

УДК 630*181+582*475+630*187+577*118 (470.13)

КРУГОВОРОТ ЭЛЕМЕНТОВ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ В ЭКОСИСТЕМЕ КОРЕННОГО РАЗНОТРАВНО-ЧЕРНИЧНОГО ЕЛЬНИКА СРЕДНЕЙ ТАЙГИ (РЕСПУБЛИКА КОМИ)

К. С. Бобкова, Е. А. Робакидзе, Н. В. Торлопова

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28

E-mail: bobkova@ib.komisc.ru, robakidze@ib.komisc.ru, torlopova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.

Изучены локальные циклы химических элементов в экосистеме среднетаежного коренного разновозрастного ельника разнотравно-черничного *Piceetum herboso-myrtillosum* на подзолистых почвах. Показана структура органического и минерального вещества растений разных ярусов. Выявлены закономерности потребления и возврата химических элементов в системе почва–растительность. Основную роль в формировании структурного состава, годичной продукции и опада органического вещества в экосистеме старовозрастного ельника выполняет древостой. Отмечен довольно успешный возобновительный процесс под его пологом. Установлено, что в фитомассе растений аккумулируется $2298 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ элементов минерального питания. Высокой емкостью накопления характеризуются Ca, N, K и Si. При формировании годичной продукции растения ельника выносят $144.1 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ минеральных элементов. Скорость биологического круговорота элементов питания для ельника 7.3 лет. С годичным опадом на поверхность почвы поступает $104.5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ азота и зольных элементов. В процессе деструкции растительных остатков опада за год высвобождается $23 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ минеральных элементов. Главный источник питательных элементов – лесная подстилка. Запас химических элементов в ней составляет $1044.9 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$. С атмосферными осадками в почву в течение года поступает $24.5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ минеральных элементов. Выявлено, что их вынос за пределы корнеобитаемого слоя (0–30 см) с поверхностными почвенными водами составляет $59.2 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ в год.

Ключевые слова: ель сибирская *Picea obovata* Ledeb., фитомасса, продукция, опад, азот и зольные элементы, атмосферные осадки, почвенные воды, водная миграция минеральных элементов.

DOI: 10.15372/SJFS20200205

ВВЕДЕНИЕ

Биологический круговорот азота и зольных элементов – один из основных процессов в системе взаимоотношений между растительностью и почвой, являющийся важнейшей характеристикой функционирования лесных экосистем. Исследования круговорота веществ одновременно с миграционно-аккумулятивными процессами и водно-воздушными режимами почв имеют большое значение при решении проблем почвообразования и формирования структуры растительных сообществ (Ремезов и др., 1959; Родин, Базилевич, 1965; Смольянинов, 1969; Казимиров, Морозова, 1973; Гришина, 1974; Манак, Никонов, 1981; Кожевникова, Второва,

1988; Лукина, Никонов, 1996, 1998; Ушакова, 1997 и др.). Изучение бюджета элементов минерального питания в системе почва–фитоценоз в лесных биогеоценозах имеет непосредственное значение и для ведения лесного хозяйства. Только на основе точного учета объемов вовлечения их растениями в жизненный цикл и отслеживания трансформационных процессов при поступлении в почву растительных остатков в разных типах лесных сообществ можно научно обосновать рекомендации в различных направлениях практики лесного хозяйства. Оценка баланса элементов минерального питания в экосистеме позволяет ближе подойти к решению проблемы регулирования продуктивности лесов и улучшения их средообразующих функций.

На европейском Северо-Востоке России доминируют леса, сформированные елью сибирской *Picea obovata* Ledeb. В Республике Коми они занимают 16.2 млн га, из них 42 % располагаются в подзоне средней тайги (Бобкова и др., 2006). На территории этого региона сохранились значительные площади коренных ельников, выполняющих важные средообразующие функции. Они являются и основным объектом лесозаготовок. Старовозрастные ельники представлены, главным образом, зеленомошной (47.6 %) и долгомошной (36.8 %) группами типов. Травяные типы занимают 3.2 %, сфагновые – 12.2 %. Значительное (73.9 %) участие спелых и перестойных насаждений в составе среднетаежных еловых формаций рассматриваемого региона обуславливает определение в них бюджета химических элементов в системе почва–растительность. Работы, освещающие биологический круговорот элементов минерального питания в экосистемах среднетаежных ельников, единичны (Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999).

Цель работы состоит в оценке потоков азота и зольных элементов в системе почва–фитоценоз коренного среднетаежного ельника разнотравно-черничного на типичных подзолистых почвах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ельник разнотравно-черничный *Piceetum herboso-myrtillosum* располагается в подзоне средней тайги (62°17' с. ш. и 50°40' в. д.) на территории Ляльского лесозоологического стационара Института биологии Коми научного центра УрО РАН. Территория стационара является частью Мезенско-Вычегодской равнины, поверхность которой покрыта четвертичными отложениями мощностью в десятки метров. Отложения

включают два горизонта морены, верхний из которых был оставлен льдами Московского оледенения. Верхняя морена большей частью размыта и опесчанена, во многих местах перекрыта озерно-ледниковыми и флювиогляциальными отложениями (Атлас..., 1964). Озерно-ледниковые отложения мощностью 0.4–11.0 м залегают непосредственно под почвенно-растительным слоем. Они состоят из голубовато-серого суглинка, на поверхности коричневого, с прослойками и линзами супеси, песка, местами с галькой и гравием. Пески мелкие, глинистые, местами пылеватые, коричневые, коричневатожелтые, серые. Флювиогляциальные отложения представлены мелкими желтовато-коричневыми кварцевыми слабоглинистыми песками средней плотности. Мощность отложений 1.7 м. Подземные воды не имеют сплошного развития, расположены спорадически и приурочены к песчаным линзам и прослойкам в толще суглинистых отложений. Глубина залегания подземных вод от 5.0 до 15.5 м. Мощность водоносных слоев от нескольких сантиметров до 3 м и более (Рубцов и др., 1990). Такие элементы рельефа представляют собой зоны выноса и частичного транзита воды, минеральных элементов, химических соединений и характеризуются относительной дренированностью почвенного профиля.

Древесный ярус состоит из ели сибирской, пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb., березы пушистой *Betula pubescens* Ehrh., березы повислой *B. pendula* Roth, сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., осины обыкновенной *Populus tremula* L., имеет состав 7ЕЗБ + П, С ед. Ос (табл. 1). Древостой аккумулирует 311 м³ · га⁻¹ стволовой древесины. Сухостой 200 экз. · га⁻¹ с запасом древесины 25 м³ · га⁻¹ представлен тонкомерной елью. Подрост 8288 шт. · га⁻¹, в основном из здоровой ели мелкой и средней катего-

Таблица 1. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоя ельника разнотравно-черничного

Состав	Порода	Возраст, лет	Число деревьев, экз. · га ⁻¹		Сумма площадей сечений, м ² · га ⁻¹	Запас древесины, м ³ · га ⁻¹		Средние		Количество подроста, экз. · га ⁻¹
			растущих	сухих		растущих	растущей	сухой	высота, м	
7ЕЗБ + П, С ед. Ос	Ель	80–160	575	167	22.0	216	25.0	18	22	6838
	Береза	60–110	258	8	7.7	68	0.02	18	20	1450
	Сосна	110	17	8	1.1	12	0.2	22	29	–
	Пихта	110	33	17	0.9	10	0.02	18	19	–
	Осина	110	8	–	0.4	5	–	24	26	–
	Всего	–	–	891	200	32.1	311.0	25.24	–	–

рии крупности. На поверхности почвы довольно много валежа (291 экз. · га⁻¹) из ели и березы.

В подлеске единично встречаются кусты можжевельника обыкновенного *Juniperus communis* L., шиповника иглистого *Rosa acicularis* Lindl., рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia* L., ивы *Salix* L. Травяно-кустарничковый ярус имеет простое синузальное строение, состоит из типичных бореальных растений: черники *Vaccinium myrtillus* L., брусники *Vaccinium vitis-idaea* L., майника двулистного *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt., линнеи северной *Linnaea borealis* L., седмичника европейского *Trientalis europaea* L., голокучника обыкновенного *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman и др. Почти сплошной моховой покров образуют гилокомиум блестящий *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., плевроциум Шребера *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. с незначительной примесью дикранума многоножкавого *Dicranum polysetum* Sw., кукушкина льна *Polytrichum commune* Hedw. и небольшими пятнами сфагновых мхов *Sphagnum* L. Названия растений приведены по С. К. Черепанову (1995). Микрорельеф биогенный из отпавших и заросших мхами деревьев, старых пней. Почва текстурно дифференцированная, подзолистая (Полевой определитель..., 2008; IUSS..., 2014). В почвенном профиле мощность горизонта О (подстилочно-торфяного) (7.7 ± 0.4) см, под ним залегает подзолистый горизонт Е – (7.3 ± 1.1) см, переходящий в горизонт ВЕL (субэлювиальный) – (13.0 ± 0.7) см и ВТ (текстурный) – (18.0 ± 0.7) см.

