

КРУГОВОРОТ ЭЛЕМЕНТОВ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ В КОРЕННОМ СРЕДНЕТАЕЖНОМ ДОЛГОМОШНО-СФАГНОВОМ ЕЛЬНИКЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© 2024 г. К. С. Бобкова^{а, *}, Н. В. Лиханова^б

^аИнститут биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28,
Сыктывкар, Республика Коми, 167000 Россия

^бБотанический сад СГУ им. П. Сорокина, Октябрьский проспект, д. 55,
Сыктывкар, Республика Коми, 167001 Россия

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

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 24.08.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Приводятся материалы, характеризующие локальный цикл химических элементов в системе почва–фитоценоз среднетаежного спелого ельника долгомошно-сфагнового на болотно-подзолистых почвах. Показана структура органического и минерального вещества растений разных ярусов. Дано представление о миграции азота и зольных элементов в процессе формирования продукции фитомассы и возврата их растительными остатками опада. Основную роль в структурном составе годичной продукции и опада органического вещества в экосистеме старовозрастного ельника выполняет древостой. Установлено, что в фитомассе растений аккумулируется $1329.84 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания. Большей емкостью накопления характеризуются N, Ca, K. При формировании годичной продукции растения ельника выносят $136.18 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания. С годичным опадом на поверхность почвы поступает $107.00 \text{ кг га}^{-1}$ азота и зольных элементов. В процессе деструкции растительных остатков опада за год высвобождается 37.0 кг га^{-1} минеральных элементов. Основным аккумулятором питательных элементов служит органогенный горизонт почвы, где концентрируется $2421.79 \text{ кг га}^{-1}$ химических элементов. С атмосферными осадками в почву в течение года поступает 22.6 кг га^{-1} азота и зольных элементов. Показано, что вынос минеральных элементов за пределы корнеобитаемого слоя (0–40 см) с поверхностными водами составляет 71.78 кг га^{-1} в год.

Ключевые слова: Север России, средняя тайга, ельник, фитомасса, продукция, опад, азот, зольные элементы, круговорот веществ, атмосферные осадки, почвенные воды.

DOI: 10.31857/S0024114824010014, EDN: SMKAEQ

Обмен веществ между отдельными компонентами в лесных экосистемах определяет их взаимосвязь и взаимообусловленность. Биологический круговорот элементов минерального питания между почвой и фитоценозом во многом характеризует функционирование экосистемы, определяя процессы почвообразования и формирования состава фитоценозов. Показатели, характеризующие бюджет азота и зольных элементов в системе почва–фитоценоз в биогеоценозах, успешно используются в лесном хозяйстве при разработке и проведении мероприятий, направленных на улучшение питательного режима почв с целью увеличения продуктивности лесных насаждений. Круговорот элементов питания в еловых сообществах таежной зоны давно исследуется (Ремезов и др., 1959; Родин, Базилевич, 1965; Казимиров, Морозова, 1973; Забоева, 1975; Арчегова и др., 1975; Мананов, Никонов, 1981; Вакуров, Полякова, 1982; Никонов, Лукина, 1994; Лукина, Никонов, 1996; Бобкова, 1999; Бобкова и др., 2020).

В настоящее время оценка баланса элементов минерального питания в лесных экосистемах методом моделирования круговорота элементов позволяет ближе подойти к решению проблемы регулирования продуктивности лесов и улучшения из средообразующих функций (Chertov et al., 2001; Komarov et al., 2003; Комаров и др., 2007). Большинство исследований проведено в ельниках на автоморфных подзолистых почвах. Отмечено, что в еловых экосистемах северотаежной зоны минеральный обмен между почвой и растительностью ограничен главным образом в системе фитоценоз – лесная подстилка. Видовой состав фитоценоза определяет параметры биологической миграции, поскольку различные виды растений накапливают неодинаковую массу и характеризуются специфическим химическим составом. Следует отметить, что большая часть лесопокрытой площади европейского Северо-Востока России занята еловыми лесами. Только на территории Республики Коми (РК) еловые

сообщества произрастают на площади 16.2 млн га, примерно половину которой занимают заболоченные типы сообществ. Исследования круговорота веществ в еловых экосистемах на болотно-подзолистых почвах единичные (Вакуров, Полякова, 1982; Лукина, Никонов, 1996; Руднева и др., 1996), и они проведены в условиях северной тайги. Цель данной работы состоит в оценке потоков азота и зольных элементов в системе почва—фитоценоз коренного среднетаежного ельника долгомошно-сфагнового на иллювиально-гумусово-железистом глееватом подзоле.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на территории Чернамского лесного стационара Института биологии Коми научного центра УрО РАН, который расположен в подзоне средней тайги (62°17'N, 50°20'E), в период 2000–2006 гг. Лесной стационар находится на Мезенско-Вычегодской равнине и является частью древнейшей Русской платформы. В основании ее лежат докембрийские кристаллические породы, перекрытые толщей малонарушенных осадочных пород. Водораздельные пространства сложены пермскими песчаниками, глинами, мергелями триасовой системы. Эти породы перекрыты четвертичными отложениями рисского (московского) оледенения, переработанными денудацией и водно-аккумулятивными процессами (Атлас Коми..., 1964). В рельефе преобладают волнистые и увалистые междуречья с максимальными абсолютными высотами до 230–250 м. Водораздельные пространства обычно имеют плоский или пологоволнистый рельеф. Территория представляет собой слабо дренированную аккумулятивную моренную равнину. Почвообразующими породами являются двучленные отложения — маломощные пески и супеси, подстилаемые моренными суглинками. В почвенном покрове слабо дренированных водоразделов, сложенных двучленными породами, господствуют сочетания торфяно-подзолисто-глеявых иллювиально-гумусовых почв с торфянисто-подзолисто-глееватыми иллювиально-гумусовыми, которые на дренированных приречных склонах водоразделов сменяются типичными подзолистыми почвами (Атлас почв..., 2010).

Ельник долгомошно-сфагновый (*Piceetum polytrichoso-sphagnosum*) представлен разновозрастным и разновысотным, но без ясно выраженного второго яруса древостоем. Согласно С.А. Дыренкову (1984), он относительно разновозрастный, предклимаксовый. Класс бонитета у насаждения — V, полнота — 0.7 (табл. 1). Древостой состоит из ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и березы повислой (*B. pendula* Roth). В подлеске встречаются единично кусты рябины (*Sorbus aucuparia* L.), ивы (*Salix* sp.), шиповника (*Rosa acicularis* Lindl.). Подрост (1.86 тыс. экз. га⁻¹) удовлетворительного состояния образован в основном елью. Травяно-кустарничковый ярус с проективным покрытием около 40% составлен черникой (*Vaccinium myrtillus* L.), брусникой (*V. vitis-idaea* L.), морошкой (*Rubus chamaemorus* L.), хвощом (*Equisetum sylvaticum* L.), осокой шаровидной (*Carex globularis* L.). Моховой покров почти сплошной, представлен в основном политрихумом обыкновенным (*Polytrichum commune* Hedw.) в сочетании со сфагновым (*Sphagnum* sp.) и редко зелеными мхами (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch. et Cmb., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.).

