7
10-летняя рубка ельника черничного влажного							
Недоруб	161 ± 46 73 ± 19	114 ± 26 54 ± 13	177 ± 48 84 ± 19	44 ± 10 21 ± 5	496 ± 125 232 ± 71	74 ± 19 35 ± 9	570 ± 141 267 ± 73
Подлесок	-	-	-	-	-	-	18 ± 7 8 ± 3
Самосев	348 ± 98	47 ± 11	28 ± 8	4 ± 1	427 ± 108	37 ± 9	464 ± 114
Подрост	158 ± 41	22 ± 5	13 ± 3	2 ± 0	195 ± 60	18 ± 5	213 ± 58
4-летняя рубка ельника долгомошно-сфагнового							
Недоруб	212 ± 59 92 ± 24	139 ± 38 66 ± 18	238 ± 68 113 ± 21	58 ± 14 28 ± 7	647 ± 178 299 ± 86	108 ± 30 51 ± 9	755 ± 207 350 ± 99
Подлесок	-	-	-	-	-	-	7 ± 2 3 ± 1
Самосев	328 ± 92	26 ± 7	23 ± 6	3 ± 0	380 ± 105	39 ± 11	419 ± 114
Подрост	143 ± 41	12 ± 3	11 ± 2	1 ± 0	167 ± 48	18 ± 5	185 ± 53
10-летняя рубка ельника долгомошно-сфагнового							
Недоруб	201 ± 58 91 ± 26	230 ± 61 110 ± 30	463 ± 127 220 ± 58	122 ± 28 58 ± 14	1016 ± 248 479 ± 137	157 ± 42 68 ± 13	1173 ± 335 547 ± 156
Подлесок	-	-	-	-	-	-	9 ± 3 4 ± 2
Самосев	343 ± 99	53 ± 14	30 ± 8	5 ± 1	431 ± 105	64 ± 17	495 ± 146
Подрост	156 ± 38	25 ± 7	14 ± 3	3 ± 0	198 ± 56	28 ± 5	226 ± 65

На 4-летней рубке ельника черничного влажного общий прирост древесных растений составлял 815 кг/га или 371 кгС/га, из них 48 % приходилось на березу, 46 % на ель, 6 % на сосну. На 4-летней рубке ельника долгомошно-сфагнового продукция ОВ древесных растений (1181 кг/га или 538 кгС/га) была сформирована елью (53 %), березой (38 %) и сосной (9 %). В этих ценозах прирост ОВ недоруба составлял 63–64 %, подроста – 35 %, подлеска – 1–2 %. Соотношение отдельных органов, образующих прирост фитомассы тонкомерных деревьев, распределялся следующим образом: на долю листьев (хвои) приходилось 28–29 %, древесины стволов – 31–32 %, ветвей – 18–19 %, корней – 13–14 % и коры стволов – 8 %. На 4-летних рубках ельников прирост растительного ОВ хвои подроста достигал 73–78 %, ветвей – 6–8 %, стволовой древесины – 5–8 %, коры стволов – 2 % и корней – 9 %. На рубке ельника черничного влажного численность древесных растений подлеска равнялась 1,0 тыс. экз./га с приростом массы растительного ОВ – 15 кг/га, на рубке ельника долгомошно-сфагнового – 169 экз./га и 7 кг/га соответственно.

На 10-летней рубке ельника черничного влажного годичная продукция ОВ древесных растений, оставленных в качестве тонкомерных деревьев, составляла 570 кг/га, что эквивалентно 267 кгС/га, на рубке ельника долгомошно-сфагнового – 1173 кг/га или 547 кгС/га. Годичный прирост самосева и подроста на рубках ельников составлял 464–495 кг/га или 213–226 кгС/га. На рубке ельника черничного влажного доля прироста растительного ОВ тонкомерных деревьев равна 54 %, самосева и подроста – 44 %, подлеска – 2 %. Продукция фитомассы древесных растений на рубке ельника долгомошно-сфагнового сформирована тонкомерными деревьями (69 %), самосевом и подростом (30 %), подлесочными растениями (1 %). Соотношение отдельных органов, образующих прирост фитомассы тонкомерных деревьев, по сравнению с 4-летней рубкой изменялось незначительно: на долю листьев (хвои) приходится 17–28 %, древесины стволо-

вой – 31–39 %, ветвей – 20 %, корней – 13–14 % и коры стволовой – 8–10 %. Распределение продукции по компонентам самосева и подроста 10-летних рубок ельников следующее: на долю листьев (хвои) приходится 69–75 %, древесины стволовой – 6 %, ветвей – 10–11 %, корней – 13–14 % и коры стволовой – 1 %. На начальном этапе (4 года) развития ельника черничного влажного после рубки в общей продукции фитомассы древесных растений наблюдалось доминирование тонкомерных деревьев (63–64 %), в то время как остальная масса приходилась на самосев, подрост и подлесок. На рубке ельника долгомошно-сфагнового отмечено преобладание ели с долей 53 %, тогда как на рубке ельника черничного влажного наблюдалось равновесие между березой (48 %) и елью (46 %). Это различие связано с более высокой численностью недоруба в долгомошно-сфагновом ценозе (588 экз./га), по сравнению с черничным влажным (400 экз./га), что способствовало большему накоплению растительного ОВ и продуктивности этих древесных растений. К 10 годам продукция ОВ древесных растений закономерно повышается (1052–1677 кг/га или 488–777 кгС/га). Наблюдаемые различия между участками рубок ельников по приросту ОВ древесных растений статистически значимы ($p > 0,05$).