В рассматриваемом сообществе, согласно ОСТ 56-69-83 (1983), заложена постоянная пробная площадь (ППП) размером 0.24 га, на которой проведен сплошной пересчет деревьев. Высоту измеряли у 25 деревьев. Возраст определяли путем отбора кернов у 45 деревьев. Анализ таксационных материалов проведен по Лесотаксационному справочнику (1986). Определяли массу и продукцию органического вещества древесных растений по методу модельных деревьев (Уткин, 1975; Усольцев, 2007). В ельнике проанализированы модельные деревья ели (8 шт.), пихты (3 шт.), березы (7 шт.) и подроста (10 шт.). Надземную массу растений напочвенного покрова определяли методом укусов на уровне почвы буром диаметром 10 см в 35-кратной повторности. Ее продукцию вычисляли, отделив побеги текущего года у 80–100 растений. По полученным соотношениям рассчитывали общий прирост растений. Данные переводили в

абсолютно сухую массу высушиванием при температуре 105 °С. Прирост стволовой древесины оценивали по текущему приросту древесины модельных деревьев, определенному при помощи прибора LINTAB 5 с использованием программы Tsar Win Basic. Некоторые результаты определения массы и продукции органического вещества древесных растений опубликованы ранее (Бобкова и др., 2014).

Для определения массы и фракционного состава ежегодно поступающего на поверхность почвы растительного опада его учитывали в течение трех лет по общепринятой методике (Базилевич и др., 1978). Сбор опада осуществляли с помощью 18 опадоуловителей (ОУ), которые размещали на расстоянии 4–5 м вдоль границ ППП. Размеры деревянной рамки ОУ составляли 0.5 × 0.5 м с высотой боковых стенок 15 см. Массу опада кустарничков и мхов рассчитывали по их приросту.

Для оценки скорости трансформации и минерализации опада использовали традиционную методику (Heath et al., 1964) изучения разложения компонентов опада в мешках из нейлоновой сетки (размер ячеек 1 × 2 мм) и учета потерь массы. Пробы разных фракций опада в 3–5-кратной повторности (в зависимости от типа фракции) закладывали на поверхность лесной подстилки и по истечении 12 мес определяли убыль их массы.

Установка пробоотборников и сбор образцов осадков и лизиметрических вод проводили согласно общепринятым международным методикам (Manual..., 2002). Атмосферные осадки учитывали ежемесячно в течение года. Дождевые осадки собирали с июня по октябрь. Для сбора использовали осадкоприемники с диаметром приемной поверхности 18 см в 15-кратной повторности, которые размещали на расстоянии 5 м друг от друга под кронами елей, берез и в «окнах». Количество осадков, проникших под полог ельника, за теплый сезон составило, мм: 2007 г. – 255, 2008 г. – 176, 2009 г. – 332, 2010 г. – 247. Проанализировано 60 проб. Содержание элементов определяли в мг/дм³ и далее пересчитывали в кг/га. Для сбора твердых осадков использовали снегоприемники ($S = 1017.4$ см²), которые были установлены в 3–4 повторностях под кронами ели, березы и в межкрупных пространствах. Образец из каждого снегоприемника взвешивали и растапливали, затем на химический анализ отбирали средний образец из-под крон елей, берез и «окон». Содержание элементов определяли в г/м² и далее пересчи-

тывали в кг/га. Воды, свободно стекающие по почвенному профилю под влиянием гравитации, собирали в лизиметры с диаметром приемной поверхности 20 см, расположенные под каждым из горизонтов: О, Е и ЕВ. Лизиметры откачивали ежемесячно с июня по октябрь. Количество лизиметрических вод за теплый сезон (июнь–октябрь 2007–2009 гг.) в среднем составило, мм: горизонт О – 176, горизонт Е – 260 и горизонт ЕВ – 98. Для анализа взято 39 проб (среднее из 4 повторностей каждого горизонта).

Содержание азота и зольных элементов в различных компонентах фитомассы растений, в атмосферных и лизиметрических водах определяли на базе экоаналитической лаборатории «Экоаналит» Института биологии Коми научного центра УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257). Определение общего содержания азота в растительных образцах проводилось методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) CE Instrumets (Италия). Концентрация Ca, Si, Mg, Mn определена методом зольного анализа и на атомно-абсорбционном спектрофотометре Hitachi 18-60 МГА-915 (Япония), а концентрация K, Na, P, Fe, Al – методом плазменной фотометрии на спектрофотометре SP-90A (Великобритания). При химическом анализе проб вод применялись следующие методы количественного анализа: рН – потенциометрия электродами низкой ионной силы; сульфаты – турбидиметрия на КФК-3 (Россия); фосфаты, нитраты, ионы аммония – фотометрия, КФК-3; хлориды – колориметрическая титриметрия; кальций, магний, калий, натрий, железо, алюминий, марганец – атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

Статистическую обработку данных проводили, используя пакет программ Microsoft Excel 2003 (лицензия Института биологии Коми научного центра УрО РАН). В таблицах указаны средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При характеристике биогеохимической циркуляции минеральных элементов в лесных экосистемах выделяют 3 основных миграционных потока веществ: биологический, атмосферный и геохимический. Биологическая миграция – поглощение химических элементов растениями из почвы и возврат с опадом, атмосферная – поступление химических элементов в биогеоце-

ноз из атмосферы (осадки и пыль) за год, геохимическая – перемещение химических элементов по профилю почв и геохимических ландшафтов преимущественно с поверхностным и внутрпочвенным стоком.

Биологическая миграция. Этот поток определяется обменом элементами минерального питания почвы и растительности. Для ее оценки необходимо определение запасов и годичной продукции фитомассы, а также количества опада растительных остатков.

Запасы фитомассы. Регрессионные уравнения взаимосвязи фитомассы отдельных компонентов с диаметром ствола древесных растений, участвующих в составе древостоя исследуемого насаждения, приведены ранее (Бобкова и др., 2014). Фитомасса древесных растений, определенная по регрессионным уравнениям и материалам инструментальной таксации древостоя исследуемого ельника, показана в табл. 2.

Так, старовозрастной древостой разнотравно-черничного ельника формирует фитомассу растущих органов (188.6 ± 14.6) т · га⁻¹. Почти всю массу органического вещества образуют ель и береза. Масса растений напочвенного покрова в исследуемом сообществе составляет (3.8 ± 0.2) т · га⁻¹, из них надземные органы занимают 48 % (Бобкова и др., 2014). Следует отметить, что в надземной фитомассе растений напочвенного покрова преобладает масса мхов. Значительная часть органической массы растений кустарничков и трав сосредоточена в корнях, распространяющихся почти полностью на глубине 0–30 см. Таким образом, в коренном ельнике разнотравно-черничном на типичных подзолистых почвах запасы органической массы фитоценоза составляют (219.8 ± 14.0) т · га⁻¹.

Основную часть фитомассы формируют растущие деревья. Крупные древесные остатки (КДО) (сухостой, валеж и сухие ветви) аккумулируют (26.0 ± 4.1) т · га⁻¹ фитомассы. Следует отметить, что большая часть органического вещества фитоценоза сконцентрирована в компонентах надземных органов растений.

Продукция фитомассы. В старовозрастном разнотравно-черничном ельнике древостой ежегодно накапливает (6.3 ± 1.1) т · га⁻¹ фитомассы. В формировании продукции в данном ценозе основную роль выполняют ель (74.6 %) и береза (18.5 %). На долю сосны приходится 2.7, пихты – 3.2, осины – 1.0 % от общей продукции фитомассы древостоя. В приросте органического вещества древостоя хвоя и листья составляют 31.1%, ветви – 14.1, древесина стволовая – 24.2,

Таблица 2. Запасы, продукция и опад органического вещества растений в ельнике разнотравно-черничном

