

УДК 631.41

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344>

Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота

© 2025 Е. А. Головацкая , Л. Г. Никонова

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

Цель исследования. Оценка влияния типа растительного опада на скорость трансформации органического вещества и высвобождения макро- и микроэлементов.

Место и время проведения. Исследования проводились в период с 2008 по 2012 гг. на территории олиготрофного болота «Бакчарское» (Бакчарский р-н Томской области) в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе (Низкий рям) (56°58'34,10" с.ш., 82°36'27,48" в.д.).

Методы. Определение скорости разложения растительных остатков выполнили методом закладки растительности в торф. В исходных образцах и после эксперимента определили зольность, содержание углерода и азота. Элементный состав золы растительных остатков изучили с использованием электронного микроскопа HITACHI-S-3400N с рентгеноспектральным анализатором.

Основные результаты. Оценка изменения массы исследуемых растительных образцов показала, что наиболее интенсивно процессы разложения шли на начальном этапе (в течение первых 12 месяцев), затем скорость значительно снизилась. В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, шла иммобилизация азота во всех исследуемых образцах растений. Однако к концу эксперимента фиксировали потери азота во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*, для которого установлено увеличение содержания азота на 5%. В результате минерализации органического вещества растительного опада снизилась зольность, также за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено незначительное увеличение зольности (в 1,1 раза). В состав золы исследуемых растений входит ряд элементов – К, Са, Р, Mg, Al, Si, S, Fe и др., при этом наибольшую роль играют К и Са. В процессе разложения произошло резкое снижение содержания калия (в 1,6–7,9 раз) и кальция (в 2,2–7,1 раз) во всех образцах, за исключением *Sph. fuscum*. Также для всех образцов характерно накопление железа, алюминия и кремния; содержание фосфора увеличивается во всех образцах, за исключением *Sph. fuscum*.

Заключение. В процессе разложения произошла потеря углерода во всех растительных остатках, при этом динамика потерь строго соответствовала снижению массы органического вещества; во всех образцах (за исключением *Sph. fuscum*) наблюдается вынос азота. Выявлено, что зольность растительных остатков снизилась в 1,2–1,9 раза, за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено небольшое увеличение зольности, что может быть связано с накоплением зольных элементов в растительных остатках *Sph. fuscum* в сочетании с низкой скоростью потери массы органического вещества. В процессе разложения растительных остатков установлено выщелачивание калия, кальция и накопление Fe, Al, Si, P во всех исследуемых образцах. Таким образом, выявленные особенности динамики элементного состава растительных остатков позволили установить специфический ход разложения для каждого из основных видов растений торфообразователей сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза Бакчарского болота.

Ключевые слова: торфяники; растения-торфообразователи; Западная Сибирь; скорость разложения; химический состав.

Цитирование: Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e344. DOI: [10.31251/pos.v8i4.344](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344)

ВВЕДЕНИЕ

Болотные экосистемы играют важнейшую биосферную роль за счет способности постоянно накапливать углерод в виде торфяных залежей. Накопление органического вещества торфа происходит в результате превышения скорости его образования над деструкцией органического вещества растительных остатков. Биогеохимические циклы олиготрофных болот, в отличие от других экосистем, в силу особенностей водно-минерального питания слабо связаны с минеральными горизонтами, грунтовыми водами и окружающими ландшафтами, так как основная часть микр- и макроэлементов поступает в результате атмосферного выпадения (Веретенникова, Головацкая, 2012; Татаринцева и др., 2022). Растительный опад является важным источником энергии и питательных веществ в экосистемах, поэтому его разложение обуславливает один из основных потоков углерода (С) в атмосферу, а также приводит к изменению концентрации химических элементов (источником

трансформации, модификации, преобразования) в экосистемах (Berg, 2014). Следовательно, разложение опада представляется важным процессом в функционировании естественной экосистемы и способствует высвобождению или накоплению химических элементов (Shcherbov, Lazareva, 2010; Jonczak, 2013; Berg, 2014). Скорость разложения растительного опада определяется, в основном, тремя факторами: 1) климатом – чем теплее и влажнее условия, тем активнее протекает процесс разложения 2) качеством опада, например, чем выше содержание азота (N), тем интенсивнее разложение, и 3) видовым составом и численностью микроорганизмов-деструкторов (Козловская и др., 1978; Денисенков, 2000). Круговорот питательных веществ в экосистеме зависит от видового состава растений, поглощения и использования ими питательных веществ, количества и химического состава опада и взаимодействия с ризосферой, а также изменений в окружающей среде (Hättenschwiler et al., 2005). При изменении климатических условий или антропогенном воздействии меняется гидротермический режим болот вместе с изменением биогеохимических циклов, поскольку потепление и понижение уровня болотных вод стимулируют разложение органического вещества и, как следствие, увеличение выбросов CO₂ в атмосферу.