Ельник развивается на иллювиально-гумусово-железистом глееватом подзоле. В почвенном профиле мощность подстильно-торфяного горизонта О составляет 17 ± 2.25 см, под ним залегает подзолистый горизонт ELg — 11 ± 1.7 см, переходящий в субэлювиальный горизонт BELg (14 ± 1.85 см) и текстурный BTg (10 ± 1.32 см) (Полевой определитель..., 2008). Рассматриваемые почвы характеризуются кислой реакцией в активной части профиля (pH = 3.78–4.42). Для почвы характерно повышенное содержание в верхних слоях оксидов железа и алюминия. В органогенном горизонте накапливаются биофильные элементы — окислы кальция, железа, фосфора, калия, марганца. Наблюдается вынос всех водорастворимых соединений по профилю почвы.

Для характеристики биогеохимической циркуляции минеральных элементов в годовом цикле лесных экосистем выделяют три основных потока веществ: биологический, атмосферный и геохимический. Биологическая миграция — биологическое поглощение химических элементов растениями из

Таблица 1. Лесоводственно-таксационная характеристика* древостоя ельника долгомошно-сфагнового

Состав древостоя	Древесная порода	Возраст, лет	Число деревьев, экз. га ⁻¹		Запас древесины, м ³ га ⁻¹		Средняя высота, м	Средний диаметр, см
			растущих	сухих	растущих	сухих		
7Е2Б1С	Ель	70–180	1419	25	102	1.5	12	13
	Сосна	110	54	—	15	—	15	19
	Береза	70–110	385	18	53	1.4	12	16
	ВСЕГО	—	1858	43	170	2.9	—	—

*Данные 2000 г.

почвы и возврат с опадом, атмосферная — поступление химических элементов в биогеоценоз из атмосферы (осадки и пыль) за год, геохимическая — перемещение химических элементов по профилю почвы и геохимических ландшафтов преимущественно с поверхностным внутрипочвенным стоком (Манаков, Никонов, 1981; Лукина, Никонов, 1996). Нами определены биологическая, атмосферная и некоторые аспекты геохимической миграции. Для оценки биологической миграции определялись следующие показатели: запас, годичная продукция фитомассы и масса растительных остатков опада. Регрессионные уравнения зависимости массы отдельных компонентов фитомассы деревьев ели, сосны и березы от диаметра ствола в ельнике долгомошно-сфагновом, полученные в результате анализа модельных деревьев, приведены нами ранее (Бобкова, 2007; Бобкова, Лиханова, 2012). Связь фитомассы хвои (листьев) и ветвей довольно хорошо описывается уравнениями прямой ($y = a + bx$) зависимости. При сопоставлении массы ствола, коры, ветвей и корней с диаметром дерева используются уравнения степенной ($y = ax^b$) формы, где y — масса той или иной фракции, x — диаметр ствола. При выборе уравнений учитывали величины абсолютной и относительной погрешности. Коррелятивное отношение для сосны составляет 0.903–0.956, для ели — 0.716–0.990, для березы — 0.877–0.958.

Постоянная пробная площадь (ППП) в ельнике долгомошно-сфагновом была заложена размером 0.24 га, на ней проведен сплошной перебор деревьев. Анализ таксационных материалов выполнен по Лесотаксационному справочнику (1986). Определяли массу и продукцию органического вещества древесных растений по методу модельных деревьев (Уткин, 1975; Усольцев, 2007). В ельнике проанализированы деревья ели (7 шт.), березы (3 шт.), сосны (3 шт.) и подрост (5 шт.). Массу корней древесных, травянистых растений и кустарничков определяли методом крупных (50×50 см) (10 шт.) и мелких (с помощью бура диаметром 10 см) (35 шт.) монолитов (Орлов, 1967). Прирост их оценен по Методам изучения ... (1978): $P_{кр} = \frac{(n \cdot K)}{C}$, где $P_{кр}$ — прирост корней (единицы массы); n — прирост стволов и ветвей (единицы массы); K — доля корней от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %; C — доля ствола и ветвей от суммарной массы ствола, ветвей и корней, %.

Надземную массу растений напочвенного покрова оценивали методом укусов на уровне почвы буром диаметром 10 см в 40-кратной повторности. Продукцию растений этого яруса определяли, отделив побеги текущего года у 80–100 растений. По полученным соотношениям рассчитывали общий прирост массы растений. Прирост и опад корней травяно-кустарничкового яруса был принят равным $\frac{1}{4}$ от их массы (Dahlman, Kuseera, 1965; Бобкова, 1987). Ежегодно отмирающую массу брусники

принимали — 30%, черники, травяных растений и мхов — 100% прироста (Родин, Базилевич, 1965; Родин и др., 1968; Казимиров, Морозова, 1973). Навески древесины ствольной, коры ствольной, ветвей, хвои (листья), корней и растений напочвенного покрова высушивали при температуре 105°C и данные переводили в абсолютно сухой вес. Сбор опада древесных растений осуществляли с помощью 20 опадоуловителей, которые размещались на расстоянии 4–5 м вдоль границ ППП. Размеры опадоуловителей — 0.5×0.5 м, высота над поверхностью почвы — 15 см. Массу подстилки определяли с помощью металлического шаблона площадью 98 см² в 35-кратной повторности. Данные переводили в абсолютно сухую массу. Вынос растениями элементов минерального питания из почвы за год оценивали по накоплению их в продукции. Для оценки скорости трансформации и минерализации опада использовали методику (Heath et al., 1964). Пробы разных фракций опада в 3–5 кратной повторности закладывали в нейлоновые мешочки размером 20×25 см (размер ячеек 1×1 мм) на поверхность лесной подстилки и по истечении 12 месяцев определяли убыль их массы. Скорость оборота веществ определяли как соотношение запаса химических элементов в подстилке к их накоплению в приросте. Скорость круговорота для всего фитоценоза оценивали как простое среднее арифметическое значение скорости оборота элементов. Интенсивность разложения оценивали как отношение массы подстилки к массе опада (П/О) (Родин, Базилевич, 1965; Лукина, Никонов, 1996). Коэффициент разложения — K_r определяли как отношение запаса элемента в подстилке к его содержанию в годичном опаде, умноженному на опадо-подстилочный коэффициент (Андреев, Пугачев, 1983). Продукцию ствольной древесины оценивали по среднему объемному приросту у модельных деревьев. Ширину годичного прироста определяли по спилам древесины с каждой секции ствола на полуавтоматической программно-измерительной установке LINTAB5. Измерение годичных колец проведено вручную путем перемещения стола с исследуемым образцом с помощью рукоятки и соотнесения торцевых контуров годичных колец и видимых линий окуляра. Запись ширины годичного кольца осуществляется нажатием клавиши на ЭВМ. Прибор используется с программой Tsap-Win Basic, которая позволяет рассматривать на экране кривые изменения показателей прироста у большого числа деревьев, сдвигать кривые на различное число лет, вставлять и удалять кольца.

Дождевые осадки собирали с июня по октябрь в течение трех лет. Для сбора дождевых осадков применяли осадкоприемники с диаметром приемной поверхности 20 см в 14-кратной поверхности, которые размещались на расстоянии 5 м друг от друга под кронами елей и в межкروновых пространствах (“окнах”). Воды, свободно стекающие

по почвенному профилю под влиянием гравитации, собирали в лизиметры с площадью приемной поверхности 40 × 40 см, расположенные под каждым из горизонтов: О, ELg, BELg — в 4-кратной повторности. Дождевые осадки и лизиметрические воды собирали в течение сезона (июнь—октябрь). Снег отбирали с декабря по март в течение трех лет. Для сбора использовались снегоприемники ($S = 1017.4 \text{ см}^2$), которые были установлены в 3–4-х повторностях под кронами елей, берез и в “окнах”. Величину годового поступления элементов определяли суммированием их поступления как жидкими, так и твердыми осадками.