Компоненты	Запас, т · га ⁻¹	Нетто-продукция, т · га ⁻¹ · год ⁻¹	Опад, т · га ⁻¹ · год ⁻¹
Древесные	203.61 ± 14.04	6.32 ± 1.1	3.42 ± 0.25
Ель:	154.17 ± 11.60	4.71 ± 0.43	2.54 ± 0.22
древесина стволовая	81.06 ± 9.70	1.30 ± 0.16	–
кора стволовая	7.69 ± 1.15	0.19 ± 0.03	0.19 ± 0.03
ветви	9.77 ± 3.02	0.61 ± 0.18	0.10 ± 0.01
хвоя	9.78 ± 2.25	1.44 ± 0.33	1.09 ± 0.15
пни и корни	31.38 ± 3.14	1.17 ± 0.12	1.16 ± 0.16
сухие органы	14.49 ± 4.05	–	–
Сосна:	6.70 ± 0.87	0.18 ± 0.02	0.063 ± 0.009
древесина стволовая	4.51 ± 0.81	0.10 ± 0.02	–
кора стволовая	0.23 ± 0.05	0.004 ± 0.001	0.001 ± 0.0003
ветви	0.52 ± 0.13	0.021 ± 0.005	0.011 ± 0.003
хвоя	0.18 ± 0.05	0.024 ± 0.007	0.021 ± 0.005
пни и корни	1.12 ± 0.30	0.03 ± 0.008	0.03 ± 0.007
сухие органы	0.14 ± 0.02	–	–
Береза:	34.83 ± 7.84	1.17 ± 0.96	0.68 ± 0.12
древесина стволовая	22.87 ± 7.77	0.37 ± 0.12	–
кора стволовая	3.38 ± 0.84	0.07 ± 0.01	0.07 ± 0.02
ветви	3.31 ± 0.49	0.23 ± 0.03	0.12 ± 0.04
листья	0.27 ± 0.09	0.27 ± 0.09	0.27 ± 0.09
пни и корни	4.93 ± 0.49	0.23 ± 0.02	0.22 ± 0.07
сухие органы	0.07 ± 0.02	–	–
Пихта:	5.81 ± 0.43	0.20 ± 0.02	0.10 ± 0.008
древесина стволовая	3.12 ± 0.37	0.07 ± 0.008	–
кора стволовая	0.32 ± 0.05	0.005 ± 0.001	0.005 ± 0.001
ветви	0.44 ± 0.14	0.02 ± 0.01	0.015 ± 0.002
хвоя	0.44 ± 0.10	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.007
пни и корни	1.21 ± 0.12	0.03 ± 0.003	0.03 ± 0.004
сухие органы	0.28 ± 0.07	–	–
Осина:	2.1 ± 0.40	0.06 ± 0.01	0.032 ± 0.0014
древесина стволовая	1.40 ± 0.40	0.03 ± 0.01	–
кора стволовая	0.20 ± 0.05	0.001 ± 0.0003	0.001 ± 0.0001
ветви	0.20 ± 0.03	0.002 ± 0.0003	0.001 ± 0.0001
листья	0.02 ± 0.001	0.02 ± 0.006	0.02 ± 0.001
пни и корни	0.28 ± 0.03	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.001
сухие органы	0.0	–	–
Сухие органы всех деревьев	14.98 ± 4.05		
Сухостой, валеж	11.02 ± 2.07		
Подлесок	0.85 ± 0.10	0.02 ± 0.002	0.01 ± 0.001
Подрост	0.54 ± 0.06	0.08 ± 0.009	0.04 ± 0.003
Напочвенный покров	1.83 ± 0.06	1.12 ± 0.04	0.93 ± 0.12
Кустарнички	0.34 ± 0.02	0.09 ± 0.006	0.08 ± 0.003
Травы	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.02
Корни кустарничков и трав	1.98 ± 0.18	0.48 ± 0.03	0.49 ± 0.03
Мхи	1.30 ± 0.04	0.36 ± 0.02	0.35 ± 0.02
Итого	219.8 ± 14.0	7.5 ± 1.1	4.6 ± 0.5

Примечание. При расчетах использованы материалы, приведенные в работе К. С. Бобковой с соавт. (2014).

кора стволовая – 4, корни – 26.4 %. В рассматриваемом фитоценозе ельника основную часть продукции фитомассы растений нижних ярусов формируют мхи и корни кустарничков и трав (см. табл. 2).

Годичный прирост органического вещества фитоценоза разнотравно-черничного ельника равен $(7.5 \pm 1.1) \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, что согласуется с материалами, приведенными ранее для ельников. Так, за год фитоценоз 1 га спелых ельников экологического ряда средней тайги в европейской части России депонирует 3.5–9.0 т органического вещества (Паршевников, 1962; Смирнов, 1971; Казимиров, Морозова, 1973; Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999 и др.). В исследуемом сообществе продукцию фитомассы формирует в основном древостой (84 %). На долю растений напочвенного покрова приходится 15 %. Продукция растений подроста и подлеска составляет 1 % от общего прироста фитомассы.

Масса растительного опада. Лесной опад является важнейшим звеном в биологическом круговороте веществ между фитоценозом и почвой (Родин, Базилевич, 1965; Лукина, Никонов, 1996; Ведрова, 1997; Vedrova, 1997). Количество поступающего опада, его состав, интенсивность разложения влияют на характер формирования лесной подстилки, морфологию и свойства почвы. При разложении опада и подстилки пополняются запасы органического углерода и зольных элементов, изъятых растительностью в процессе почвенного питания; происходит новообразование гумуса, определяющего плодородие почвы; под влиянием макроэлементов и органических кислот формируется характерная реакция почвы, свойственные ей состав и обилие почвенных животных и микроорганизмов (Основы..., 1964; Евдокимова, 1995; Хабибулина, 2001). В исследуемом фитоценозе масса листового опада (в среднем для 3 лет наблюдений) составила $(1.95 \pm 0.19) \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, из них опад ели занимает 72 %, меньшую долю от активной части опада имеют береза (14 %), осина (9 %) и сосна (5 %).

В формировании наземного опада активно участвуют и растения напочвенного покрова массой $(0.93 \pm 0.12) \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Доля участия внеярусной растительности, в частности эпифитных лишайников, в формировании наземного опада незначительна и составляла по нашим данным 0.1–1.0 % от наземного опада древесного яруса. Значительная часть (24.5 %) общего опада в лесных фитоценозах представлена корнями растений.

Аккумуляция элементов питания. Концентрация минеральных элементов в составе фитомассы – это суммарный результат многолетних и многочисленных их циклов, который оценивается как их количество, находящееся одновременно в составе живого вещества растений (Родин, Базилевич, 1965; Перельман, 1966; Гришина, 1974 и др.). В исследуемом нами еловом насаждении фитомасса аккумулирует $(2298.0 \pm 64.4) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ азота и зольных элементов, что вписывается в пределы $(1730–2494) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ содержания их в среднетаежных еловых фитоценозах (Казимиров, Морозова, 1973; Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999), и в 1.3 раза больше, чем в спелых северо-таежных ельниках зеленомошной группы (Забоева, 1975; Лукина, Никонов, 1996) (табл. 3). Содержание элементов минерального питания в фитомассе насаждения располагается следующим образом: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Si} > \text{Al} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Na}$. Большой емкостью накопления отличаются кальций, азот, калий и кремний, которые в сумме составляют $1921 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$, или 83 % от общего количества минеральных элементов, аккумулируемых в фитоценозе. Основные запасы минеральных элементов концентрируются в растущих органах древесных растений – $(1656 \pm 48.3) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$, из них, %: в древесине – 26.9, в корнях – 28, в ветвях – 8.9, в листьях и хвое – 19.8, в коре – 12.6. Большая часть азота и зольных элементов концентрируется в фитомассе ели. Древостой исследуемого коренного ельника относительно разновозрастной, соответствует состоянию предшествующей выработанности (Бобкова и др., 2006). Довольно много сухих деревьев (см. табл. 1).

Общая масса сухих органов древесных растений – $(26.0 \pm 4.1) \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, содержащаяся в них сумма азота и зольных элементов – $(537.0 \pm 34.4) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$, которая концентрируется в основном в сухостое ели. Питательные элементы, находящиеся в сухих органах растений, в виде опада будут постепенно возвращаться в почву.

Растения напочвенного покрова в фитомассе аккумулируют $(102.7 \pm 3.1) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ азота и зольных элементов. В накоплении минеральных элементов растениями нижних ярусов фитоценоза ведущая роль принадлежит зеленым мхам $((38.5 \pm 2.0) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1})$, подземным органам кустарничков и трав $((31.3 \pm 2.1) \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1})$. Надземные органы кустарничков и трав содержат 18 % от общей массы основных питательных элементов.

Таким образом, в растительном веществе ценоза коренного среднетаежного ельника разно-

Таблица 3. Содержание химических элементов в растительных компонентах ельника разнотравно-черничного

Химический элемент	Фитомасса, кг · га ⁻¹			Продукция, кг · га ⁻¹ · год ⁻¹			Опад, кг · га ⁻¹ · год ⁻¹		
	Древесные растения	КДО	Напочвенный покров	Древесные растения	Напочвенный покров	Всего	Древесные растения	Напочвенный покров	Всего
Si	79.7 ± 8.8	62.4 ± 7.3	14.1 ± 0.9	4.2 ± 0.3	6.9 ± 0.4	11.1 ± 0.5	10.1 ± 1.4	5.5 ± 0.5	15.6 ± 1.5
Ca	506.6 ± 40.5	268.9 ± 31.6	14.4 ± 1.1	28.2 ± 1.7	4.2 ± 0.3	32.4 ± 1.7	28.7 ± 3.2	2.5 ± 0.2	31.2 ± 3.2
Mg	57.8 ± 3.2	13.4 ± 1.6	3.8 ± 0.3	4.3 ± 0.2	1.1 ± 0.1	5.4 ± 0.2	2.8 ± 0.2	0.6 ± 0.04	3.4 ± 0.2
P	57.0 ± 4.2	21.2 ± 2.5	5.0 ± 0.4	4.9 ± 0.4	1.6 ± 0.1	6.5 ± 0.4	2.9 ± 0.2	1.0 ± 0.07	3.9 ± 0.2
K	188.1 ± 10.5	32.6 ± 3.8	13.3 ± 0.9	15.9 ± 1.2	5.1 ± 0.3	21.0 ± 1.2	6.8 ± 0.5	3.7 ± 0.3	10.5 ± 0.6
Na	10.4 ± 0.8	2.9 ± 0.3	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.02	0.2 ± 0.01	0.5 ± 0.02	0.3 ± 0.02	0.2 ± 0.01	0.5 ± 0.02
Mn	50.2 ± 3.6	15.8 ± 1.9	1.8 ± 0.1	2.6 ± 0.2	0.5 ± 0.03	3.1 ± 0.2	2.5 ± 0.2	0.3 ± 0.02	2.8 ± 0.2
Fe	31.5 ± 2.5	13.1 ± 1.5	8.5 ± 0.8	1.0 ± 0.1	2.3 ± 0.2	3.3 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.1	2.3 ± 0.1
Al	54.0 ± 4.0	23.3 ± 2.7	6.4 ± 0.7	1.9 ± 0.1	1.7 ± 0.2	3.6 ± 0.2	1.4 ± 0.1	0.5 ± 0.04	1.9 ± 0.1
N	623.1 ± 32.5	83.2 ± 9.7	34.8 ± 2.4	45.3 ± 3.0	11.7 ± 0.7	57.0 ± 3.1	25.0 ± 2.1	7.4 ± 0.5	32.4 ± 2.2
Сумма без N	1035.2 ± 43.5	453.8 ± 33.0	67.9 ± 4.5	63.4 ± 5.7	23.7 ± 1.2	87.1 ± 5.8	56.8 ± 12.6	15.3 ± 0.6	72.1 ± 12.6
Сумма с N	1658.3 ± 54.3	537.0 ± 34.4	102.7 ± 3.1	108.7 ± 14.7	35.4 ± 1.4	144.1 ± 14.8	81.8 ± 17.0	22.7 ± 0.8	104.5 ± 17.0

травно-черничного на подзолистых почвах пул азота равен 741.1 ± 34.0 , зольных элементов – (1556.9 ± 54.8) кг · га⁻¹ (см. табл. 3).