В связи с вышесказанным, целью работы являлась оценка влияния типа растительного опада на скорость трансформации органического вещества и высвобождения макро- и микроэлементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на территории олиготрофного болота «Бакчарское» (Бакчарский р-н Томской области) в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе (Низкий рям) (56°58'34,10" с.ш., 82°36'27,48" в.д.). Растительность представлена типичными видами-доминантами рямов: древесный ярус – *Pinus sylvestris* f. *Litwinowii* (**проективное покрытие (п.п.)** яруса 30%), кустарнички – *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L. (п.п. – 65%), травы – *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L., *Drosera rotundifolia* L. (п.п. – 5%), сфагновые мхи – *Sphagnum fuscum* (Schmp.) Klinggr., *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum magellanicum* Brid. (п.п. – 95%). Мощность торфяной залежи низкого рьяма достигает 200 см. В основании залежи лежит слой хорошо разложившегося древесно-хвощового и древесного (березового) торфа (170–200 см), который перекрывает мощный слой переходного торфа двух видов – древесно-осокового и древесно-сфагнового (100–170 см). Выше находится слой (0–100 см), состоящий из магелланикум-торфа со средней степенью разложения и фускум-торфа с низкой степенью разложения.

По данным метеостанции «Бакчар» за период с 1991 по 2020 гг, среднегодовая температура исследуемой территории составляет +0,5°C, среднегодовое количество осадков 497 мм. Средние температуры воздуха января и июля: -18,8°C и +18,2°C, соответственно. Продолжительность бесснежного периода 178 ± 9 дней (Всероссийский научно-исследовательский ..., 2021). Максимальный уровень болотных вод в условиях низкого рьяма Бакчарского болота достигает +1 см (в период снеготаяния), в среднем держится отметки -9,5 см относительно средней поверхности болота.

Для определения интенсивности трансформации растительных остатков применяли метод закладки растительности в торф (Козловская и др., 1978; Головацкая, Никонова, 2017; Головацкая, Никонова, 2024). В августе–сентябре 2008 г. на болоте были собраны растения доминанты сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза: *Sphagnum fuscum*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Pinus sylvestris*, *Rubus chamaemorus*. Растительный материал был высушен в лабораторных условиях и развешен в мешочки из синтетического материала (масса навески составляла 3–6 г). Образцы закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в конце вегетационного периода (сентябрь 2008 г.). Исследование проводили в трехкратной повторности, всего было заложено 72 образца (по 12 образцов каждого вида). Для закладки выбирали участки с относительно равномерным растительным покровом и микрорельефом. Было выбрано четыре участка с выравненной поверхностью площадью по 0,5×0,5 м. Расстояние между участками составляло 1,5–2 м. Образцы извлекали через 12, 24, 36, 48 месяцев и определяли в них убыль массы растительного вещества весовым методом.

В исходных образцах и после эксперимента определяли зольность, содержание углерода и азота. Определение зольности проводили по ГОСТ 11306-83, содержание углерода и азота – в соответствии с (Пономарева, Плотникова, 1975; Воробьева, 2006). Элементный состав золы растительных остатков определяли с использованием электронного микроскопа HITACHI-S-3400N с рентгеноспектральным анализатором.

После инкубирования в торфяной залежи растительные образцы извлекали и высушивали до воздушно-сухого веса, далее производили расчет потерь массы, в % от исходного веса образца, по следующей формуле:

$$\text{Потери массы (\%)} = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

где M_0 – вес исходного образца, M_t – вес оставшегося образца через 12, 24, 36, 48 месяцев.

Для каждого образца после инкубирования рассчитывали изменение содержания углерода, азота и зольных элементов как процент от их исходного содержания:

$$\text{Потери элемента (\%)} = \frac{(X_0 \times M_0 - X_t \times M_t)}{X_0 \times M_0} \times 100 \quad (2)$$

где X_0 – исходное содержание элемента (мг/г), X_t – содержание элемента через 1, 2, 3, 4 года.

Для определения скорости разложения растительных остатков использовали экспоненциальное уравнение (Olson, 1963):

$$\frac{M_t}{M_0} = e^{-kt} \quad (3)$$

и рассчитывали константу разложения:

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{M_t}{M_0}\right)}{t} \quad (4)$$

где M_t – оставшаяся масса после разложения, M_0 – масса исходного образца, t – время разложения, год.