Соотношение органов, формирующих прирост растительного ОВ недоруба меняется незначительно между 4- и 10-летними рубками. Доля хвои у тонкомерных деревьев снижается с увеличением возраста рубки, в то время как доля древесины увеличивается. Распределение прироста ОВ подроста относительно стабильно между 4- и 10-летними рубками. С течением времени преобладание прироста хвои сохраняется. Исследованиями С.Н. Плюсниной и А.М. Кузнецова [40] выявлено, что однолетние побеги ели на 7-летней рубке ельника черничного влажного статистически значимо превосходят побеги под пологом леса: по длине на 45–47 %, по количеству хвои – на 44–53 %. Авторы отмечают, что у здорового подроста ели предваритель-

ной генерации на вырубке формируется ассимиляционный аппарат, который позволяет не только успешно функционировать в изменившейся фитолиматической обстановке, но и превосходить здоровый подрост ели под пологом леса по структурным параметрам.

Растения напочвенного покрова. Прирост ОВ или углерода растений нижнего яруса на 4-летней вырубке ельника черничного влажного составлял 3077 кг/га или 1460 кгС/га, на вырубке ельника долгомошно-сфагнового — 3480 кг/га или 1645 кгС/га (рис.).

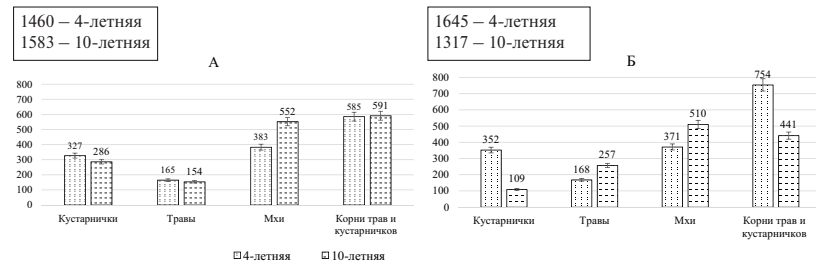


Рис. Углерод в продукции ОВ растений напочвенного покрова на вырубках ельников (абсолютно сухое вещество, кг/га): черничного влажного (А) и долгомошно-сфагнового (Б)

На данных вырубках основную часть углерода продукции фитомассы растений напочвенного покрова формировали мхи (23–26 %) и корни кустарничков и трав (40–46 %). Доля надземных органов растений составляла 54–60 % от общего углерода в продукции ОВ растений напочвенного покрова. На 10-летней вырубке ельника черничного влажного ежегодный прирост ОВ растений нижнего яруса достигал 3433 кг/га или 1583 кгС/га, тогда как на вырубке ельника долгомошно-сфагнового этот показатель составлял 2929 кг/га или 1317 кгС/га (см. рис.). Для сравнения, в фитоценозах ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового годичная продукция массы растений напочвенного покрова составляла 678 кг/га или 319 кгС/га и 1113 кг/га или 528 кгС/га соответственно [4].

Надземные органы растений напочвенного покрова 10-летних вырубок формировали 63–67 % от общего углерода в продукции ОВ растений нижнего яруса, причем вклад мхов достигал 56–58 %, что существенно выше, чем на 4-летней вырубках. На вырубке ельника черничного влажного прирост углеро-

да ОВ надземных органов кустарничков (брусника, черника) составил 29 %, а трав — 16 %, тогда как на вырубке ельника долгомошно-сфагнового — соответственно 12 и 29 %. Корни кустарничков и трав (33–37 % от общей продукции углерода ОВ растений напочвенного покрова) сосредоточены преимущественно в верхних почвенных горизонтах, где преобладают корни древесных растений, что приводит к конкурентной борьбе за питательные вещества в почвенной части биогеоценозов. Наблюдаемые различия между участками вырубок ельников по приросту ОВ растений напочвенного покрова статистически значимы ($p > 0,05$).

На 10-летней вырубке ельника черничного влажного доля трав и кустарничков в продукции углерода ОВ снижается, зато доля мхов увеличивается, что свидетельствует о сукцессионных изменениях и постепенном доминировании мохового покрова в восстановлении экосистемы. Аналогично, повышение продукции углерода фитомассы мхов (*Polypodiaceae* и *Sphagnaceae*) на 10-летней вырубке ельника долгомошно-сфагнового обусловлено сочетанием нескольких факторов: ослаблением конкуренции с корнями

древесных растений, повышением густоты и интенсивности прироста этих мхов, а также их способностью к вегетативному и споровому размножению, причем свет, согласно исследованиям В.Г. Чертовского [33], играет ключевую роль в активизации спорообразования, что способствует их быстрому распространению и адаптации к условиям после рубок. Автором отмечено, что на одностебельной вырубке молодые побеги *Polypodium commune* составляли около 40 % от общего их количества, тогда как под пологом ельника молодые стебли встречались всего в 2–5 % случаев.

Таким образом, в условиях вырубок ельников разного типа наблюдается значительный вынос углерода для формирования годичной продукции растительного ОВ. На 4-летней вырубке ельника черничного влажного этот показатель составил 3,9 т/га или 1,8 тС/га, что эквивалентно фитомассе (древесные растения и растения напочвенного покрова) 43,2 т/га или 20,5 тС/га. На вырубке ельника долгомошно-сфагнового углерод прироста ОВ выше: 4,6 т/га или 2,2 тС/га в год, что соответствует массе растительного ОВ 56,3 т/га или 26,7 тС/га. Исследования показывают, что через 4 года после рубки основная часть углерода в приросте фитомассы сосредоточена в растениях напочвенного покрова (75–80 % от общего углерода), оставшаяся часть приходится на древесные растения. На 10-летней вырубке ельника черничного влажного ежегодный прирост растительного ОВ составлял 4,5 т/га (2,1 тС/га), что соответствовало фитомассе 44,4 т/га (21,1 тС/га), на вырубке ельника долгомошно-сфагнового — 4,6 т/га (2,1 тС/га), при общей фитомассе 51 т/га (24,2 тС/га). На вырубках ельников распределение углерода в приросте фитомассы между ярусами изменяется: растения напочвенного покрова составляют 76 и 63 %, растения напочвенного покрова — 24 и 37 % соответственно.