Вынос элементов питания из почвы. Показатель, характеризующий количество азота и зольных элементов в приросте фитомассы в насаждениях, определяет интенсивность биологического круговорота веществ (Гришина, 1974). При формировании годичной продукции исследуемый еловый ценоз выносит из почвы значительное количество элементов питания, кг · га⁻¹: азота 57.0 ± 3.1 и зольных элементов 87.1 ± 5.8 (см. табл. 3). Основная часть элементов питания выносится древесной растительностью, кг · га⁻¹: 45.3 ± 3.0 азота и 63.4 ± 5.7 зольных элементов.

Растения напочвенного покрова ежегодно на формирование продукции используют из почвы (35.4 ± 1.4) кг · га⁻¹ азота и зольных элементов. В еловом сообществе среди элементов минерального питания наиболее интенсивно в биологический круговорот вовлекаются N, Ca, K, Si, P и Mg. В среднем коренной разнотравно-черничный ельник по этому показателю на 15–30 % уступает среднетаежным ельникам европейской части тайги (Паршевников, 1962; Казимиров, Морозова, 1973; Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999) и превосходит северо-таежные ельники зеленомошной группы на 40–50 % (Руднева и др., 1966; Забоева, 1975; Лукина, Никонов, 1998 и др.).

Минеральные элементы в лесной подстилке. Подстильно-торфяной горизонт в экосистеме ельника мощностью (7.7 ± 0.4) см аккумулирует (1044.9 ± 31.2) кг · га⁻¹ азота и зольных элементов (табл. 4). Распределение минеральных элементов в этом горизонте – азотно-кремниво-кальциевое: N > Si > Ca > Fe > Al > K > P > Mn > Mg > Na. Согласно И. Б. Арчеговой с соавт. (1975) и К. С. Бобковой (1999), в подстилке среднетаежных ельников зеленомошной группы в рассматриваемом регионе концентрируется в 1.4–1.8 раза больше азота и зольных элементов, чем в исследуемом нами ельнике разнотравно-черничном, и ряд распределения их также азотно-кремниво-кальциевый. Несмотря на то что подстилка в еловых экосистемах формируется из растительного материала, богатого биофильными элементами, ее минеральный состав определяется элементами, доминирующими в опаде после его разложения: Si, Ca и N. В целом в подстильно-торфяном горизонте подзолистой почвы ельников располагается более 80 % физиологически активных корней растений (Бобкова,

Таблица 4. Показатели биоциркуляции химических элементов в ельнике разнотравно-черничном

Показатель	Зольные элементы										N	Всего
	Si	Ca	Mg	P	K	Na	Mn	Fe	Al			
Аккумуляция в фитомассе, кг · га ⁻¹	156.2 ± 11.5	789.9 ± 51.4	75.0 ± 3.6	83.2 ± 4.9	234.0 ± 11.2	14.0 ± 0.9	67.8 ± 3.0	53.1 ± 3.0	83.7 ± 3.0	741.0 ± 34.0	2298.0 ± 64.4	
Вынос, кг · га ⁻¹ в год	11.1 ± 0.5	32.4 ± 1.7	5.4 ± 0.2	6.5 ± 0.4	21.0 ± 1.2	0.5 ± 0.02	3.1 ± 0.2	3.3 ± 0.2	3.6 ± 0.2	57.0 ± 3.1	144.1 ± 14.8	
Скорость оборота, лет	22.1 ± 1.5	3.0 ± 0.3	3.9 ± 0.3	6.3 ± 0.3	2.2 ± 0.1	4.7 ± 0.0	7.5 ± 0.9	16.1 ± 1.8	21.6 ± 0.3	7.7 ± 0.3	7.3 ± 0.1	
Высвобождение из опада, кг · га ⁻¹ в год	4.85 ± 0.43	6.02 ± 0.51	0.69 ± 0.11	0.88 ± 0.10	2.60 ± 0.30	0.10 ± 0.00	0.60 ± 0.10	0.21 ± 0.03	0.26 ± 0.02	6.80 ± 0.54	23.0 ± 0.9	
Запас в подстилке, кг · га ⁻¹	247.2 ± 20.2	95.7 ± 11.8	21.3 ± 1.9	41.4 ± 1.3	47.0 ± 2.4	2.5 ± 0.1	23.6 ± 3.1	51.4 ± 6.7	78.1 ± 4.5	436.7 ± 18.4	1044.9 ± 31.2	
Поступление с атмосферными осадками и выщелачивание из крон деревьев, кг · га ⁻¹ в год	0.26 ± 0.04	5.99 ± 0.52	1.76 ± 0.18	1.59 ± 0.14	10.75 ± 1.7	1.60 ± 0.08	0.72 ± 0.12	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	1.74 ± 0.22	24.5 ± 1.7	
Потоки элементов с почвенными водами за корнеобитаемый слой, кг · га ⁻¹ в год	36.72 ± 8.9	12.95 ± 3.7	2.35 ± 0.7	2.58 ± 0.9	*	2.41 ± 0.8	*	0.12 ± 0.03	0.07 ± 0.02	2.00 ± 0.5	59.2 ± 9.8	

Примечание. * Данный элемент не выносится за пределы корнеобитаемого слоя.

1987). В нем аккумулируется в 7 раз больше элементов минерального питания, чем выносятся на продукцию фитомассы. Здесь следует отметить, что в коренном среднетаежном ельнике мортмасса (57.2 т · га⁻¹ – сухостой, валяж, сухие ветви, подстилка) имеет большие запасы химических элементов (1584 кг · га⁻¹), что лишь на 10 % меньше, чем в живом растительном веществе ценоза.

Скорость биологического круговорота – отношение количества минеральных элементов в подстилке к их содержанию в приросте фитомассы – для исследуемого елового насаждения составляет (7.3 ± 0.1) лет (см. табл. 4). За этот период большая часть минеральных элементов поглощается растениями, проходит все трансформации и возвращается обратно в почву. Этот показатель для еловых лесов более южных регионов лесной зоны составляет 1–6.5 года (Андриянова, 2001), а для среднетаежного ельника черничного на торфянисто-подзолистых почвах – 9–10 лет (Бобкова, 1999).

Наибольшей скоростью оборота (лет) отличаются основные элементы-органогены: калий (2.2), кальций (3), магний (3.9), натрий (4.7), марганец (7.5), фосфор (6.3), азот (7.7). Скорость круговорота железа, кремния и алюминия исчисляется десятками лет, так как эти элементы потребляются растениями в небольших количествах.

Возврат минеральных элементов с годичным опадом в старовозрастном ельнике составляет (104.5 ± 17.0) кг · га⁻¹, т. е. 71 % от потребления на построение годичной фитомассы (см. табл. 3). В среднетаежных еловых фитоценозах разных типов, произрастающих на территории Республики Коми, с опадом возвращается 79–115 кг · га⁻¹ в год азота и зольных элементов (Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999). Из надземных органов древесных растений с опадом на поверхность почвы переходит (64.5 ± 4.0) кг · га⁻¹ азота и зольных элементов. Большая часть элементов минерального питания в почву поступает с хвоей ели и листьями березы – (44.9 ± 3.9) и (8.4 ± 0.5) кг · га⁻¹ соответственно. Третье место принадлежит опадом многолетних надземных органов деревьев. Так, с годичным опадом ветвей ели, сосны, осины, березы и пихты на поверхность почвы поступает (4.0 ± 0.2) кг · га⁻¹ элементов минерального питания. С опадом трав ежегодно в почву возвращается 10.9 ± 0.7, с опадом мхов –

10.5 ± 0.4 , кустарничков – (1.4 ± 0.09) кг · га⁻¹ элементов минерального питания. Ряд накопления минеральных элементов в опаде относится к азотно-кальциево-кремниевому типу (Родин, Базилевич, 1965) и располагается следующим образом: N > Ca > Si > K > P > Mg > Mn > Fe > Al > Na.