Статистическую обработку данных (расчет средних значений, стандартного отклонения, коэффициентов корреляции) осуществляли с помощью программ Excel и Statistica. Достоверность различий скорости трансформации между разными видами растений-торфообразователей оценивали по критерию Стьюдента, при уровне значимости 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка изменения массы исследуемых растительных образцов показала, что наиболее интенсивные процессы разложения протекают на начальном его этапе (в течении первых 12 месяцев); затем скорость разложения значительно снижается, в течение 2 года наблюдается снижение интенсивности процесса в 1,5 (*Chamaedaphne calyculata*) – 6,5 (*Sphagnum fuscum*) раза. Наиболее устойчив к разложению *Sphagnum fuscum*: суммарные потери его массы за 4 года составляют около 12%; наименее устойчив *Rubus chamaemorus*, потери массы – 77% (рис. 1). Потери массы кустарничков и сосны – от 50 до 65%.

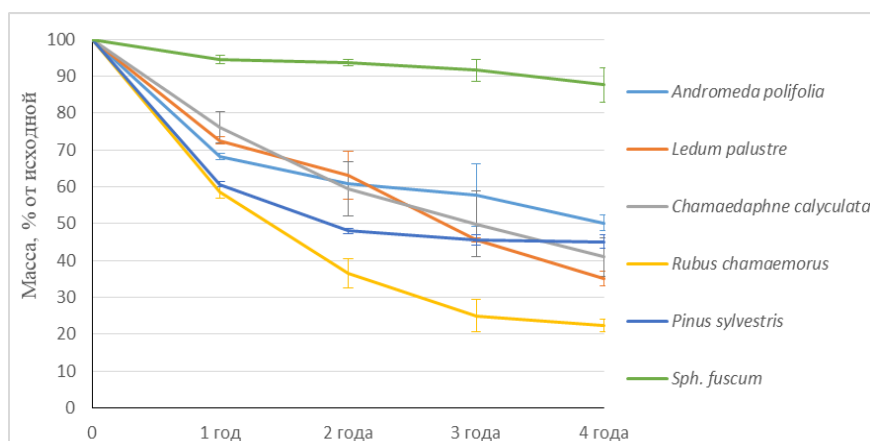


Рисунок 1. Потери массы при разложении растений-торфообразователей. На рисунке представлены среднее значение и стандартное отклонение (вертикальные планки).

Результаты t-теста показали, что средние потери массы достоверно различаются для кустарничков и *Rubus chamaemorus* ($t = 4,78$, $p < 0,008$), для кустарничков и *Sphagnum fuscum* ($t = 14,91$, $p < 0,0003$). Также достоверные различия потери массы получены для *Rubus chamaemorus* и *Sphagnum fuscum* ($t = 6,74$, $p < 0,0002$). Для кустарничков средние значения потери массы достоверно не различаются.

Динамика выноса углерода (рис. 2) из растительных остатков растений-торфообразователей, в целом, соответствует динамике потери массы; средние потери углерода за 4 года для сосудистых растений составляют 63%, для *Sphagnum fuscum* – 12,5%.