Содержание N в растительных образцах изучали методом газовой хроматографии на автоматическом анализаторе азота ФТФ-1500 фирмы Карло Эрба (Италия). Концентрации Ca, Si, Mg, Mn определены с использованием метода зольного анализа и атомно-абсорбционного спектрофотометра Hitachi 18–60 МГА-915 (Япония), концентрации K, Na, P, Fe и Al — методом плазменной фотометрии на спектрофотометре SP-90A (Великобритания). Для количественного анализа вод применялись следующие методы: рН — потенциометрия электродами низкой ионной силы; сульфаты — турбидиметрия на КФК-3 (Россия); фосфаты, нитраты, ионы аммония — фотометрия на КФК-3; хлориды — колориметрическая титриметрия; Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Mn — атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. Анализы выполнены в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Расчет содержания химических элементов в составе растительного органического вещества производился путем умножения массы структурных единиц растений на содержание в них того или иного элемента. Учет годового потребления зольных элементов и азота выполняли путем умножения массы структурных компонентов прироста и величин максимального содержания в них отдельных химических элементов (Родин, Базилевич, 1965; Гришина, 1974). Полученные данные суммировались по компонентным элементам. На

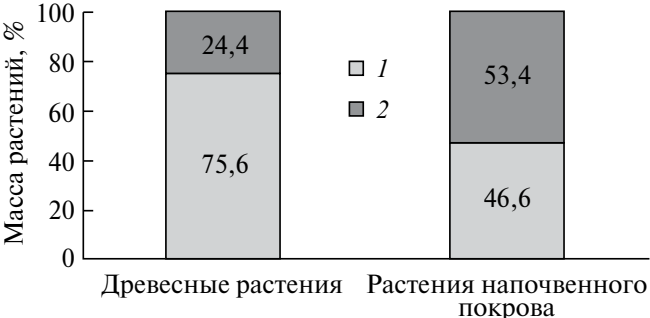


Рис. Надземная (1) и подземная (2) масса растений в ельнике долгомошно-сфагновом.

основании этого вычислялось общее годовичное потребление минеральных веществ фитоценоза в целом. Аналогично поступали и при расчетах годовичного возврата элементов минерального питания с опадом. Данные в работе представлены в виде средней арифметической величины со стандартным отклонением ($M \pm SD$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Запасы фитомассы. Фитомасса древесных растений, определенная по регрессионным уравнениям и материалам таксации, древостоя старовозрастного ельника долгомошно-сфагнового представлена в табл. 2. Так, древесные растения в растущих органах формируют фитомассу $156 \pm 8.62 \text{ т га}^{-1}$. Распределение органического вещества древесного яруса по компонентам следующее: стволовая древесина — 52.4%, ветви — 8.5%, стволовая кора — 7.4%, листья (хвоя) — 7.3%, корни — 24.4%. Масса надземных органов древесных растений в три раза превышает массу корней (рис.). В сухостойных деревьях сосредоточено $3 \pm 0.25 \text{ т га}^{-1}$ фитомассы.

Масса растений напочвенного покрова в исследуемом сообществе составляет $3 \pm 0.25 \text{ т га}^{-1}$. В ее структуре приоритетную роль выполняют растения травяно-кустарничкового яруса, которые по

Таблица 2. Запасы, продукция и опад растительного органического вещества растений* в ельнике долгомошно-сфагновом

Компоненты	Фитомасса, т га ⁻¹	Продукция, т га ⁻¹ год ⁻¹	Опад, т га ⁻¹ год ⁻¹ ***
Биомасса	159.45 ± 8.71	6.00 ± 0.53	4.19 ± 0.39
древесные растения	156.3 ± 8.62	4.83 ± 0.43	3.04 ± 0.28
подлесок	0.03 ± 0.001	0.01 ± 0.001	0.01 ± 0.001
напочвенный покров	3.12 ± 0.25	1.16 ± 0.16	1.14 ± 0.14
Фитодетрит			
КДО**	4.01 ± 0.35	—	—
лесная подстилка	75.1 ± 6.84	—	—

* Включены все компоненты ОВ фитоценоза.
** Сухостой, сухие ветви.
*** Среднее за 4 года.

питания в почве, изъятые растениями в процессе питания, происходит новообразование гумуса, определяющего плодородие почвы. В фитоценозе долгомошно-сфагнового ельника масса опада древесных растений (в среднем за четыре года наблюдений) составляет $3.05 \pm 0.28 \text{ т га}^{-1}$, из них листового опада занимает 64.8%, корни — 14.8%, ветви — 8.2% и другие компоненты (древесина, кора, шишки) — 12.2%. В ценозе в составе наземного опада значительно участие растений напочвенного покрова с массой $1.14 \pm 0.14 \text{ т га}^{-1}$.

Аккумуляция минеральных элементов в фитомассе — это суммарный результат многолетних и многочисленных их циклов, который оценивается количеством находящегося в составе растений органического вещества (Гришина, 1974; Базилевич, Титлянова, 2008). Элементный состав отдельных компонентов фитоценоза приведен в работе Бобковой, Лихановой (2012). В исследуемом еловом насаждении в живой фитомассе аккумулировано $1330 \pm 46.8 \text{ кг га}^{-1}$ N и зольных элементов (табл. 3), что в 1.3–1.5 раз меньше, чем в среднетаежных еловых фитоценозах на автоморфных почвах. Следует отметить, что спелые ельники на подзолистых почвах характеризуются большей продуктивностью, и, как следствие, более высоким накоплением N и зольных элементов в фитомассе, чем заболоченные ельники на торфянисто-подзолистых почвах. Ряд накопления минеральных элементов, заключенных в фитомассе ценоза, следующий: $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Si} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Mn} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na}$. Из зольных элементов относительно большей емкостью накопления (45.5%) обладают Ca, K и Si. Основные запасы элементов минерального питания сосредоточены в растущих органах древесных растений — $1238 \pm 40.5 \text{ кг га}^{-1}$. Сухие органы древесных растений содержат $21 \pm 2.5 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания, которые концентрируются в основном в сухостое ели и роль которых значительна в биогеохимических процессах спелых лесных сообществ (Filipiak, 2018). Растения напочвенного покрова в фитомассе содержат $71 \pm 4.6 \text{ кг га}^{-1}$ N и зольных элементов. В их накоплении растениями нижних ярусов фитоценоза ведущая роль принадлежит травяным растениям ($20 \pm 2.3 \text{ кг га}^{-1}$), подземным органам кустарничков и трав ($15 \pm 1.7 \text{ кг га}^{-1}$). Надземные органы кустарничков и трав содержат 39.1% от общей массы питательных элементов растений напочвенного покрова. В целом в растительном сообществе коренного среднетаежного долгомошно-сфагнового

ельника на глееватом подзоле содержание N составляет $516 \pm 40.5 \text{ кг га}^{-1}$, а зольных элементов — $814 \pm 37.3 \text{ кг га}^{-1}$ (табл. 3).