Полученные показатели продуктивности растительного ОВ значительно превышают данные, представленные А.Л. Паршевниковым [22], для 6-летней вырубке ельника травяно-зелено-

мощного на торфянисто-перегнойной глееватой почве в Вологодской области (5,45 кг/га). Это связано с полным учетом структурных компонентов ценозов вырубок в проведенных нами исследованиях.

Химический состав растений. Растительность играет активную роль в процессах миграции и трансформации химических веществ. Интенсивность биогенной миграции элементов определяется химическим составом растений. Уровень концентрации элементов минерального питания в растениях и их частях является базовой информацией для оценки аккумуляции этих элементов в фитомассе и их вклада в формирование продукции ОВ лесных сообществ. Каждый химический элемент выполняет уникальную физиологическую функцию в росте растений, и дефицит одного из них не может быть компенсирован другим [27].

К настоящему времени накоплено значительное количество данных о содержании химических элементов в растениях словых фитоценозов таежной зоны [1, 10, 17, 26, 31, 34 и др.]. Химический состав растений изменяется в зависимости от возраста и состояния древостоя, климатических условий, плодородия почвы, видовой принадлежности растений, эдафических условий, стадий развития растений и их органов, а также сезонных колебаний, что обуславливает широкий спектр концентраций химических элементов в естественных условиях [1]. Исследования указывают, что у древесных растений максимальные уровни азота и зольных элементов наблюдаются в листьях. Далее следует кора, ветви, корни, при этом в тонких ветвях и корнях концентрация элементов выше, чем в толстых частях древесного растения. Минимальное количество элементов минерального питания обнаружено в стволовой древесине. Эта тенденция сохраняется и на ранних стадиях вырубок, что подтверждается нашими данными [4, 13]. Поглощение химических элементов растениями носит видоспецифический и генетически детерминированный характер [9]. Например, черника отличается

относительно повышенной концентрации кальция (0,6–0,7 %) в ассимилирующих органах этого кустарничка. Также отмечено высокое содержание марганца (0,24 %) в листьях и побегах черники. Среди зольных элементов у трав доминируют калий и кальций. Исключением является осока шаровидная, где количество кремния (1,3–2,3 %) превышает содержание калия, что ранее отмечалось другими исследователями [27, 28]. Подробный анализ химического состава растений в ельниках и на вырубках представлен нами ранее [4].

Запасы азота и зольных элементов в годичной продукции ОВ растений. Накопление элементов минерального питания в фитомассе лесных экосистем напрямую связано с объемом годичной продукции ОВ. В еловых сообществах подзоны средней тайги на формирование продукции выносятся от 145 до 186 кг/га азота и зольных элементов, что соответствует фитомассе в диапазоне от 5,2 до 7,8 т/га [2, 5, 11, 22, 25, 35]. Для этих экосистем характерен азотно-кальциево-калийный режим потребления, определяющий годичный прирост: N>Ca>K>Mg>P>Si>Mn>Al>Fe>Na.

Отметим, что в процессе промышленных рубок лесные фитоценозы испытывают значительные изменения в своей структурно-функциональной организации, что связано с выносом фитомассы (углерода ОВ) и элементов минерального питания. Так, при постепенных рубках ельников и березово-еловых сообществ Московской области при транспортировке хлыстов на погрузочную площадку выносятся около 50 % запаса питательных элементов, накопленных в срубленной части древостоев [28]. По А.С. Тихонову и С.С. Зябченко [30], вынос элементов минерального питания при сплошной рубке сосняков зеленомошной группы северотаежной зоны в условиях Карелии составляет при хлыстовой трелевке 54 %, при трелевке с кронами – 66 % от общего их запаса в надземных органах деревьев в древостоях. На сплошных рубках ельников в условиях Финляндии на лесосеке остается 56 % общей фитомассы древостоя [38]. Ранее нашими исследованиями установлено,

что при сплошнолесосечной рубке древостоев ельников с хлыстовой трелевкой вынос углерода составил 40–44 %, азота – 24–28 %, зольных элементов – 22–23 % от общего содержания их в древесных растениях при объеме вывезенной деловой древесины 186–193 м³/га и массе ОВ, составляющего 76–79 т/га или 37–38 тС/га [36].

При исследовании 4-летних вырубков черничного влажного и долгомошно-сфагнового ельников нами выявлено, что растениями ежегодно на формирование продукции потребуются 98–119 кг/га азота и зольных элементов соответственно (табл. 3), что в 1,1–1,7 раза меньше, чем в спелых ельниках.

Ряд потребления химических элементов на формирование продукции растительного ОВ для вырубки ельника черничного влажного: N>K>Ca>Si>P>Al>Mg>Mn>Fe>Na, для вырубки ельника долгомошно-сфагнового: N>K>Ca>Si>Mg>Al>P>Mn>Fe>Na. Важно подчеркнуть, что на вырубках в процесс формирования продукции интенсивно вовлекаются азот, калий, кальций, кремний и фосфор (82–87 %). На вырубках ельников годичное депонирование элементов минерального питания прироста растений напочвенного покрова составлял 81–96 кг/га, что соответствует 81–82 % от общего количества минеральных элементов, содержащихся в продукции растительного ОВ. Оставшаяся доля (18–19 %) относится к общему количеству элементов минерального питания в продукции растительного ОВ древесных растений. На 4-летних вырубках для формирования годичной продукции древесных растений характерен азотно-кальциево-калийный режим потребления элементов питания, для растений напочвенного покрова – различные питательные режимы. В частности, вырубка ельника черничного влажного характеризуется азотно-кальциево-кремневым режимом питания, тогда как вырубка ельника долгомошно-сфагнового – азотно-кальциево-кальциевым. Эти различия можно объяснить варьированием участия растений нижнего яруса и интенсивностью их роста.