Скорость разложения надземного опада. Поступающий на поверхность почвы растительный опад подвергается биологической трансформации. Отношение массы подстилки к массе опада (П/О) часто используется для оценки скорости разложения опада и высвобождения химических элементов. Чем выше индекс П/О, тем меньше интенсивность биологического круговорота в экосистеме (Пономарева, Плотникова, 1980; Никонов, Лукина, 1994 и др.). В исследуемом нами еловом насаждении опадоподстилочный коэффициент составляет 7.6, что свидетельствует о заторможенных процессах минерализации растительных остатков, где в массе опада превалируют растительные остатки ели. В течение года в процессе деструкции из опада высвобождается (23.0 ± 0.9) кг · га⁻¹ минеральных элементов, в том числе 44 % из опада ели, 14 % из опада березы и 39 % из опада растений напочвенного покрова. Большая часть $((81.7 \pm 4.1)$ кг · га⁻¹) минеральных элементов из поступившего опада остается в подстилке. Процесс высвобождения химических элементов из разлагающихся растительных остатков опада иллюстрирует Кр – коэффициент Пугачева, который определяется как отношение запасов определенного элемента в подстилке к его содержанию в годовичном опаде, умноженному на опадоподстилочный коэффициент (Пугачев, 1983). Согласно В. В. Никонову (1986), поэлементный расчет с помощью Кр позволяет разделить макроэлементы на 3 группы: 1) «балластные» элементы (этих элементов достаточно на десятки и даже сотни лет); 2) элементы высокой потребности (их может хватить на несколько лет); 3) элементы исключительной потребности (этих элементов недостаточно даже для формирования годичной продукции). К 1-й группе отнесли элементы с $Kp > 1.5$, ко второй – с $0.5 < Kp < 1.5$, к третьей – с $Kp < 0.5$. Согласно коэффициенту Пугачева, рассчитанному для ельника разнотравно-черничного, элементы были распределены следующим образом: 1-я группа – Si, Fe, Al, N; 2-я группа – Mg, Na, Mn, K, P; 3-я группа – Ca. Следовательно, по этим показателям запасов кальция в подстилке ельника разнотравно-черничного недостаточно для обеспечения растений. Для годовичного цикла

биологического круговорота таких элементов, как Mg, Na, Mn, K, P, вполне достаточно, а Si, Fe и Al – избыточное количество.

Атмосферная миграция. Атмосферные осадки кроме транспорта воды и тепла активно участвуют в переносе масс твердых веществ (Вернадский, 1960). Следовательно, атмосферные выпадения являются важным источником питания растений лесных фитоценозов. Им отводится роль постоянного «резервного фонда» биологического круговорота веществ, компенсатора, благодаря которому происходит постоянное пополнение биогеоценоза элементами минерального питания извне (Одум, 1975). Химический состав атмосферных осадков характеризуется пространственной и сезонной вариабельностью (Лукина, Никонов, 1996, 1998; Lindroos et al., 2000; Knulst, 2004; Робакидзе и др., 2013; Robakidze et al., 2013). В лесных сообществах древесный ярус оказывает существенное влияние на количество и качество осадков, поступающих на поверхность почвы (Ушакова, 1997). Деревья трансформируют химический состав атмосферных осадков (Морозова, Куликова, 1974; Карпачевский и др., 1998). Отмечается выщелачивание элементов осадками, проникающими через кроны древесных пород (Куликова, 1968). Согласно геохимической классификации А. И. Перельмана (1966), исследуемое еловое насаждение относится к западно-таежным ландшафтам (Б1) с кислым классом водной миграции (III-N⁺ – класс). Атмосферные осадки в этих ландшафтах являются компенсаторами элементов минерального питания в биологическом круговороте и благодаря высокой влажности почвы создают условия для вымывания из нее подвижных форм всех элементов. Ранее (Робакидзе и др., 2013, 2015; Robakidze et al., 2013) нами приведена пространственная и временная динамика химического состава дождевых осадков и снеговых вод под пологом спелых ельников, в том числе рассматриваемого в данной работе ельника разнотравно-черничного. Отмечено, что минерализация атмосферных осадков, прошедших через кроны среднетаежных ельников, стабильно низкая. Воды, протекающие сквозь полог древостоя, слабокислые (pH 5.4–5.6), гидрокарбонатно-калиево-кальциевые. По оценкам, приведенным на основании материалов этих работ, в течение года с атмосферными осадками на поверхность почвы в исследуемом ельнике поступает в среднем (24.5 ± 1.7) кг · га⁻¹ азота и зольных элементов (см. табл. 4), из них 98 % – с дождевыми водами в теплое полуго-

дие. Поступление минеральных элементов с кроновыми водами характеризуется калиево-кальциево-магниево-азотным типом химизма. Это обусловлено тем, что калий, как достаточно подвижный элемент, легко выщелачивается из листьев (хвои) в результате катионного обмена и смыва пыли с поверхности крон. Следовательно, атмосферные осадки в старовозрастном ельнике играют определенную роль в пополнении запаса элементов минерального питания в почве. Так, с кроновыми водами в исследуемом ельнике поступает 51 % от потребляемого фитоценозом на построение продукции калия, 33 % – магния, 19 % – кальция. Количество натрия, поступающего с осадками, в 3 раза превышает уровень его годового потребления растительностью. Согласно Р. М. Морозовой и В. К. Куликовой (1974), в еловых насаждениях чернично-кисличного типа Южной Карелии с атмосферными осадками поступает, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$: калия – 6, кальция – 5, магния и азота – 2. В березово-еловых насаждениях этого же региона количество элементов несколько больше, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$: калия – 10.5, кальция – 7.5, магния – 4.5, азота – 3.

Потоки химических элементов с почвенными водами. Н. В. Лукиной и В. В. Никоновым (1996) установлено, что биогеохимическая роль ельников на севере их распространения имеет двойственный характер. С одной стороны, низкая зольность фракций как ели, так и растений напочвенного покрова, агрессивные ненасыщенные органические кислоты преимущественно фульвокислотной природы, которые образуются в процессе разложения лесного опада микроорганизмами, а также гумидный режим региона способствуют усилению миграционной способности элементов благодаря разрушению первичных минералов и перемещению их в виде органоминеральных соединений по профилю почв. В почвенной толще процессы выноса ча-

сто выражаются накоплением подвижных форм элементов в субэлювиальном горизонте. Конечным итогом процессов преобразования почвы северо-таежных ельников является вынос химических элементов из почвы в результате геохимической миграции, хотя размеры выноса невелики ($18\text{--}21 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$). Лизиметрические воды исследуемого ельника разнотравно-черничного на подзолистых почвах характеризуются относительно высокой концентрацией минеральных элементов (табл. 5). Об их концентрации можно судить лишь косвенно, так как нет данных о величине почвенного стока, воды кислые и слабокислые (рН 4.6–6.7). Геохимическая миграция элементов питания в подзолистых почвах обусловливается, видимо, промывным типом водного режима. Определение его размеров должно охватывать всю толщу почвенного профиля до водоупорного горизонта, т. е. до уровня грунтовых вод, поэтому нами оценивается лишь их минерализация.

Пользоваться же оценкой геохимической миграции химических элементов, полученной нами в ельнике по выносу элементов за пределы горизонта ЕВ, вряд ли правомерно. Следовательно, в данной работе изучается водная миграция элементов питания в верхних горизонтах почвы.

На первом месте по выносу из подстилки и миграции в верхних горизонтах почвы в исследуемом ельнике стоит кремний, далее следуют кальций, магний, фосфор, калий и натрий. Среди микроэлементов в исследуемом ельнике максимально поступают из подстилки и мигрируют по почвенному профилю ионы железа и алюминия в составе органо-минеральных комплексов. С глубиной значительно снижается концентрация кремния, кальция и калия. Это свидетельствует об интенсивном биологическом поглощении элементов растениями и микроорганизмами. Ежегодно за пределы корнеобитае-

Таблица 5. Содержание минеральных элементов в лизиметрических водах* подзолистой почвы ельника, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$

Горизонт	Зольные элементы									N	Сумма
	Si	Ca	Mg	P	K	Na	Mn	Fe	Al		
О	58.23 ± ± 14.1	22.08 ± ± 5.1	4.47 ± ± 1.0	3.69 ± ± 1.2	3.12 ± ± 0.7	2.32 ± ± 0.5	0.1 ± ± 0.03	1.64 ± ± 0.4	1.69 ± ± 0.4	3.46 ± ± 0.8	100.8 ± ± 15.1
Е	41.85 ± ± 10.1	21.38 ± ± 3.7	4.71 ± ± 0.8	3.15 ± ± 0.9	3.38 ± ± 0.7	3.69 ± ± 0.7	0.04 ± ± 0.01	0.92 ± ± 0.2	0.98 ± ± 0.2	3.55 ± ± 0.6	83.7 ± ± 10.9
ЕВ	36.98 ± ± 8.9	18.94 ± ± 3.8	4.11 ± ± 0.8	4.17 ± ± 1.4	1.47 ± ± 0.3	4.01 ± ± 0.8	0.02 ± ± 0.01	0.18 ± ± 0.04	0.13 ± ± 0.03	3.74 ± ± 0.7	73.8 ± ± 9.9

Примечание. * Среднее за 3 года.