Вынос элементов питания. Показатель, характеризующий количество элементов минерального питания в продукции фитомассы в насаждениях, определяет интенсивность биологического круговорота (Гришина, 1974). Для формирования годичной массы органического вещества старовозрастный долгомошно-сфагновый ельник выносит из почвы $136 \pm 13.9 \text{ кг га}^{-1}$ N и зольных элементов. Большая их часть (76.4%) используется древесными растениями. Растения напочвенного покрова ежегодно на формирование продукции извлекают из почвы $32 \pm 1.4 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания, что составляет 23.6% от общего их количества, используемого на питание. Среди элементов более интенсивно в биологический круговорот веществ вовлекаются N, K, Ca, Si, P и Mg (табл. 3). Так, количество минеральных элементов, выносимых из почвы на формирование годичной продукции, в ельниках разных типов в условиях подзоны северной тайги составляет $70\text{--}180 \text{ кг га}^{-1}$ (Руднева и др., 1966; Забоева, 1975; Лукина, Никонов, 1996; Бобкова, 1999; и др.), а в среднетаежных ельниках на подзолистых почвах — $144\text{--}186 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания (Паршевников, 1962; Казимиров, Морозова, 1973; Арчегова и др., 1975; Бобкова и др., 2020; и др.).

Минеральные элементы в лесной подстилке. Подстилично-торфянистый горизонт в ельнике долгомошно-сфагновом мощностью $17 \pm 1.8 \text{ см}$ с запасом органического вещества $75 \pm 6.84 \text{ т га}^{-1}$ аккумулирует $2422 \pm 72.3 \text{ кг га}^{-1}$ N и зольных элементов, что в 1.8 раза больше, чем в живом растительном веществе ценоза (табл. 4). Распределение минеральных элементов в лесной подстилке азотно-кальциево-кремниевое: $\text{N} > \text{Ca} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{K} > \text{Mn} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Na}$. Согласно исследованиям И. Б. Арчеговой (1975), К.С. Бобковой с соавторами (2020), в подстилке среднетаежных ельников зеленомошной группы типов на автоморфных подзолистых почвах концентрируется от 1044 до 1415 кг га^{-1} азота и зольных элементов, что в 1.4–2.3 раза меньше, чем в исследуемом ельнике долгомошно-сфагновом на болотно-подзолистых почвах. Характерно для исследуемого ельника то, что в подстилке аккумулировано в 18 раз больше элементов питания, чем выносятся на формирование продукции фитомассы. Ранее К.С. Бобковой (1987) выявлено, что

Таблица 4. Вынос минеральных элементов с лизиметрическими водами на иллювиально-гумусово-железистом глееватом подзоле ельника долгомошно-сфагнового, кг га^{-1} в год

Горизонт	N	Si	Ca	Mg	P	K	Na	Mn	Fe	Al
O	3.03 ± 0.7	57.33 ± 13.6	21.91 ± 4.8	4.40 ± 1.2	3.11 ± 1.1	3.10 ± 0.7	2.39 ± 0.6	0.07 ± 0.02	1.62 ± 0.4	1.71 ± 0.5
ELg	2.98 ± 0.6	41.01 ± 9.8	21.08 ± 3.8	4.59 ± 0.7	3.14 ± 0.9	2.90 ± 0.6	3.10 ± 0.8	0.08 ± 0.01	1.01 ± 0.2	1.01 ± 0.2
BELg	3.14 ± 0.5	36.11 ± 9.1	18.03 ± 3.6	3.91 ± 0.9	3.98 ± 1.3	1.24 ± 0.3	4.31 ± 0.8	0.02 ± 0.01	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.04

в полугидроморфных почвах ельников корни древесных растений сосредоточены в слое 0–40 см. Почти вся масса физиологически активных корней располагается в органогенном горизонте. Корни кустарничков и трав более чем на 74% концентрируются также в этом горизонте.

Водная миграция химических элементов. Как известно (Федоров, 1977; Матвеев, Матвеева, 2014), основным источником почвенной влаги являются атмосферные осадки, количество и распределение которых связано с климатическими условиями региона, метеорологическими условиями отдельных лет, а также составом и возрастом древостоя. Им отводится роль постоянного “резервного фонда” биологического круговорота веществ, компенсатора, благодаря которому происходит постоянное пополнение биогеоценоза элементами минерального питания. Следует учитывать, что высокая влажность почвы способствует вымыванию из нее подвижных форм всех элементов (Одум, 1975). Химический состав атмосферных осадков характеризуется пространственной и сезонной вариативностью (Казимиров, Морозова, 1973; Лукина, Никонов, 1996; Lindroos et al., 2000). В лесных сообществах древесный ярус оказывает существенное влияние на количество и качество осадков, поступающих на поверхность почвы (Морозова, Куликова, 1974; Ушакова, 1997; Карпачевский и др., 1998). Отмечено выщелачивание элементов осадками, проникающими через кроны древесных пород. В работах Е.А. Робакидзе с соавторами (2013, 2015) отмечено, что минерализация атмосферных осадков, прошедших через кроны среднетаежных ельников, стабильно низкая. Выявлено, что по содержанию ионов водорода дождевые осадки, прошедшие через кроны древостоя ельника долгомошно-сфагнового, относятся к слабокислым (при средней величине $\text{pH} = 5.4$) гидрокарбонатно-кальциево-калиевым. С атмосферными осадками на поверхность почвы в ельнике долгомошно-сфагновом поступает $23 \pm 1.6 \text{ кг га}^{-1}$ в год N и зольных элементов. Поступление минеральных элементов с кроновыми водами характеризуется калиево-кальциево-магниевым-азотным типом химизма. Атмосферные осадки в старовозрастном ельнике играют определенную роль в пополнении запаса элементами минерального питания в почве. Так, с кроновыми водами в исследуемый ельник поступает 40% от потребляемого фитоценозом на построение продукции K, 15% — Mg, 26% — Ca.

Потоки химических элементов с почвенными водами. Н.В. Лукиной, В.В. Никоновым (1996) установлено, что биогеохимическая роль ельников на Крайнем Севере имеет двойной характер. 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 почвы. В почвенной толще процессы выноса часто выражаются накоплением подвижных форм элементов в субэлювиальном горизонте. Конечным итогом процессов преобразования почвы ельников в условиях севера является вынос химических элементов из почвы в результате геохимической миграции, хотя размеры выноса невелики ($18\text{--}21 \text{ кг га}^{-1}$ в год). Лизиметрические воды исследуемого ельника долгомошно-сфагнового на иллювиально-гумусово-железистом глееватом подзоле характеризуются относительно высоким выносом минеральных элементов (табл. 4). На первом месте по выносу из подстилки и миграции в верхних горизонтах почвы в ельнике стоит Si, далее Ca, Mg, P, K и Na. С глубиной значительно снижается концентрация Si и K. В исследуемом ельнике из подстилки максимально поступают и мигрируют по почвенному профилю в составе органоминеральных комплексов типоморфные элементы, такие как Fe и Al. Следует отметить, что геохимическая подвижность Al и Fe очень мала, что объясняет их накопление в мертвых растительных остатках и способность осаждаться в верхних минеральных горизонтах.