Таблица 3
Запасы элементов минерального питания и ряды распределения химических элементов в приросте ОВ растений на 4- и 10-летней вырубках ельников

Химический элемент	Запасы элементов минерального питания в приросте ОВ растений на вырубках разных лет, кг/га					
	4-летняя		10-летняя		Всего	
	Древесные растения	Напочвенный покров	Древесные растения	Напочвенный покров	Древесные растения	Напочвенный покров
	<i>Вырубка ельника черничного влажного</i>					
Ca	3,6 ± 0,3	8,5 ± 0,5	12,1 ± 0,5	4,7 ± 0,4	9,7 ± 0,4	14,4 ± 0,6
K	3,1 ± 0,3	16,6 ± 0,7	19,7 ± 0,8	3,9 ± 0,2	17,6 ± 0,7	21,5 ± 0,8
Si	0,8 ± 0,0	9,3 ± 0,5	10,1 ± 0,5	1,3 ± 0,1	9,6 ± 0,4	10,9 ± 0,6
Mg	0,9 ± 0,0	2,5 ± 0,1	3,4 ± 0,3	1,1 ± 0,1	2,8 ± 0,3	3,9 ± 0,4
P	0,9 ± 0,0	3,7 ± 0,3	4,6 ± 0,4	1,1 ± 0,1	4,0 ± 0,4	5,1 ± 0,5
Mn	0,7 ± 0,0	2,4 ± 0,2	3,1 ± 0,3	0,8 ± 0,1	2,6 ± 0,3	3,4 ± 0,4
Al	0,2 ± 0,0	3,6 ± 0,3	3,8 ± 0,3	0,2 ± 0,0	3,3 ± 0,3	3,5 ± 0,3
Fe	0,1 ± 0,0	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,2	0,1 ± 0,0	2,4 ± 0,2	2,5 ± 0,2
Na	0,01 ± 0,0	0,3 ± 0,03	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,5 ± 0,1
N	7,5 ± 0,6	31,7 ± 1,8	39,2 ± 2,2	9,3 ± 0,5	41,0 ± 2,4	50,3 ± 2,9
Сумма без N	10,3 ± 0,8	48,9 ± 2,8	59,2 ± 3,4	13,3 ± 1,1	52,4 ± 3,0	65,7 ± 3,8
Сумма с N	17,8 ± 1,4	80,6 ± 3,5	98,4 ± 4,3	22,6 ± 1,7	93,4 ± 4,1	116,0 ± 5,1
	<i>Вырубка ельника долгомошно-сфагнового</i>					
Ca	4,8 ± 0,4	10,7 ± 0,6	15,5 ± 0,6	31,6 ± 1,4	7,0 ± 0,3	38,6 ± 1,7
K	4,0 ± 0,2	16,3 ± 0,7	20,3 ± 0,9	20,9 ± 0,9	16,9 ± 0,8	69,4 ± 3,3
Si	1,3 ± 0,1	10,0 ± 0,5	11,3 ± 0,5	10,7 ± 0,6	19,4 ± 0,9	30,1 ± 1,4
Mg	1,2 ± 0,1	7,9 ± 0,4	9,1 ± 0,6	4,8 ± 0,4	2,1 ± 0,3	6,9 ± 1,0
P	1,1 ± 0,1	4,1 ± 0,3	5,2 ± 0,4	5,7 ± 0,4	4,1 ± 0,4	9,8 ± 0,6
Mn	0,9 ± 0,0	2,7 ± 0,2	3,6 ± 0,3	4,8 ± 0,3	1,4 ± 0,1	6,2 ± 0,5
Al	0,3 ± 0,0	5,7 ± 0,4	6,0 ± 0,6	3,1 ± 0,2	3,9 ± 0,4	7,0 ± 0,4
Fe	0,2 ± 0,0	2,6 ± 0,2	2,8 ± 0,3	1,7 ± 0,2	2,1 ± 0,3	3,8 ± 0,3
Na	0,1 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,9 ± 0,1	0,7 ± 0,0	1,6 ± 0,1
N	9,5 ± 0,7	35,1 ± 1,9	44,6 ± 2,4	45,3 ± 2,4	41,7 ± 2,2	87,0 ± 4,6
Сумма без N	13,9 ± 1,0	60,5 ± 2,6	74,4 ± 3,2	84,2 ± 4,5	57,6 ± 3,3	141,8 ± 8,1
Сумма с N	23,4 ± 1,8	95,6 ± 4,1	119,0 ± 5,1	129,5 ± 5,6	99,3 ± 5,7	228,8 ± 13,1

На 10-летней вырубке ельника черничного влажного азот и зольные элементы, удерживаемые годичной продукцией древесных растений (недоруб, самосев, подрост, подлесок), составили 22,6, ельника долгомошно-сфагнового – 129,5 кг/га.

Ряд потребления элементов минерального питания древесными растениями изменяется на 10-летней вырубке ельника черничного влажного по сравнению с 4-летней вырубкой: наблюдается незначительное повышение содержания Si, что можно объяснить увеличением массы хвои (листьев) древесных растений, пошедших на построение прироста формирующихся ценозов. Ежегодный прирост фитомассы растений напочвенного покрова на вырубке ельника черничного влажного равен 93,4 кг/га, на вырубке долгомошно-сфагнового – 99,3 кг/га. Ряд выноса элементов на формирование продукции ОВ растениями напочвенного покрова на вырубке ельника черничного влажного: N>K>Ca>Si>P>Al>Mg>Mn>Fe>Na, ельника долгомошно-сфагнового: N>Si>K>Ca>P>Al>Mg >Fe>Mn>Na. На вырубке ельника черничного влажного отмечено снижение содержания Si, связанное с понижением фитомассы травянистых растений по сравнению с вырубкой ельника долгомошно-сфагнового. В целом ежегодное потребление элементов минерального питания растениями на 10-летних рубках ельников составляет 116–229 кг/га азота и зольных элементов с продолжающимся, как и на 4-летней вырубке, азотно-калиево-кальциевым режимом потребления (см. табл. 3).