мого слоя поступает определенное количество элементов в результате процессов водной миграции. По нашим оценкам, за пределы горизонта ЕВ поступает (59.2 ± 9.8) кг · га⁻¹ минеральных элементов в год. Следует отметить, что миграционные потоки элементов с лизиметрическими водами в более глубокие слои почвы исследуемого ельника нами не изучены. Согласно данным А. И. Перельмана (1961), коэффициент биологического поглощения калия превышает единицу, что определяет биогенную аккумуляцию этого элемента в верхних горизонтах почв. Биогенная аккумуляция не решает проблему обеспечения организмов калием, он дефицитен в большинстве ландшафтов. Это определяет огромную роль биологического круговорота в геохимии калия – почти весь подвижный калий «вращается» в круговороте и в малых количествах поступает в природные воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В биогеоценозе среднетаежного коренного ельника разнотравно-черничного, развитого на автоморфных подзолистых почвах, где эдификатором является древостой высоковозрастной ели, запасы растительного органического вещества составляют (219.8 ± 14.0) т · га⁻¹, из них в живых растущих органах сосредоточено 86 %. Для старовозрастного ельника характерен большой запас мертвого органического вещества $((57.2 \pm 4.1)$ т · га⁻¹), сосредоточенного в сухих крупных древесных остатках и лесной подстилке. В фитомассе насаждения среднетаежного ельника разнотравно-черничного аккумулируется (2298 ± 64.4) кг · га⁻¹ азота и зольных элементов. Наиболее интенсивным накоплением характеризуются Са, N, К и Si. Их доля в общем содержании элементов в растительном органическом веществе достигает 84 %. На формирование годичной продукции из почвы выносятся (144.1 ± 14.8) кг · га⁻¹ химических элементов. Их количество, ежегодно поступающее на поверхность почвы с общим растительным опадом, составляет 71 % от потребляемых их на продукцию. Подвижные элементы (N, P, K, Mg) активно потребляются растениями на формирование прироста фитомассы. Элементы, относящиеся к малоподвижным (Са, Al, Fe, Mn), интенсивно возвращаются в почву с опадом. Следовательно, в экосистеме старовозрастного ельника на подзолистых почвах расходная статья биологической миграции химических эле-

ментов, связанная с размером ежегодного прироста фитомассы, превалирует над приходной, обусловленной возвращением химических элементов с опадом. Ведущая роль в аккумуляции и в потоках элементов минерального питания в системе почва–фитоценоз в экосистеме ельника разнотравно-черничного принадлежит древостою, под пологом которого выражен успешный возобновительный процесс елью, что свидетельствует об устойчивом функционировании старовозрастного ценоза.

В биологическом круговороте веществ среднетаежного коренного елового биогеоценоза велико значение лесной подстилки. В подстильно-торфяном горизонте концентрируется (1044 ± 31.2) кг · га⁻¹ минеральных элементов – семикратный запас, необходимый для формирования годичной продукции, – распределение которых следующее: N > Si > Ca > Fe > Al > K > P > Mn > Mg > Na. В целом в среднетаежном старовозрастном ельнике большие запасы химических элементов в лесной подстилке создают гарантию его устойчивости.

Атмосферная миграция – поступление химических элементов в еловый биогеоценоз из атмосферы (осадки и пыль) – за год в ельнике составляет, кг · га⁻¹: азота – 1.74 ± 0.22 , суммы зольных элементов – 22.8 ± 1.7 . Элементы расположены в определенной последовательности: по степени вымываемости из древостоя K > Ca > Na > Mg, выщелачивающиеся из лесной подстилки Na > K > Ca > Mg. Вынос элементов минерального питания за пределы корнеобитаемого слоя (0–30 см) с поверхностными почвенными водами составляет (59.2 ± 9.8) кг · га⁻¹ в год.

Годичный цикл круговорота веществ в старовозрастном ельнике на подзолистых почвах определяется в основном зелеными фракциями фитомассы, так как через листву и хвою, составляющих большую часть прироста и опада, осуществляется обмен минеральными элементами и азотом в системе почва–растение. Обмен веществ в этой системе совершается, главным образом, в 30-сантиметровом слое, где концентрируется основная масса физиологически активных корней. Согласно классификации Л. Е. Родина и Н. И. Базилевича (1965), спелый ельник разнотравно-черничный средней тайги относится к азотно-бореальному классу типов биологического круговорота, который характеризуется сильной заторможенностью, повышенной зольностью и средней продуктивностью.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы научно-исследовательских работ «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России (AAAA-A17_117122090014-8)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Андрянова О. В. Особенности биологического круговорота химических элементов в елово-пихтовых лесах Республики Марий Эл: дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола: Мари. гос. техн. ун-т, 2001. 161 с. [Andriyanova O. V. Osobennosti biologicheskogo krugovorota khimicheskikh elementov v elovo-pikhtovykh lesakh Respubliki Mary El: dis. ... kand. biol. nauk (Features of the biological cycle of chemical elements in spruce-fir forests of the Republic of Mari El: cand. (PhD) biol. sci. dis.). Yoshkar-Ola: Mariysky gos. tekhn. un-t (Mari St. Univ.), 2001. 161 p. (in Russian)].
- Арчегова И. Б., Заболоцкая Т. Г., Кононенко А. В., Русанова Г. В., Слобода А. В., Юдинцева И. И. Продуктивность и круговорот элементов в фитоценозах Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 130 с. [Archeгова I. B., Zabolotskaya T. G., Kononenko A. V., Rusanova G. V., Sloboda A. B., Yudinseva I. I. Produktivnost' i krugovorot elementov v fitotsenozakh Severa (Productivity and cycle of elements in the phytocenoses of the North). Leningrad: Nauka. Leningrad Br., 1975. 130 p. (in Russian)].
- Атлас Коми АССР. М.: Глав. упр. геодезии и картографии Гос. геол. комитета СССР, 1964. 112 с. [Atlas Komi ASSR (Atlas of the Komi Autonomous Soviet Socialist Republic). Moscow: Glav. upr. geodezii i kartografii Gos. geol. komiteta SSSR (Central Directorate of Geodesy and Cartography Geological Committee of the USSR), 1964. 112 p. (in Russian)].
- Базилевич Н. И., Титлянова А. А., Смирнов В. В., Родин Л. Е., Нечаева Н. Т., Левин Ф. И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль, 1978. 183 с. [Bazilevich N. I., Titlyanova A. A., Smirnov V. V., Rodin L. E., Nechayeva N. T., Levin F. I. Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh (Methods of studying the biological cycle in various natural zones). M.: Mysl', 1978. 183 p. (in Russian)].
- Бобкова К. С. Биологическая продуктивность хвойных лесов европейского Северо-Востока. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. 155 с. [Bobkova K. S. Biologicheskaya produktivnost' khvoynykh lesov evropeyskogo Severo-Vostoka (Biological productivity of coniferous forests of the European North-East). Leningrad: Nauka. Leningrad Br., 1987. 155 p. (in Russian)].
- Бобкова К. С. Биологическая продуктивность лесов // Леса Республики Коми / Под ред. Г. М. Козубова, А. И. Таскаева. М.: Дизайн. Информация. Картография, 1999. С. 40–54 [Bobkova K. S. Biologicheskaya produktivnost' lesov (Biological productivity of forests) // Lesa Respubliki Komi (Forests of the Komi Republic) / G. M. Kozubov, A. I. Taskaev (Eds.). Moscow: Dizayn. Informatsiya. Kartografiya (Design. Information. Cartography), 1999. P. 40–54 (in Russian)].
- Бобкова К. С., Галенко Э. П., Загирова С. В., Сенькина С. Н., Тужилкина В. В., Машика А. В., Патов А. И., Никоннов В. В., Лукина Н. В., Исаева Л. Г. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 337 с. [Bobkova K. S., Galenko E. P., Zagirova S. V., Senkina S. N., Tuzhilkina V. V., Mashika A. V., Patov A. I., Nikonov V. V., Lukina N. V., Isaeva L. G. Korennyye elovye lesa Severa: bioraznoobrazie, struktura, funktsii (Native spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions). Saint Petersburg: Nauka, 2006. 337 p. (in Russian with English abstract)].
- Бобкова К. С., Машика А. В., Смагин А. В. Динамика содержания углерода органического вещества в средне-таежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 269 с. [Bobkova K. S., Mashika A. V., Smagin A. V. Dinamika sodержaniya ugleroda organicheskogo veshchestva v srednetaezhnykh el'nikakh na avtomorfnykh pochvakh (Dynamics of organic matter carbon content in the middle taiga spruce forests on automorphic soils). Saint Petersburg: Nauka, 2014. 269 p. (in Russian)].
- Ведрова Э. Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223. [Vedrova E. F. Razlozheniye organicheskogo veshchestva lesnykh podstilok (Organic matter decomposition in forest litters) // Pochvovedenie (Soil Sci.). 1997. N. 2. P. 216–223 (in Russian with English abstract)].
- Вернадский В. И. История природных вод // Избр. сочинения. Т. 4. Кн. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 651 с. [Vernadskiy V. I. Istoriya prirodnykh vod (History of natural waters) // Izbrannye sochineniya (Selected works). V. 4. Book. 2. Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1960. 651 p. (in Russian)].
- Гришина Л. А. Биологический круговорот и его роль в почвообразовании: курс лекций. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 128 с. [Grishina L. A. Biologicheskii krugovorot i ego rol' v pochvoobrazovanii: kurs lektsiy (The biological cycle and its role in soil formation: a course of lectures). Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta (Moscow Univ. Publ.), 1974. 128 p. (in Russian)].
- Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы почв Крайнего Севера. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1995. 268 с. [Evdokimova G. A. Ekologo-mikrobiologicheskie osnovy pochv Kraynego Severa (Ecological and microbiological bases of soils of the Far North). Apatity: Karel. nauch. tsentr RAN (Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci.), 1995. 268 p. (in Russian)].
- Забоева И. В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1975. 344 с. [Zaboyeva I. V. Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR (Soil and land resources of the Komi Autonomous Soviet Socialist Republic). Syktyvkar: Komi kn. izd-vo (Komi book Publ.), 1975. 344 p. (in Russian)].
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1973. 176 с. [Kazimirov N. I., Morozova R. M. Biologicheskii krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii (Biological cycle of substances in spruce forests of Karelia). Leningrad: Nauka. Leningrad Br., 1973. 176 p. (in Russian)].