Это свидетельствует об интенсивном биологическом поглощении элементов растениями и микроорганизмами. Ежегодно за пределы корнеобитаемого слоя поступает определенное количество элементов в результате процессов водной миграции. По нашим оценкам, за пределы горизонта B_{Lg} поступает $72 \pm 5.1 \text{ кг га}^{-1}$ минеральных элементов в год без учета элементов, содержащихся в почве в малоподвижной форме. Миграционные потоки элементов с лизиметрическими водами в более глубокие слои почвы исследуемого ельника нами не изучены.

Скорость круговорота веществ определяется временем, в течение которого химический элемент поглощается организмом, проходит все этапы трансформации и возвращается в среду обитания. Этот показатель характеризуется отношением запаса химических элементов в лесной подстилке к содержанию их в приросте фитомассы (Родин, Базилевич, 1965; Базилевич, Титлянова, 2008). В ельнике долгомошно-сфагновом рассматриваемый показатель равен 17.8 лет. Для еловых насаждений на подзолистых почвах более южных регионов лесной зоны скорость круговорота составляет от 1 года до 7 лет (Андрианова, 2001), а для среднетаежного ельника на подзолистых почвах — 7.3 года (Бобкова и др., 2020), на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах — 9–10 лет (Бобкова, 1999). В среднетаежном ельнике долгомошно-сфагновом наибольшей скоростью оборота (лет) отличаются основные органогены: K (4.5),

Таблица 5. Показатели биологического круговорота химических элементов в ельнике долгомошно-сфагновом

Показатель	Зольные элементы										N	Всего
	Ca	K	Si	Mg	P	Mn	Al	Fe	Na			
Аккумулировано в фитомассе, кг га ⁻¹	340.53 ± 16.3	188.37 ± 10.5	76.49 ± 8.4	59.96 ± 6.8	60.55 ± 7.1	32.96 ± 2.9	28.30 ± 2.8	22.62 ± 2.7	4.44 ± 0.3	515.62 ± 40.5	1329.84 ± 46.8	
Накопление в продукции, кг га ⁻¹ в год	19.95 ± 1.1	24.93 ± 1.5	11.51 ± 0.5	6.52 ± 0.4	6.61 ± 0.4	2.84 ± 0.2	2.97 ± 0.2	1.63 ± 0.1	0.39 ± 0.02	58.83 ± 3.2	136.18 ± 13.9	
Скорость оборота, год	22.8 ± 1.5	4.5 ± 0.4	35.4 ± 0.5	14.5 ± 1.6	7.6 ± 0.9	39.7 ± 2.7	57.8 ± 0.8	108.3 ± 1.5	13.8 ± 0.6	14.2 ± 0.6	17.8 ± 1.0	
Поступление с опадом, кг га ⁻¹ в год	26.09 ± 2.6	11.50 ± 0.6	15.15 ± 1.5	5.29 ± 0.4	4.25 ± 0.3	3.16 ± 0.2	1.84 ± 0.1	1.60 ± 0.1	0.37 ± 0.01	37.75 ± 2.15	107.00 ± 17.4	
П/О	17.4	9.8	26.9	17.8	11.7	35.7	23.3	110.3	14.5	22.1	22.6	
Запас в подстилке, кг га ⁻¹	455.21 ± 19.2	113.01 ± 9.2	408.00 ± 17.2	94.41 ± 11.6	49.91 ± 1.6	112.85 ± 13.9	171.66 ± 9.9	176.58 ± 10.2	5.40 ± 0.5	834.76 ± 35.2	2421.79 ± 72.3	
K _p	0.39	0.22	0.61	0.40	0.27	0.80	2.1	2.5	0.3	—	—	
Поступление с атмосферными осадками и выщелачивание из крон деревьев, кг га ⁻¹ в год	5.18 ± 0.4	9.93 ± 1.6	0.28 ± 0.04	1.69 ± 0.2	1.43 ± 0.1	0.72 ± 0.1	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01	1.39 ± 0.07	1.85 ± 0.2	22.6 ± 1.6	
Потоки элементов с почвенными водами за корнеобитаемый слой, кг га ⁻¹ в год	18.03 ± 3.6	1.24 ± 0.3	36.11 ± 9.1	3.91 ± 0.9	3.98 ± 1.3	0.22 ± 0.01	0.15 ± 0.03	0.19 ± 0.04	4,31 ± 0.8	3.64 ± 0.08	71.78 ± 5.1	

P (7.6). Скорость круговорота Na, N, Mg, Ca, Si, Mn и Al выше 10, Fe 100 лет (табл. 5).

Возврат минеральных элементов с растительным опадом в поверхность почвы старовозрастного ельника составляет $107 \pm 17.4 \text{ кг га}^{-1}$. В спелых среднетаежных еловых сообществах разных типов, произрастающих на территории Республики Коми, с опадом за год возвращается от 79 до 115 кг га^{-1} азота и зольных элементов (Арчегова и др., 1975; Бобкова, 1999; Бобкова и др., 2020). Из надземных органов древесных растений с опадом на поверхность почвы переходит $100 \pm 16.3 \text{ кг га}^{-1}$ азота и зольных элементов. Большая часть элементов минерального питания на поверхность почвы поступает с листьями (хвоей) ели, сосны, березы. С опадом трав ежегодно в почву возвращается $11 \pm 0.4 \text{ кг га}^{-1}$, с опадом мхов $6 \pm 0.5 \text{ кг га}^{-1}$, с кустарничками и полукустарничками $2 \pm 0.2 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания. Ряд содержания минеральных элементов в опаде азотно-кальциево-кремниевый и располагается следующим образом: $\text{N} > \text{Ca} > \text{Si} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Mn} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na}$.

Скорость разложения опада. Поступающий на поверхность почвы растительный опад подвергается биологической трансформации (Holub et al., 2001). Отношение массы подстилки к массе опада (П/О) используют для оценки скорости разложения опада и высвобождения химических элементов. Чем выше соотношение массы подстилки к массе опада, тем слабее интенсивность биологического круговорота в экосистеме (Никонов, Лукина, 1994). В исследуемом старовозрастном ельнике П/О составляет 22.6, что свидетельствует о медленной деструкции растительных остатков в лесной подстилке (табл. 5). В течение года в процессе разложения растительного опада за год высвобождается $37 \pm 1.4 \text{ кг га}^{-1}$ минеральных элементов, в том числе из растительных остатков березы 39.7%, ели — 18.2, сосны — 0.7, растений напочвенного покрова — 41.4%.