Заключение

Как показали проведенные нами исследования, на 4-летней вырубке ельника черничного влажного ежегодный прирост фитомассы составлял 3,9 т/га (1,8 тС/га), что соответствует общему запасу растительного ОВ (древесные растения и растения напочвенного покрова), равному 43,2 т/га (20,5 тС/га). На вырубке ельника долгомошно-сфагнового эти показатели выше: 4,6 т/га или 2,2 тС/га, что сопоста-

вимо с запасом растительного ОВ, равного 56,3 т/га (26,7 тС/га). Рост продукции растительного ОВ обусловлен большей численностью тонкомерных деревьев (588 экз./га) и подроста (3476 экз./га) в долгомошно-сфагновом ценозе, по сравнению с черничным влажным (соответственно 400 экз./га и 2295 экз./га). Отметим, что на вырубке ельника долгомошно-сфагнового зафиксировано повышенное значение годичной продукции фитомассы в растениях напочвенного покрова (3480 кг/га или 1645 кгС/га), по сравнению с 4-летней вырубкой ельника черничного влажного (3077 кг/га или 1460 тС/га). Через 4 года после рубки ельников основная часть углерода в приросте фитомассы сосредоточена в растениях напочвенного покрова (75–80 %), оставшаяся часть приходится на древесные растения.

На 10-летней вырубке ельника черничного влажного прирост растительного ОВ составлял 4,5 т/га (2,1 тС/га), что соответствует фитомассе 44,4 т/га (21,1 тС/га). На вырубке ельника долгомошно-сфагнового 10-летнего возраста этот показатель равен 4,6 т/га (2,1 тС/га), при фитомассе 51 т/га (24,2 тС/га). Показатели прироста растительного ОВ и фитомассы на 10-летних рубках ельников черничного влажного и долгомошно-сфагнового практически сопоставимы. Это объясняется значительным снижением годичной продукции фитомассы растений напочвенного покрова (2992 кг/га или 1317 кгС/га) на вырубке ельника долгомошно-сфагнового в сравнении с вырубкой ельника черничного влажного, для которого этот показатель составляет 3433 кг/га или 1583 кгС/га. На рубках ельников с возрастом распределение углерода в приросте фитомассы между ярусами изменяется: доля растений напочвенного покрова составляла 76 % (ельник черничный влажный) и 63 % (долгомошно-сфагновый), тогда как доля древесных растений – 24 и 37 % соответственно.

Исследования 4-летних рубок показали, что ежегодное потребление элементов ми-

нерального питания растениями для формирования продукции растительного ОВ составляло 98–119 кг/га, на 10-летних рубках – 116–229 кг/га. Важно подчеркнуть, что на рубках интенсивное вовлечение в образование прироста растительного ОВ происходит за счет азота, калия, кальция и кремния (82–87 %), что свидетельствует об азотно-калиево-кальциевом режиме потребления. На рубках ельников отмечается повышенное содержание K, Si и P в рядах выноса элементов на формирование продукции массы ОВ, что связано со сменой растительного покрова после рубки древостоев. Значительную долю Si и K в продукцию растительного ОВ вносят как травянистые растения, так и мхи, доминирующие в нижнем ярусе данных ценозов. В частности, у таких видов как осока шаровидная и хвощ лесной наблюдается высокая массовая доля кремния в фитомассе. Содержание P в продукции фитомассы растений связано с активным потреблением этих элементов молодыми организменными структура-

ми – самосевом, подростом ели и березы, которые активно восстанавливаются на исследуемых рубках ельников.

Таким образом, сплошные рубки ельников значительно влияют на продуктивность фитоценозов, вызывая временные изменения в приросте ОВ, структуре растительности и перераспределении питательных веществ. Восстановление растительности способствует постепенному увеличению в приросте углерода фитомассы и элементов минерального питания.

Результаты исследования важны при разработке моделей круговорота веществ лесных сообществ, особенно в контексте лесовозобновления после рубок ельников. Дополнительные исследования вторичных ценозов рубок ельников послужат основой для более точного прогнозирования круговорота углерода и элементов минерального питания в растительном ОВ и структурных изменений в лесных сообществах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базилевич, Н.И. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – 381 с.
2. Бобкова, К.С. Биологическая продуктивность лесов / К.С. Бобкова // Леса Республики Коми. – М. : Издательско-продюсерский центр «Дизайн. Информация. Картография», 1999. – С. 40–54.
3. Бобкова, К.С. Бюджет углерода в экосистемах среднетаежных коренных ельников / К.С. Бобкова, М.А. Кузнецов // Журнал общей биологии. – 2022. – Т. 83, № 6. – С. 434–449. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S004434762206003X>.
4. Бобкова, К.С. Влияние промышленных рубок на круговорот веществ в системе почва–фитоценоз среднетаежных ельников на болотно-подзолистых почвах / К.С. Бобкова, Н.В. Лиханова, М.А. Кузнецов. – СПб. : Наука, 2024. – 246 с.
5. Бобкова, К.С. Круговорот элементов минерального питания в экосистеме коренного разнотравно-черничного ельника средней тайги (Республика Коми) / К.С. Бобкова, Е.А. Робакидзе, Н.В. Торлопова // Сибирский лесной журнал. – 2020. – № 2. – С. 40–54. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>.
6. Бобкова, К.С. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера / К.С. Бобкова, В.А. Тузилкина // Экология. – 2001. – № 1. – С. 69–71.
7. Бобкова, К.С. Круговорот азота и зольных элементов в сосново-еловом насаждении средней тайги / К.С. Бобкова, Н.Л. Смольцева, В.В. Тузилкина, В.А. Артемов // Лесоведение. – 1982. – № 5. – С. 3–11.
8. Дымов, А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми / А.А. Дымов. – М. : ГЕОС, 2020. – 336 с.