- Карпачевский Л. О., Зубкова Т. А., Пройслер Т., Кеннел М., Гитл Г., Горчарук Н. Ю., Минаева Т. Ю.* Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков // *Лесоведение*. 1998. № 1. С. 50–60 [*Karpachevskiy L. O., Zubkova T. A., Proysler T., Kennel M., Gitl G., Gorcharuk N. Yu., Minaeva T. Yu.* Vozdeystvie pologa el'nika slozhnogo na khimicheskiy sostav osadkov (The impact of the canopy spruce complex on the chemical composition of sediments) // *Lesovedeniye (For. Sci.)*. 1998. N. 1. P. 50–60 (in Russian with English abstract)].
- Кожевникова Н. Д., Второва В. Н.* Биологический круговорот веществ в ельниках Северного Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1988. 346 с. [*Kozhevnikova N. D., Vtorova V. N.* Biologicheskiy krugovorot veshchestv v el'nikakh Severnogo Tyan-Shanya (The biological cycle of substances in the spruce forests of the Northern Tien Shan). Frunze: Ilim, 1988. 346 p. (in Russian)].
- Куликова В. К.* Выщелачивание элементов питания из крон деревьев в еловых и березово-еловых насаждениях Карелии // *Тр. Всесоюз. науч. конф. по лесн. почвоведению «Лес и почва», 15–19 июля 1965 г., Красноярск: Красноярск. кн. изд-во, 1968. С. 288–295* [*Kulikova V. K.* Vyshchelachivanie elementov pitaniya iz kron derev'ev v elovykh i berezovo-elovykh nasazhdeniyakh Karelii (Leaching of nutrients from tree crowns in spruce and birch-spruce stands of Karelia) // *Tr. Vsesoyuz. nauch. konf. po lesnomu pochvovedeniyu «Les i pochva», 15–19 iyulya 1965 g. (Proc. All-Union sci. conf. for soil sci. «Forest and soil», 15–19 July, 1965). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Book Publ., 1968. P. 288–295 (in Russian)].*
- Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР (Норм. мат-лы для Арханг., Вологод. обл. и Коми АССР). Архангельск: Арханг. ин-т леса и лесохимии, 1986. 356 с.* [*Lesotaksatsionnyy spravochnik dlya severo-vostoka evropeyskoy chasti SSSR (Norm. mat-ly dlya Arkhang., Vologod. obl. i Komi ASSR) (Forest inventory reference book for the north-east of the European part of the USSR (Norm. materials for Arkhangelsk, Vologda Regions and Komi ASSR). Arkhangelsk: Arkhangelsk in-t lesa i lesokhimii (Arkhangelsk Inst. For. For. Chem.), 1986. 356 p. (in Russian)].*
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1996. Ч. 1. 213 с. Ч. 2. 192 с. [*Lukina N. V., Nikonov V. V.* Biogeokhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennoho zagryazneniya. V 2 ch. (Biogeochemical cycles in the forests of the North under conditions of aerotechnogenic pollution. In 2 parts). Apatity: Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci., 1996. Pt. 1. 213 p. Pt. 2. 192 p. (in Russian)].
- Лукина Н. В., Никонов В. В.* Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1998. 316 с. [*Lukina N. V., Nikonov V. V.* Pitatelnyy rezhim lesov severnoy taygi: prirodnye i tekhnogennyye aspekty (Nutrient regime of forests of the northern taiga: natural and manmade aspects). Apatity: Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci., 1998. 316 p. (in Russian)].
- Манаков К. Н., Никонов В. В.* Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 196 с. [*Manakov K. N., Nikonov V. V.* Biologicheskiy krugovorot mineral'nykh elementov i pochvoobrazovanie v el'nikakh Kraynego Severa (The biological cycle of mineral elements and soil formation in spruce forests of the Far North). Leningrad: Nauka. Leningrad Br., 1981. 196 p. (in Russian)].
- Морозова Р. М., Куликова В. К.* Роль атмосферных осадков в круговороте азота и зольных элементов в еловых лесах Карелии // *Почвенные исследования в Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1974. С. 143–149* [*Morozova R. M., Kulikova V. K.* Rol' atmosferynykh osadkov v krugovorote azota i zol'nykh elementov v elovykh lesakh Karelii (The role of precipitation in the nitrogen and ash cycle in the spruce forests of Karelia) // *Pochvennyye issledovaniya v Karelii (Soil studies in Karelia). Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR (Karel. Br. USSR Acad. Sci.), 1974. P. 143–149 (in Russian)].*
- Никонов В. В.* Запасы и состав подстилок вторичных сопок на северном пределе произрастания // *Почвоведение*. 1986. № 6. С. 79–88 [*Nikonov V. V.* Zapasy i sostav podstilok vtorichnykh sosnyakov na severnom predele proizrastaniya (Stocks and composition of litter of secondary pine forests at the northern limit of growth) // *Pochvovovedenie (Soil Sci.)*. 1986. N. 6. P. 79–88 (in Russian with English abstract)].
- Никонов В. В., Лукина Н. В.* Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1994. 315 с. [*Nikonov V. V., Lukina N. V.* Biogeokhimicheskie funktsii lesov na severnom predele rasprostraneniya (Biogeochemical functions of forests at the northern limit of distribution). Apatity: Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci., 1994. 315 p. (in Russian)].
- Одум Ю. П.* Основы экологии. Пер. с англ. 3-е изд. М.: Мир, 1975. 740 с. [*Odum Yu. P.* Osnovy ekologii. Per. s angl. 3-e izd. (The basics of ecology. Translation from English. 3rd Ed.). Moscow: Mir, 1975. 740 p. (in Russian)].
- Основы лесной биогеоценологии / Под ред. В. Н. Сукачева и Н. В. Дылиса. М.: Наука, 1964. 574 с.* [*Osnovy lesnoy biogeotsenologii (Fundamentals of forest biogeocenology) / V. N. Sukachev and N. V. Dylis (Eds.). Moscow: Nauka, 1964. 574 p. (in Russian)].*
- ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустroительные. Метод закладки. М.: Гос. комитет СССР по лесн. хоз-ву, 1983. 60 с.* [*OST 56-69-83. Probnyye ploshchadi lesoustroitel'nyye. Metod zakladki (Forest planning sample plots. Method of establishing). Moscow: Gos. komitet SSSR po lesn. khoz-vu (State Committee of the USSR on Forestry), 1983. 60 p. (in Russian)].*
- 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. Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1962. Т. 52. С. 196–209* [*Parshevnikov A. L.* Krugovorot azota i zol'nykh elementov v svyazi so smenoy porod v lesakh sredney taygi (Cycle of nitrogen and ash elements in connection with the change of species in forests of the middle taiga) // *Tipy lesa i pochvy severnoy chasti Vologodskoy oblasti: tr. In-ta lesa i drevesiny SO AN SSSR (Types of forests and soils of the northern part of the Vologda Oblast: Proc. Inst. For. and Timber USSR Acad. Sci., Sib. Br.). 1962. V. 52. P. 196–209 (in Russian)].*

- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Географгиз, 1961. 496 с. [*Perelman A. I. Geokhimiya landshafta (Geochemistry of the landscape). Moscow: Geografgiz, 1961. 496 p. (in Russian)*].
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. школа, 1966. 392 с. [*Perelman A. I. Geokhimiya landshafta (Geochemistry of the landscape). Moscow: Vysshaya shkola, 1966. 392 p. (in Russian)*].
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с. [*Polevoy opredelitel' pochv Rossii (Field determinant of Russian soils). Moscow: V. V. Dokuchaev Soil Inst., 2008. 182 p. (in Russian)*].
- Пономарева В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1980. 221 с. [*Ponomareva V. V., Plotnikova T. A. Gumus i pochvoobrazovanie (metody i rezul'taty izucheniya) (Humus and soil formation (methods and results of the study)). Leningrad: Nauka. Leningrad Br., 1980. 221 p. (in Russian)*].
- Пугачев А. А. Изменение химического состава опада в ландшафтах кедрового стланика // Тез. докл. Всес. совещ. «Роль подстилки в лесных биогеоценозах». М.: Наука, 1983. С. 164–165 [*Pugachev A. A. Izmenenie khimicheskogo sostava opada v landshaftakh kedrovogo stlanika // Tez. dokl. Vses. soveshch. «Rol' podstilki v lesnykh biogeotsenozakh» (Abstr. All-Union workshop «The role of litter in forest biogeocenoses»). Moscow: Nauka, 1983. P. 164–165 (in Russian)*].
- Ремезов Н. П., Быкова Л. Н., Смирнова К. М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 284 с. [*Remezov N. P., Bykova L. N., Smirnova K. M. Potrebleniye i krugovorot azota i zol'nykh elementov v lesakh evropeyskoy chasti SSSR (Consumption and circulation of nitrogen and ash elements in the forests of the European part of the USSR). Moscow: Moscow Univ. Publ., 1959. 284 p. (in Russian)*].
- Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В., Бобкова К. С. Химический состав жидких атмосферных осадков в старовозрастных ельниках средней тайги // Геохимия. 2013. № 1. С. 72–83 [*Robakidze E. A., Torloпова N. V., Bobkova K. S. Khimicheskii sostav zhidkikh atmosfernykh osadkov v starovozrastnykh el'nikakh sredney taygi (Chemical composition of wet precipitation in old-growth middle-taiga spruce stands) // Geokhimiya (Geochemistry). 2013. N. 1. P. 72–83 (in Russian with English abstract)*].
- Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В., Бобкова К. С. Химический состав снеговых вод под пологом старовозрастных еловых древостоев средней тайги Республики Коми // Лесоведение. 2015. № 6. С. 458–469 [*Robakidze E. A., Torloпова N. V., Bobkova K. S. Khimicheskii sostav snegovykh vod pod pologom starovozrastnykh elovykh drevostoev sredney taygi Respubliki Komi (Chemical composition of snow melt under the old-growth spruce stands in the typical taiga of Komi Republic) // Lesovedeniye (For. Sci.). 2015. N. 6. P. 458–469 (in Russian with English abstract)*].
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с. [*Rodin L. Ye., Bazilevich N. I. Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskiiy krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara (The dynamics of organic matter and the biological cycle of ash elements and nitrogen in the main types of vegetation of the globe). Moscow; Leningrad: Nauka, 1965. 253 p. (in Russian)*].
- Рубцов М. В., Дерюгин А. А., Соломина Ю. Н., Гурцев В. И. Водорегулирующая роль таежных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 221 с. [*Rubtsov M. V., Deryugin A. A., Solomina Yu. N., Gurtsev V. I. Vodoreguliruyushchaya rol' taezhnykh lesov (The water-regulating role of taiga forests). Moscow: Agropromizdat, 1990. 221 p. (in Russian)*].
- Руднева Е. Н., Тонконогов В. Д., Дорохова К. Я. Круговорот зольных элементов и азота в ельнике-зеленомошнике северной тайги бассейна р. Мезень // Почвоведение. 1966. № 3. С. 14–26 [*Rudneva E. N., Tonkonogov V. D., Dorokhova K. Ya. Krugovorot zol'nykh elementov i azota v el'nike-zelenomoshnike severnoy taygi basseyna r. Mezen' (Cycle of ash elements and nitrogen in the green moss spruce forest of the northern taiga at Mezen river basin) // Pochvovedeniye (Soil Sci.). 1966. N. 3. P. 14–26 (in Russian)*].
- Смирнов В. В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 359 с. [*Smirnov V. V. Organicheskaya massa v nekotorykh lesnykh fitotsenozakh evropeyskoy chasti SSSR (Organic mass in some forest phytocenoses of the European part of the USSR). Moscow: Nauka, 1971. 359 p. (in Russian)*].
- Смолянинов И. И. Биологический круговорот веществ и повышение продуктивности лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 192 с. [*Smolyaninov I. I. Biologicheskiiy krugovorot veshchestv i povysheniye produktivnosti lesov (Biological circulation of substances and increasing forest productivity). Moscow: Lesn. prom-st (Wood Industr.), 1969. 192 p. (in Russian)*].
- Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 635 с. [*Usoltsev V. A. Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoy Evrazii: metody, baza dannykh i ee prilozheniya (Biological productivity of Northern Eurasia's forests: methods, database and its applications). Yekaterinburg: UrO RAN (Ural Br., Rus. Acad. Sci.), 2007. 635 p. (in Russian with English abstract)*].
- Уткин А. И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Итоги науки и техники. Лесоведение и лесоводство. Т. 1. М., 1975. С. 9–189 [*Utkin A. I. Biologicheskaya produktivnost' lesov (metody izucheniya i rezul'taty) (Biological productivity of forests (methods of study and the results)) // Itogi nauki i tekhniki. Lesovedeniye i lesovodstvo (Result. sci. technol. Forestry & For. Sci.). V. 1. Moscow, 1975. P. 9–189 (in Russian)*].
- Ушакова Г. И. Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского полуострова. Апатиты: Карел. науч. центр РАН, 1997. 150 с. [*Ushakova G. I. Biogeokhicheskaya migratsiya elementov i pochvoobrazovaniye v lesakh Kol'skogo poluostrova (Biogeochemical migration of elements*

- and soil formation in the forests of the Kola Peninsula). Apatity: Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci., 1997. 150 p. (in Russian)].
- Хабибуллина Ф. М. Почвенные микромицеты ельника чернично-зеленомошного средней тайги // Лесоведение. 2001. № 1. С. 43–48 [Khabibullina F. M. Pochvennye mikromitsety el'nika chernichno-zelenomoshnogo sredney taygi (Soil micromycetes of bilberry-green-moss spruce forest of middle taiga) // Lesovedenie (For. Sci.). 2001. N. 1. P. 43–48 (in Russian with English abstract)].
- Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). 2-е изд. СПб.: Мир и семья-95, 1995. 990 с. [Cherepanov S. K. Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR). 2-e izd. (Vascular plants of Russia and neighboring states (within former USSR). 2nd ed.). Saint Petersburg: Mir i semya-95 (Peace and Family-95), 1995. 990 p. (in Russian)].
- 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. N. 1–2. P. 80–87.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. Int. soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Res. Rep. N. 106. FAO, Rome, 2014. 192 p.
- Knulst J. C. Ratio between throughfall and open-field bulk precipitation used for quality control in deposition monitoring // Atmosph. Environ. 2004. V. 38. N. 29. P. 4869–4878.
- Lindroos A.-J., Derome J., Derome K., Niska K. Deposition. Forest condition monitoring in Finland. Nat. Rep., 1999 / Liisa Ukonmaanaho and Hannu Raitio (Eds.). Fin. For. Res. Inst., Res. Paper 782. Helsinki, Finland, 2000. P. 61–69.
- Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Pt. III. ICP Forests, 2002.
- Robakidze E. A., Torlopova N. V., Bobkova K. S. Chemical composition of wet precipitation in old-growth middle-taiga spruce stands // Geochem. Int. 2013. V. 51. N. 1. P. 65–75 (Original Rus. text © E. A. Robakidze, N. V. Torlopova, K. S. Bobkova, 2013, publ. in Geokhimiya. 2013. N. 1. P. 72–83).
- Vedrova E. F. Organic matter decomposition in forest litters // Euras. Soil Sci. 1997. V. 30. N. 2. P. 181–188 (Original Rus. text © E. F. Vedrova, 1997, publ. in Pochvovedeniye. 1997. N. 2. P. 216–223).

TURNOVER OF MINERAL ELEMENTS IN THE ECOSYSTEM OF NATIVE HERBACEOUS-BILBERRY SPRUCE FOREST IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE (KOMI REPUBLIC)

K. S. Bobkova, E. A. Robakidze, N. V. Torlopova

*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
Kommunisticheskaya str., 28, Syktyvkar, Republic of Komi, 167982 Russian Federation*

E-mail: bobkova@ib.komisc.ru, robakidze@ib.komisc.ru, torlopova@ib.komisc.ru

The contents of the paper aim at issues on native spruce forests in the taiga zone. It includes assessments of chemical elements local cycles in the ecosystem of middle-taiga of different ages of different herbaceous-bilberry spruce forest *Piceetum herboso-myrtillosum* on podzols soils. It shows the structure of organic and mineral plant matter from of different tiers is shown. It revealed the regularities processes of consumption and return of chemical elements in the soil-vegetation system. The tree stand plays a major role in formation of the structural composition of organic matter annual production and fall in the ecosystem of old-aged spruce forest. The renewal process was marked as successful under the canopy forest. The plant phytomass accumulates 2298 kg · ha⁻¹ elements of mineral nutrition. High accumulation capacity is demonstrated by Ca, N, K and Si. To form its annual production, spruce forest tolerate 144.1 kg · ha⁻¹ mineral elements. The biological cycle rate of nutrients for spruce forest equals 7.3 years. The annual leaf waste provides the soil surface with 104.5 kg · ha⁻¹ nitrogen and ash elements. Destruction annually releases 23 kg · ha⁻¹ mineral elements from leaf fallen waste. Forest litter is the main source of nutrients. The reserve of chemical elements in organic soil layer is 1044.9 kg · ha⁻¹. Precipitations annually enrich the soil with additional 24.5 kg · ha⁻¹ mineral elements. Transportation of mineral elements outside the limits of root layer (0–30 cm) within surface soil waters is 59.2 kg · ha⁻¹ a year.

Keywords: *Siberian spruce Picea obovata Ledeb., phytomass, production, leaf waste, nitrogen and ash elements, atmospheric precipitation, soil waters, water migration of mineral elements.*

How to cite: Bobkova K. S., Robakidze E. A., Torlopova N. V. Turnover of mineral elements in the ecosystem of native herbaceous-bilberry spruce forest in the middle taiga subzone (Komi Republic) // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2020. N. 2. P. 40–54 (in Russian with English abstract and references).