Процесс высвобождения зольных элементов из разлагающихся растительных остатков опада часто характеризуется коэффициентом разложения (Андреев, Пугачев, 1983). Согласно Н. В. Лукиной, В. В. Никонову (1996), поэлементный расчет с помощью Кр позволяет разделить элементы минерального питания на 3 группы: “балластные” — элементы достаточны на десятки и даже сотни лет; элементы высокой потребности, которых может хватить на несколько лет, и элементы исключительной потребности, которых недостаточно даже для формирования годичной продукции. К первой группе относят элементы $\text{Kp} > 1.5$, ко второй — $0.5 < \text{Kp} < 1.5$, к третьей — с $\text{Kp} < 0.5$. Согласно нашим расчетам, для долгомошно-сфагнового ельника элементы распределены следующим образом: 1 группа — Al, Fe, 2 группа — Si, Mn, 3 группа — Ca, K, Mg, P, Na. Следовательно, запасов Ca, K, Mg, P, Na в подстилке ельника

долгомошно-сфагнового хватает для длительного обеспечения растений. В годичном цикле биологического круговорота таких элементов, как Si, Mn, достаточно, а Al, Fe — в избытке. Следует отметить, что в процессе функционирования фитоценозов происходит непрерывное пополнение элементов минерального питания в почве: за счет поступления на ее поверхность опада, как было показано выше, миграции их из атмосферы (жидкие осадки + пыль) и выветривания. Показано, что с атмосферными осадками в результате выщелачивания элементов минерального питания из крон деревьев северо-таежного ельника поступает 18 кг га^{-1} (Лукина, Никонов, 1996), а среднетаежного — 24 кг га^{-1} (Бобкова и др., 2020) элементов питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Годичный цикл круговорота веществ в старовозрастном ельнике на болотно-подзолистых почвах определяется в основном зелеными фракциями фитомассы, так как через листья (хвою), которые составляют большую часть прироста и опада, осуществляется обмен минеральными элементами в системе почва-растение. В этой системе обмен веществ совершается главным образом в органическом горизонте, где концентрируется основная масса физиологически активных корней. В коренном среднетаежном ельнике долгомошно-сфагновом на иллювиально-гумусово-железистом глееватом подзоле запасы растительного органического вещества составляют 163.43 т га^{-1} , из них в живых древесных растениях сосредоточено 98.0%. В фитомассе насаждения аккумулируется $1329.84 \text{ кг га}^{-1}$ N и зольных элементов. Наиболее интенсивным накоплением характеризуются N, Ca, K, доля которых в общем содержании элементов в массе органического вещества составляет 78.5%. На формирование годичной продукции (6 т га^{-1}) фитоценозом из почвы выносятся $136.18 \text{ кг га}^{-1}$ элементов минерального питания. Такие элементы, как N, K, Ca, Si, P и Mg, довольно активно потребляются растениями на формирование продукции фитомассы. В экосистеме старовозрастного ельника на полугидроморфных почвах расходная статья биологической миграции элементов питания, связанная с размером ежегодного прироста фитомассы, превалирует над приходной, обусловленной возвращением химических элементов с опадом. Возврат элементов питания с растительными остатками опада составляет 78.6%, потребляемых на прирост. Наряду с азотом фитоценоз энергично отчуждает Ca. Для данного ценоза характерен большой запас мортмассы (подстилка + КДО) — 79.11 т га^{-1} , в которой концентрируется $2443.06 \text{ кг га}^{-1}$ азота и зольных элементов со следующим распределением: $\text{N} > \text{Ca} > \text{Si} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Mn} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na}$. В среднетаежном старовозрастном ельнике долгомошно-сфагновом большие запасы химических

элементов в лесной подстилке создают гарантию его устойчивости. Основная роль в аккумуляции, потреблении и возврате с опадом химических элементов принадлежит древостою. Атмосферная миграция — поступление химических элементов в еловый биогеоценоз из атмосферы (жидкие осадки + пыль) — за год составляет $1.85 \text{ кг га}^{-1} \text{ N}$ и 20.75 кг га^{-1} суммы зольных элементов. Элементы расположены в определенной последовательности по степени вымывания из древостоя: $\text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Na} > \text{Mn} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Fe}$ и выщелачивания из лесной подстилки: $\text{N} > \text{Si} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{K} > \text{Mn} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na}$. Вынос элементов питания за пределы корнеобитаемого слоя (0–40 см) с поверхностными водами составляет 71.78 кг га^{-1} . Большой скоростью биологического оборота (лет) отмечаются органогенные элементы питания — калий (4.5) и фосфор (7.6). Скорость круговорота остальных элементов минерального питания исчисляются десятками лет. В целом в соответствии с классификацией Л.Е. Родина, Н.П. Базилевич (1965) круговорот элементов в системе почва—фитоценоз в ельнике старовозрастном долгомошно-сфагновом может быть охарактеризован как азотно-калиево-кальциевый, низкозольный, малопродуктивный, сильнозаторможенный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Д.П., Пугачев А.А. Трансформация растительного опада в почвах Охотской горной провинции // Экология. 1983. № 2. С. 8–13.
- Андреанова О.В. Особенности биологического круговорота химических элементов в елово-пихтовых лесах Республики Марий Эл: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.32. Йошкар-ола: Марийский государственный университет, 2001. 161 с.
- Арчегова И.Б., Заболоцкая Т.Г., Кононеко А.В., Русанова Г.В., Слобода А.В., Юдинцева И.И. Продуктивность и круговорот элементов в фитоценозах Севера. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1975. 130 с.
- Атлас Коми АССР. М.: ГУГК, 1964. 112 с.
- Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г. В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар: КРТ, 2010. 365 с.
- Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность и компоненты баланса углерода в заболоченных коренных ельниках Севера // Лесоведение. 2007. № 6. С. 45–54.
- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность лесов // Леса Республики Коми. М.: Дизайн. Информация. Картография, 1999. С. 40–54.
- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
- Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках ельников средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С. 44–54. DOI: 10.1134/S1995425512070037
- Бобкова К.С., Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. Круговорот элементов минерального питания в экосистеме коренного разнотравно-черничного ельника средней тайги (Республика Коми) // Сибирский лесной журнал. 2020. № 2. С. 40–54. DOI: 10.15372/SJFS20200205
- Вакуров А.Д., Полякова А.Ф. Круговорот азота и минеральных элементов в низкопродуктивных ельниках северной тайги // Круговорот химических веществ в лесу. М.: Наука, 1982. С. 20–43.
- Ведрова Э.Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
- Гришина Л.А. Биологический круговорот и его роль в почвообразовании: курс лекций. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 128 с.
- Грозовская И.С., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э., Бобровский М.В., Романов М.С., Глухова Е.М. Биомасса напочвенного покрова в еловых лесах Костромской области // Лесоведение. 2015. № 1. С. 63–76.
- Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1975. 344 с.
- Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
- Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Пройслер Т., Кеннел М., Гитл Г., Гончарук Н.Ю., Минаева Т.Ю. Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков // Лесоведение. 1998. № 1. С. 50–60.
- Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Надпорожская М.А., Зубкова Е.В., Абакумов Е.В. и др. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. 408 с.
- Лесотаксационный справочник для Северо-Востока европейской части СССР. Архангельск: АИЛИЛХ, 1986. 357 с.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с. Ч. 2. 192 с.
- Манаков К.Н., Никонов В.В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука, 1981. 196 с.
- Матвеев А.М., Матвеева Т.А. Задержание осадков кронами древесных пород // Успехи современного естествознания. 2014. № 5 (ч. 1). С. 220–223.
- Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль, 1978. 182 с.
- 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.
- Никонов В.В., Лукина Н.В. Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 315 с.
- Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Орлов А.Я. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможностей учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы // Лесоведение. 1967. № 16. С. 64–69.
- Паршевников А.Л. Биологический 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, 1962. Т. 52. С. 196–209.
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