9. Ильин, В.Б. Элементарный химический состав растений / В.Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1985. – 129 с.
10. Казимиров, Н.И. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии / Н.И. Казимиров, Р.М. Морозова. – Л. : Наука, 1973. – 175 с.
11. Климчик, Г.Я. Влияние сплошнолесосечных и равномерно-постепенных рубок главного пользования на возобновление и живой напочвенный покров ельников орляковых и кисличных в первые годы после рубок / Г.Я. Климчик, О.Г. Бельчина // Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 1 (240). – С. 5–12. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-240-1-5-12>.
12. Коренные еловые леса: биоразнообразие, структура, функции / Под ред. К.С. Бобковой, Э.П. Галенко. – СПб. : Наука, 2006. – 337 с.
13. Лиханова, Н.В. Изменение содержания макро- и микроэлементов в растениях напочвенного покрова ельников средней тайги после сплошной рубки / Н.В. Лиханова, К.С. Бобкова // Растительные ресурсы. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 223–232.
14. Лиханова, Н.В. Влияние сплошнолесосечных рубок на биоразнообразие растений среднетаежных ельников / Н.В. Лиханова, Ю.А. Бобров // Растительные ресурсы. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 35–48. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0033994625010033>.
15. Лукина, Н.В. Роль старовозрастных лесов в аккумуляции и хранении углерода / Н.В. Лукина, С.А. Бартаев, А.П. Гераскина [и др.] // Известия Российской Академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87 (4). – С. 536–557. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>.
16. Лукина, Н.В. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований / Н.В. Лукина, А.П. Гераскина, А.В. Горнов [и др.] // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3, № 4. – С. 1–90. – DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020341>.
17. Лукина, Н.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. – Апатиты : Изд-во Кольского НЦ РАН, 1998. – 316 с.
18. Лукина, Н.В. Питательный режим почв северо-таежных лесов / Н.В. Лукина, Л.М. Полянская, М.А. Орлова. – М. : Наука, 2008. – 342 с.
19. Наквасина, Е.Н. Неоднородность почвенно-растительного покрова при постагрогенной восстановительной сукцессии в средней подзоне тайги / Е.Н. Наквасина, Т.А. Парина, А.Г. Волков, Л.В. Голубева // Экология. – 2023. – № 1. – С. 22–34. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367059723010080>.
20. Никишов, В.Д. Комплексное использование древесины / В.Д. Никишов. – М. : Лесная пром-сть, 1985. – 264 с.
21. Маслаков, Е.Л. Формирование сосновых молодняков / Е.Л. Маслаков. – М. : Лесная пром-сть, 1984. – 165 с.
22. Паршевников, А.Л. Круговорот азота и зольных элементов в связи со сменой пород в лесах средней тайги / Типы леса и почвы северной части Вологодской области // Тр. Института леса и древесины СО АН СССР. – Л. : Институт леса АН СССР, 1962. – Т. 52. – С. 196–209.
23. Паутов, Ю.А. Техногенная структура вырубок – основа технологии лесовосстановления / Ю.А. Паутов. – Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1992. – Вып. 345. – 24 с.
24. Правила рубок главного пользования в равнинных лесах европейской части Российской Федерации: [утверждены приказом Рослесхоза от 31.08.1993 № 226] // Сборник нормативно-технических документов по лесному хозяйству. – М., 1993. – 25 с.
25. Продуктивность и круговорот элементов в фитоценозах Севера. – Л. : Наука, 1975. – 130 с.
26. Робакидзе, Е.А. Элементный состав доминирующих видов растений в среднетаежных сосняках разного возраста (на примере Республики Коми) / Е.А. Робакидзе, К.С. Бобкова, С.И. Наймушина // Растительные ресурсы. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 53–65.

27. Родин, Л.Е. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности / Л.Е. Родин, Н.И. Базилевич. – М. ; Л. : Наука, 1965. – 253 с.
28. Семенова, В.Г. Влияние рубок главного пользования на почвы и круговорот веществ в лесу / В.Г. Семенова – М. : Лесная пром-сть, 1975. – 184 с.
29. Сухарева, Т.А. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области / Т.А. Сухарева, Е.А. Иванова, В.В. Ершов [и др.] // Вопросы лесной науки. – 2023. – Т. 6 (2), № 125. – С. 1–75. – DOI: <https://doi.org/10.21266/JFSI.2023.6.2.001>.
30. Тихонов, А.С. Теория и практика рубок леса / А.С. Тихонов, С.С. Зябченко. – Петрозаводск : Карелия, 1990. – 224 с.
31. Торлопова, Н.В. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса) / Н.В. Торлопова, Е.А. Робакидзе. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 146 с.
32. Усольцев, В.А. Методы определения биологической продуктивности насаждений / В.А. Усольцев, С.В. Залесов. – Екатеринбург : Урал. лесотехн. ун-т, 2005. – 147 с.
33. Чертовской, В.Г. Долгомощные вырубки, их образование и облесение / В.Г. Чертовской. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 990 с.
34. Bauer, G. Linking plant nutrient and ecosystem processes / G. Bauer, H. Persson, T. Person [et al.] // Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystem. Ecological studies / Schulze E.D. (Ed.) – Berlin : Springer, 2000. – Vol. 142. – P. 63–98. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_9.
35. Bobkova, K.S. Nutrient cycle in indigenous polytritic-sphagnum spruce forests of the Komi Republic / K.S. Bobkova, N.V. Likhanova // Contemporary Problems of Ecology. – 2024. – Vol. 17, N 7. – P. 985–995. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425524700707>.
36. Bobkova, K.S. Removal of carbon and mineral nutrients upon clear felling of spruce forests in the middle taiga / K.S. Bobkova, N.V. Likhanova // Contemporary Problems of Ecology. – 2012. – Vol. 5, N 7. – P. 633–644. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425512070037>.
37. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 98. – P. 665–677. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
38. Kubin, E. The effect of clear cutting upon the nutrient status of a spruce forest in Northern Finland (64°29' N) / E. Kubin // Acta forest. Fenn. – 1977. – Vol. 155. – P. 1–40.
39. Litton, C.M. Carbon allocation in forest ecosystems / C.M. Litton, J.W. Raich, M.G. Ryan // Global Change Biology. – 2007. – Vol. 13. – P. 2089–2109.
40. Plyusnina, S.N. Influence of industrial felling on the structure of spruce undergrowth needles / S.N. Plyusnina, M.A. Kuznetsov // Biology Bulletin. – 2025. – Vol. 52, N 8. – P. 1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359024608851>.
41. Verkerk, P.J. Climate-Smart Forestry: the missing link / P.J. Verkerk, R. Costanza, L. Hetemäki [et al.] Forest Policy and Economic. – 2020. Vol. 115, N 102164. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>.
42. Yang, Y. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis / Y. Yang, Y. Luo, A.C. Finzi // New Phytologist. – 2011. – Vol. 190 (4). – P. 977–989. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645>.