- Ремезов Н.П., Быкова Л.Н., Смирнова К.М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М.: Издательство Моск. ун-та, 1959. 284 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: АН СССР, 1968. 144 с.
- Руднева Е.Н., Тонконогов В.Д., Дорохова К.Я. Круговорот зольных элементов и азота в ельнике-зеленомошнике северной тайги бассейна р. Мезень // Почвоведение. 1996. № 3. С. 14–26.
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 635 с.
- Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // Итоги науки и техники. Лесоведение и лесоводство. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1975. С. 9–189.
- Ушакова Г.И. Биогеохимическая миграция элементов и почвообразование в лесах Кольского полуострова. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 150 с.
- Федоров С.Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 264 с.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling. Ecological Modelling. 2001. V. 138. № 1–3. P. 289–308.
- Dahlman K.C., Kuceera C.L. Root Productivity and Turnover in Native Prairie // Ecology. 1965. V. 46. P. 40–48.
- Filipiak M. Nutrient Dynamics in Decomposing Dead Wood in the Context of Wood Eater Requirement: The Ecological Stoichiometry of Saproxylophagous Insects // Saproxylic Insects. 2018. P. 429–469.
DOI: 10.1007 / 978-3-319-75937-1_13
- 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. № 1–2. P. 80–87.
- Holub S.M., Lajtha K., Spears J.D.H. A reanalysis of nutrient dynamics in coniferous coarse woody debris // Canadian Journal of Forest Research. 2001. V. 31. P. 1894–1902.
DOI: 10.1139/x01-125
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD2 — a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. Ecological Modelling. 2003. V. 170. № 2–3. P. 373–392.
- Lindroos A.-J., Derome J., Derome K., Niska K. “Deposition,” in Forest Condition Monitoring in Finland (National Report 1999): The Finnish Forest Research Institute, research papers. № 782. 2000. P. 61–69.

The Nutrient Cycle in Indigenous Polytrich-Sphagnum Spruce Forests of Komi Republic

K. S. Bobkova^{1, *}, N. V. Likhanova²

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st. 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation*

²*Botanical garden of Syktyvkar State University, Oktyabrsky ave. 55, Syktyvkar, Komi Republic, 167001 Russian Federation*

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

The paper presents materials that showcase the local cycle of chemical elements in the soil-phytocenosis system of a mature middle taiga polytrich-sphagnum spruce forest on hydromorphic podzolic soils. The structure of organic and mineral matter of plants of different tiers is also presented here. The work also provides a concept for the nitrogen and ash elements migration in the process of phytomass forming and their influx with plant litter. The main role in the structural composition of annual production of organic matter and litter in the ecosystem of an old-growth spruce forest is played by the forest stand. It was established that 1329.84 kg ha⁻¹ of mineral nutrition elements accumulate in plant phytomass. N, Ca, and K are characterized by a greater accumulation capacity. Spruce forest plants remove 136.18 kg ha⁻¹ of mineral nutrition elements from soils with annual production. With annual litter, 107.00 kg ha⁻¹ of nitrogen and ash elements get back to the soil, of which 37.0 kg ha⁻¹ are released in the process of plant litter destruction. The main accumulator of nutrients is the organic soil horizon, where 2421.79 kg ha⁻¹ of chemical elements are concentrated. With atmospheric precipitation, 22.6 kg ha⁻¹ of nitrogen and ash elements enter the soil during the year. It has been shown that the rate of mineral elements leaching beyond the root layer (0–40 cm) with surface waters is 71.78 kg ha⁻¹ per year.

Keywords: North of Russia, middle taiga, spruce forest, phytomass, production, litter, nitrogen, ash elements, elements cycle, atmospheric precipitation, soil water.

REFERENCES

- Andreev D.P., Pugachev A.A., Transformatsiya rastitel'no-go opada v pochvakh Okhotskoi gornoj provintsii (Transformation of plant litter in the soils of the Okhotsk mountain province), *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 1983, No. 2, pp. 8–13.
- Andrianova O.V., *Osobennosti biologicheskogo krugovorota khimicheskikh elementov v elovo-pikhtovykh lesakh Respubliki Marii El. Diss. kand. biol. nauk* (Features of the biological cycle of chemical elements in spruce-fir forests of the Republic of Mari El. Candidate's biol. sci. thesis), Yoshkar Ola: Mariiskii gosudarstvennyi universitet, 2001, 161 p.
- Arhegova I.B., Zabolotskaya T.G., Kononeko A.V., Rusanova G.V., Sloboda A.V., Yudinseva I.I., *Produktivnost' i krugovorot elementov v fitotsenozakh Severa* (Productivity and cycle of elements in the phytocenoses of the North), Leningrad: Nauka, Leningradskoe otделение, 1975, 130 p.
- Atlas Komi ASSR* (Atlas of Komi Autonomous Soviet Socialist Republic), Moscow: GUGK, 1964, 112 p.
- Atlas pochv Respubliki Komi* (Soil atlas of the Komi Republic), Syktyvkar: KRT, 2010, 365 p.
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Bioticheskii krugovorot na pyati kontinentakh: azot i zol'nye elementy v prirodnykh nazemnykh ekosistemakh (Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008, 380 p.
- Bobkova K.S., Biologicheskaya produktivnost' i komponenty balansa ugleroda v zabolochennykh korennykh el'nikakh Severa (The biological productivity and components of the carbon budget in waterlogged native spruce forests in the North), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 45–54.
- Bobkova K.S., *Biologicheskaya produktivnost' khvoinykh lesov evropeiskogo Severo-Vostoka* (Biological productivity of coniferous forests of European North-East), Leningrad: Nauka, 1987, 156 p.
- Bobkova K.S., Biologicheskaya produktivnost' lesov (Bioproductivity of forests), In: *Lesy Respubliki Komi* (Forests of the Komi Republic), Moscow: Dizain. Informatsiya. Kartografiya, 1999, pp. 40–54.
- Bobkova K.S., Likhanova N.V., Removal of carbon and mineral nutrients upon clear felling of spruce forests in the middle taiga (Losses of carbon and mineral nutrients in clear cuttings of spruce forests in the Middle Taiga), *Contemporary Problems of Ecology*, 2012, Vol. 5, No. 7, pp. 633–644.
- Bobkova K.S., Robakidze E.A., Torlopova N.V., Krugovorot elementov mineral'nogo pitaniya v ekosisteme korenного raznotravno-chernichnogo el'nika srednei taigi (Respublika Komi) (Turnover of mineral elements in the ecosystem of native herbaceous-bilberry spruce forest in the middle taiga subzone (Komi Republic)), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2020, No. 2, pp. 40–54. DOI: 10.15372/SJFS20200205
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M., Bykhovets S.S., Zudin S.L., ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling, *Ecological Modelling*, 2001, Vol. 138, No. 1–3, pp. 289–308.
- Dahlman K.C., Kuceera C.L., Root Productivity and Turnover in Native Prairie, *Ecology*, 1965, Vol. 46, pp. 40–48.
- Fedorov S.F., *Issledovanie elementov vodnogo balansa v lesnoi zone Evropeiskoi territorii SSSR* (Study of water balance elements in the forest zone of the European territory of the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 264 p.
- Filipiak M., Nutrient Dynamics in Decomposing Dead Wood in the Context of Wood Eater Requirement: The Ecological Stoichiometry of Saprophylophagous Insects, In: *Saprophylic Insects*, 2018, pp. 429–469. DOI: 10.1007 / 978-3-319-75937-1_13
- Grishina L.A., Biologicheskii krugovorot i ego rol' v pochvoobrazovanii (Biological cycle: the role in soil formation), Moscow: Izd-vo MGU, 1974, 128 p.
- Grozovskaya I.S., Khanina L.G., Smirnov V.E., Bobrovskii M.V., Romanov M.S., Glukhova E.M., Biomassa napochvennogo pokrova v elovykh lesakh Kostromskoi oblasti (The ground cover biomass of a spruce forest in Kostroma oblast), *Lesovedenie*, 2015, No. 1, pp. 63–76.
- 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, Vol. 4, No. 1–2, pp. 80–87.
- Holub S.M., Lajtha K., Spears J.D.H., A reanalysis of nutrient dynamics in coniferous coarse woody debris, *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, Vol. 31, pp. 1894–1902. DOI: 10.1139/x01-125
- Karpachevskii L.O., Zubkova T.A., Proisler T., Kennel M., Gitl G., Gorcharuk N.Y., Minaeva T.Y., Vozdeistvie pologa el'nika slozhnogo na khimicheskii sostav osadkov (Effect of compound spruce canopy on the chemical composition of sediments), *Lesovedenie*, 1998, No. 1, pp. 50–59.
- Kazimirov N.I., Morozova R.M., *Biologicheskii krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii* (Biological cycle of matter in the spruce forests of Karelia), Leningrad: Nauka, 1973, 175 p.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Nadporozhskaya A.S., Pripitina I.V., Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh (Modeling the dynamics of organic matter in forest ecosystems), Moscow: Nauka, 2007, 380 p.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V., EFIMOD2 — a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, No. 2–3, pp. 373–392.
- Lesotaksatsionnyi spravochnik dlya Severo-Vostoka evropeiskoi chasti SSSR (normativnye materialy dlya Arkhangel'skoi, Vologodskoi oblastei i Komi ASSR)* (Reference book on forest taxation for the northeast of the European part of the USSR (standard manual for Arkhangelsk, Vologda Oblasts and Komi ASSR)), Arkhangelsk: Izd-vo AILILKh, 1986, 358 p.
- Lindroos A.-J., Derome J., Derome K., Niska K., "Deposition" in Forest Condition Monitoring in Finland (National Report 1999), The Finnish Forest Research Institute, research papers, No. 782, 2000, pp. 61–69.
- Lukina N.V., Nikonov V.V., Biogeokhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennoho zagryazneniya (Biogeochemical cycles in the Northern forests subjected to air pollution), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1996, Part 1, 213 p., Part 2, 192 p.
- Manakov K.N., Nikonov V.V., Biologicheskii krugovorot mineral'nykh elementov i pochvoobrazovanie v el'nikakh Krainego Severa (Biologic cycle of mineral elements and pedogenesis in spruce forest of the High Arctic), Leningrad: Nauka, 1981, 196 p.
- Matveev A.M., Matveeva T.A., Zaderzhanie osadkov kromami drevesnykh porod (Sediment retention by tree crowns), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2014, No. 5, (Part 1), pp. 220–223.

- Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnnykh zonakh* (Methods for studying the biological cycle in various natural zones), Moscow: Mysl', 1978, 183 p.
- Morozova R.M., Kulikova V.K., Rol' atmosferykh osadkov v krugovorote azota i zol'nykh elementov v elovykh lesakh Karelii (The role of atmospheric precipitation in the cycle of nitrogen and ash elements in the spruce forests of Karelia), *Pochvennye issledovaniya v Karelii*, 1974, pp. 143–149.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Biogeokhimicheskie funktsii lesov na severnom predele rasprostraneniya (Biogeochemical functions of forest on the northern limit), Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1994, 315 p.
- Odum E.P., Fundamentals of Ecology, Moscow: Mir, 1975, 740 p.
- Orlova A.Y., Metod opredeleniya massy kornei derev'ev v lesu i vozmozhnostei ucheta godichnogo prirosta organicheskoi massy v tolshche lesnoi pochvy (Method for determining the mass of tree roots in the forest and the possibility of taking into account the annual increase in organic mass in the forest soil), *Lesovedenie*, 1967, No. 16, pp. 64–69.
- Parshevnikov A.L., Biologicheskii krugovorot azota i zol'nykh elementov v svyazi so smenoi porod v lesakh srednei taigi (Cycles of nitrogen and mineral constituents associated to change of species in forests of middle taiga), In: *Tipy lesa i pochvy severnoi chasti Vologodskoi oblasti* (Forest types and soils of the northern Vologda Oblast), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962, pp. 196–209 (292 p.).
- Polevoi opredelitel' pochv Rossii* (Field guide to soils of Russia), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 182 p.
- Remezov N.P., Bykova L.N., Smirnova K.M., Potreblenie i krugovorot azota i zol'nykh elementov v lesakh Evropeiskoi chasti SSSR (Consumption and cycling of nitrogen and mineral constituents in forests of European part of the USSR), Moscow: Izd-vo MGU, 1959, 284 p.
- Robakidze E.A., Torlopova N.V., Bobkova K.S., Chemical composition of wet precipitation in old-growth middle taiga spruce stand, *Geochemistry International*, 2013, Vol. 51, No. 1, pp. 65–75.
- Robakidze E.A., Torlopova N.V., Bobkova K.S., Khimicheskii sostav snegovykh vod pod pologom starovozrastnykh elovykh drevostoev srednei taigi Respubliki Komi (Chemical composition of snow melt under the old-growth spruce stands in the typical taiga of Komi Republic), *Lesovedenie*, 2015, No. 6, pp. 458–469.
- Rodin L.E., Bazilevich N.I., Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara (Organic matter dynamics and biogeochemical cycles of mineral constituents and nitrogen across the dominant vegetation types around the world), Moscow–Leningrad: Nauka, 1965, 253 p.
- Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I., Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh (Methodic guidelines to studies of dynamics of biological cycle in phytocoenoses), Leningrad: Nauka, 1967, 143 p.
- Rudneva E.N., Tonkonogov V.D., Dorokhova K.Y., Krugovorot zol'nykh elementov i azota v el'nike-zelenomoshnike severnoi taigi basseina r. Mezen' (Cycle of ash elements and nitrogen in the spruce-green moss forest of the northern taiga of the Mezen River basin), *Pochvovedenie*, 1996, No. 3, pp. 14–26.
- Ushakova G.I., Biogeokhimicheskaya migratsiya elementov i pochvoobrazovanie v lesakh Kol'skogo poluostrova (Biogeochemical migration of elements and soil formation in forests of the Kola Peninsula), Apatity: KNTs RAN, 1997, 150 p.
- Usol'tsev V.A., Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoi Evrazii: metody, baza dannykh i ee prilozheniya (Biological production of the forests of Northern Eurasia: methods, database and applications), Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2007, 636 p.
- Utkin A.I., Biologicheskaya produktivnost' lesov (metody izucheniya i rezul'taty) (Bioproductivity in forests: methods and results of study), Moscow: Izd-vo VINITI, 1975, 190 p.
- Vakurov A.D., Polyakova A.F., Krugovorot azota i mineral'nykh elementov v nizkoproduktivnykh el'nikakh severnoi taigi (Cycle of nitrogen and mineral elements in low-productive spruce forests of the northern taiga), In: *Krugovorot khimicheskikh veshchestv v lesu* (Cycle of chemical substances in the forest), Moscow: Nauka, 1982, pp. 20–43.
- Vedrova E.F., Organic matter decomposition in forest litters, *Eurasian soil science*, 1997, Vol. 30, No. 2, pp. 216–223.
- Zaboeva I.V., Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR (Soils and land resources of Komi ASSR), Syktyvkar: Komi knizhnoe izd-vo, 1975, 344 p.