REFERENCES

1. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic cycling on five continents: nitrogen and ash elements in natural terrestrial ecosystems. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 381 p. (In Russian).

2. Bobkova K.S. Biological productivity of forests. *Forests of the Komi Republic [Lesy Respubliki Komi]*. Moscow, Publishing and production center "Design. Information. Cartography", 1999, pp. 40–54. (In Russian).
3. Bobkova K.S., Kuznetsov M.A. Carbon budget in ecosystems of middle taiga native spruce forests. *Journal of General Biology [Zhurnal obshchej biologii]*, 2022, vol. 83, no. 6, pp. 434–449. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004434762206003X>. (In Russian).
4. Bobkova K.S., Likhanova N.V., Kuznetsov M.A. The influence of industrial logging on the circulation of substances in the soil-phytocenosis system of middle taiga spruce forests on bog-podzolic soils. SPb., Nauka, 2024, 246 p. (In Russian).
5. Bobkova K.S., Robakidze E.A., Torloпова N.V. The circulation of mineral nutrients in the ecosystem of the indigenous forb-bilberry spruce forest of the middle taiga (Komi Republic). *Siberian Forestry Journal [Sibirskij lesnoj zhurnal]*, 2020, no. 2, pp. 40–54. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>. (In Russian).
6. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon content and calorific value of organic matter in forest ecosystems of the North. *Ecology [Echologia]*, 2001, no. 1, pp. 69–71. (In Russian).
7. Bobkova K.S., Smolceva N.L., Tuzhilkina V.V. The cycle of nitrogen and ash elements in a pine-spruce forest of the middle taiga. *Forestry [Lesovedenie]*, 1982, no. 5, pp. 3–11. (In Russian).
8. Dymov A.A. Soil successions in boreal forests of the Komi Republic. Moscow, GEOS, 2020, 336 p. (In Russian).
9. Ilyin V.B. Elemental chemical composition of plants. Novosibirsk, Nauka, 1985, 129 p. (In Russian).
10. Kazimirov N.I., Morozova R.M., Kulikova V.K. Organic mass and matter flows in middle taiga birch forests. Leningrad, Nauka, 1978, 216 p. (In Russian).
11. Klimchik G.Ya., Belchina O.G. The influence of clear-cutting and uniform-gradual felling of final use on the renewal and living ground cover of bracken and wood sorrel spruce forests in the first years after logging. *Forestry, nature management and processing of renewable resources [Lesnoe hozjajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov]*, 2021, no. 1 (240), pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-240-1-5-12>. (In Russian).
12. Indigenous spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. SPb., Nauka, 2006, 337 p. (In Russian).
13. Lihanova N.V., Bobkova K.S. Changes in the content of macro- and microelements in ground cover plants of middle taiga spruce forests after clear-cutting. *Plant resources [Rastitel'nye resursy]*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 223–232. (In Russian).
14. Lihanova N.V., Bobrov Yu.A. The impact of clear-cutting on the biodiversity of plants in middle-taiga spruce forests. *Plant resources [Rastitel'nye resursy]*, 2025, vol. 61, no. 1, pp. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0033994625010033>. (In Russian).
15. Lukina N.V., Bartalev S.A., Geraskina A.P., Plotnikova A.S., Gornov A.V., Ershov D.V., Gavriljuk E.A., Kuznetsova A.I., Shevchenko N.E., Danilova M.A., Tebenkova D.N., Tikhonova E.V., Ruchinskaya E.V. The role of old-growth forests in carbon accumulation and storage. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series [Izvestiya Rossijskoi Akademii nauk. Seriya geo-graficheskaya]*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 536–557. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>. (In Russian).
16. Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Tebenkova D.N., Gornova M.V. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. *Issues of forest science [Voprosy lesnoj nauki]*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 1–90. DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020341>. (In Russian).
17. Lukina N.V., Nikonov V.V. Nutrient regime of northern taiga forests: natural and man-made aspects. Apatity, Izd-vo Kolskogo NC RAN, 1998, 316 p. (In Russian).

18. Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A. Nutrient regime of soils of northern taiga forests. Moscow, Nauka, 2008, 342 p. (In Russian).
19. Nakvasina E.N., Parinova T.A., Volkov A.G., Golubeva L.V. Heterogeneity of soil and vegetation cover during post-agrogenic restorative succession in the middle taiga subzone. *Ecology [Ekologiya]*, 2023, no. 1, pp. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367059723010080>. (In Russian).
20. Nikishov V.D. Complex use of wood. Moscow, Forestry industry, 1985, 264 p. (In Russian).
21. Maslakov E.L. Formation of young pine stands. Moscow, Forestry industry, 1984, 165 p. (In Russian).
22. Parshevnikov A.L. The cycle of nitrogen and ash elements in connection with the change of species in the middle taiga forests. # Forest and soil types in the northern part of the Vologda region. *Proceedings of the Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences [Tr. In-ta lesa i drevesiny SO AN SSSR]*, Leningrad, In-t AN SSSR, 1962, no. 52, pp. 196–209. (In Russian).
23. Pautov Yu.A. The man-made structure of logging is the basis of reforestation technology. Syktyvkar, Komi NC UrO RAN, 1992, vol. 345, 24 p. (In Russian).
24. Rules for Final Cutting in the Flatland Forests of the European Part of the Russian Federation: [Approved by Rosleskhoz Order No. 226 of August 31, 1993]. Collection of Regulatory and Technical Documents on Forestry. Moscow, 1993, 25 p. (In Russian).
25. Productivity and cycle of elements in phytocenoses of the North. Leningrad, Nauka, 1975, 130 p. (In Russian).
26. Robakidze E.A., Bobkova K.S., Najmushina S.I. Elemental composition of dominant plant species in middle taiga pine forests of different ages (using the Komi Republic as an example). *Plant resources [Rastitel'nye resursy]*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 53–65. (In Russian).
27. Rodin L.E., Bazilevich N.I. Dynamics of organic matter and biological cycling in the main types of vegetation. Moscow; Leningrad, Nauka, 1965, 253 p. (In Russian).
28. Semenova V.G. The impact of final felling on soils and the circulation of substances in the forest. Moscow, Forestry industry, 1975, 184 p. (In Russian).
29. Suhareva T.A., Ivanova E.A., Ershov V.V., Zenkova I.V., Kornejkova M.V., Shtabrovskaya I.M., Soshina A.S. Content and reserves of carbon and nitrogen in terrestrial ecosystems of the Murmansk region. *Issues of forest science [Voprosy lesnoj nauki]*, 2023, vol. 6 (2), no. 125, pp. 1–75. DOI: <https://doi.org/10.21266/JFSI.2023.6.2.001>. (In Russian).
30. Tihonov A.S., Zybchenko S.S. Theory and practice of logging. Petrozavodsk, Kareliya, 1990, 224 p. (In Russian).
31. Torloпова N.V., Robakidze E.A. The impact of pollutants on coniferous phytocenoses (using the example of the Syktyvkar forest industry complex). Ekaterinburg, UrO RAN, 2003, 146 p. (In Russian).
32. Usolcev V.A., Zalesov V.A. Methods for determining the biological productivity of plantings. Ekaterinburg, Ural. forestry engineering university, 2005, 147 p. (In Russian).
33. Chertovskoy V.G. Long-moss clearings, their formation and afforestation. Moscow, AN SSSR, 1963, 134 p. (In Russian).
34. Bauer G., Persson H., Person T., Mund M., Hein M., Kummert E., Matteucci G., van Oene H., Scarascia-Mugnozza G., Schulze E.-D. Linking plant nutrient and ecosystem processes. Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystem. Ecological studies. *Schulze E.D. (Ed.)*. Berlin, Springer, 2000, vol. 142, pp. 63–98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_9.
35. Bobkova K.S., Likhanova N.V. Nutrient cycle in indigenous polytritic-sphagnum spruce forests of the Komi Republic. *Contemporary Problems of Ecology*, 2024, vol. 17, no. 7, pp. 985–995. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425524700707>.
36. 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, vol. 5, no. 7, pp. 633–644. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425512070037>.



37. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 98, pp. 665–677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
38. Kubin E. The effect of clear cutting upon the nutrient status of a spruce forest in Northern Finland (64°29' N). *Acta forest. Fenn*, 1977, vol. 155, pp. 1–40.
39. Litton C.M., Raich J.W., Ryan M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, pp. 2089–2109.
40. Plyusnina S.N., Kuznetsov M.A. A Influence of industrial felling on the structure of spruce undergrowth needles. *Biology Bulletin*, 2025, vol. 52, no. 8, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359024608851>.
41. Verkerk P.J., Costanza R., Hetemäki L., Kubiszewski I., Leskinen P., Nabuurs G.J., Potočník J., Climate-Smart M. Forestry: the missing link. *Palahī Forest Policy and Economic*, 2020, vol. 115, no. 102164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>.
42. Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytologist*, 2011, vol. 190 (4), pp. 977–989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645>.

Статья поступила в редакцию 14.02.2026

DOI: 10.21178/2079-6080.2026.1.39
УДК 630*581.4

Параметры ассимиляционного аппарата у подроста сосны и ели и транспирация хвои на Большом Соловецком острове

© П.А. Феклистов^{1,3}, А.Н. Соболев², И.Н. Болотов¹, С.Н. Тарханов¹, О.Н. Тюкавина³, Ж.А. Бруева³

Parameters of the assimilation apparatus in pine and spruce undergrowth and pine needles transpiration on Bolshoy Solovetsky island

P.A. Feklistov, A.N. Sobolev, I.N. Bolotov, S.N. Tarkhanov, O.N. Tukavina, J.A. Brueva (N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; The Solovetsky State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve is a federal state cultural institution, historical, architectural and ethnographic museum-reserve; The Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov)

The study was carried out on Bolshoy Solovetsky Island on a stand of pine and spruce, which was located under the canopy of the most represented types of forest in pine forests and spruce forests. The study of the assimilation apparatus was carried out on specimens of undergrowth from different altitude groups from the immaculately reliable category. Transpiration was determined by rapid weighing. It was found that the needles of the pine undergrowth have a length of 22–27 mm. The largest length is in blueberry and sphagnum pine forests, and the smallest is in lichen and moss-lichen pine forests. The weight of the average needles is 11–15 g. The width and thickness vary slightly, the width is in the range of 1–1.3 mm, the thickness 0.5–0.6 mm. It is shown that spruce needles have a length of 12–13 mm, the largest in blueberry pine, and the smallest in blueberry spruce. The mass of the average needles is 6–8 g. The results of measuring the transpiration of pine and spruce undergrowth are presented, they are considered in three units of measurement: mg/g • hour; g/m² • hour; and relative transpiration % (ratio of transpiration to free physical evaporation). It was revealed that the transpiration of needles in pine undergrowth varied on different days and in different types of forest from 11 to 43 g/sq. m • hour, and in spruce undergrowth 9–11 g/sq. m • hour. The relative transpiration of pine undergrowth in different types of forest varied from 7 to 18 % of the value of physical evaporation. Annual needles evaporate moisture with an intensity of 23–26 %, and two-year-old needles evaporate 13–17 %. The relative