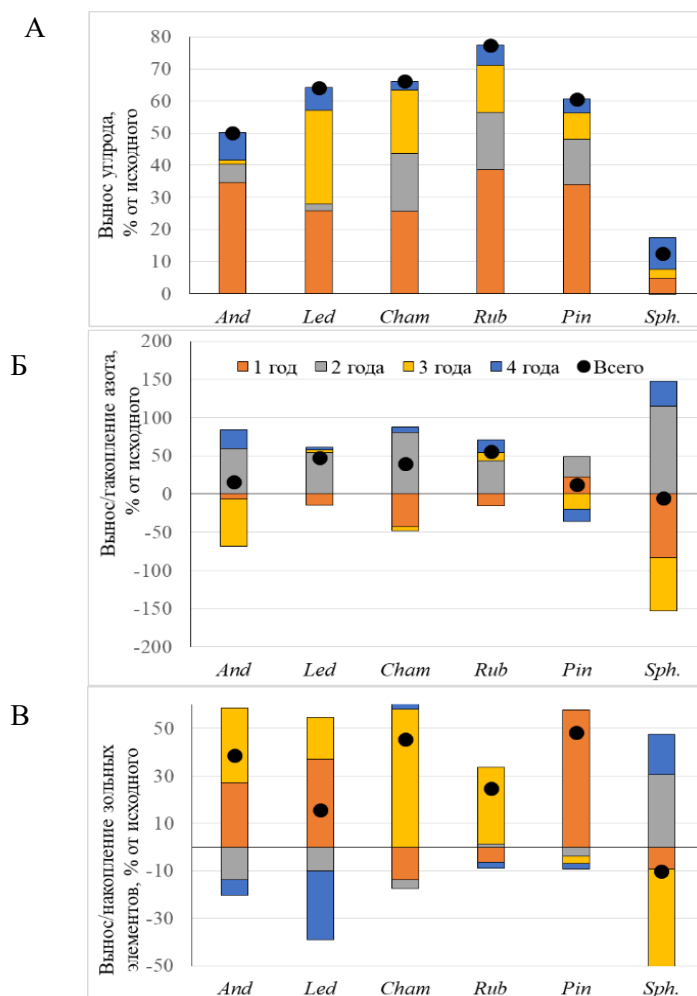


Рисунок 2. Изменение содержания общего углерода (А) и азота (Б), зольности (В) в растительных образцах в процессе трансформации (отрицательные значения означают накопление элементов в образцах).

В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, наблюдали увеличение концентрации азота во всех исследуемых образцах растений – от 7% (*Andromeda polifolia*) до 83% (*Sphagnum fuscum*) от исходного содержания, за исключением *Pinus sylvestris*, в образцах которого содержание азота снизилось на 22% (см. рис. 2). Однако к концу эксперимента потери азота составили от 13 (*Pinus sylvestris*) до 55% (*Rubus chamaemorus*) от исходного количества; только для *Sphagnum fuscum* получено увеличение содержания азота на 5%. В результате минерализации органического вещества растительного опада изменяется и зольность (см. рис. 2). Во всех образцах к концу эксперимента зольность снизилась в 1,2–1,9 раза по сравнению с исходными значениями, за исключением *Sphagnum fuscum*, у которого произошло незначительное увеличение зольности (в 1,1 раза).

В состав золы исследуемых растений входит ряд элементов – К, Са, Р, Mg, Al, Si, S, Fe и др., при этом наибольшую роль играют К и Са. Состав золы *Sphagnum fuscum* отличается довольно высоким содержанием Si и Fe (рис. 3). Содержание зольных элементов в процессе разложения изменилось, и к концу четвертого года произошло резкое снижение содержания калия (в 1,6–7,9 раз) и кальция (в 2,2–7,1 раз) во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*, у которого содержание калия уменьшилось, а содержание кальция увеличилось в 1,4 раза относительно исходного содержания (рис. 4). Также для всех образцов характерно накопление железа, алюминия и кремния; содержание фосфора увеличилось во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*.

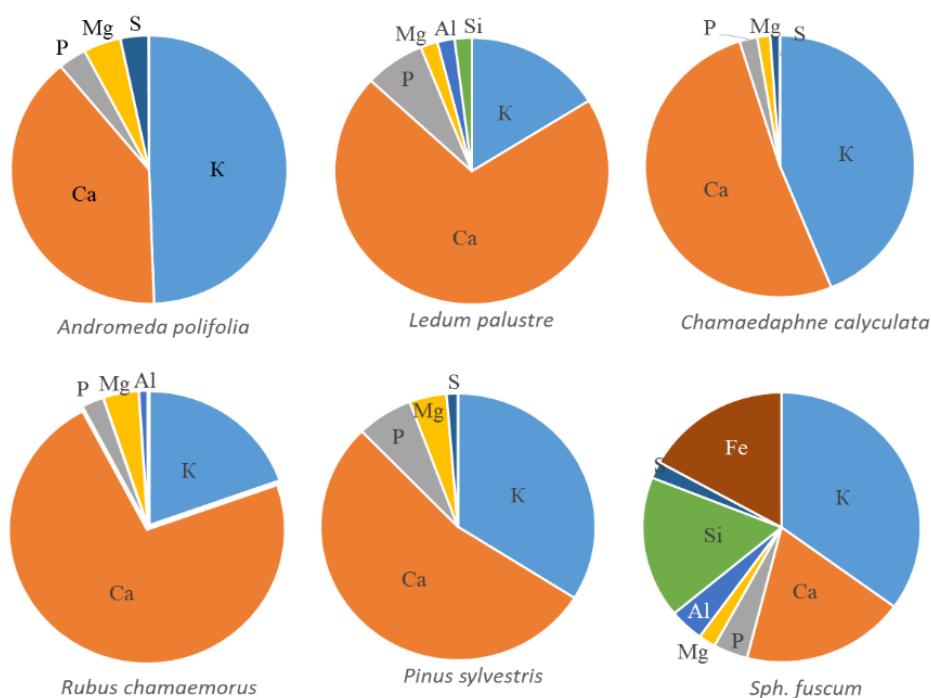


Рисунок 3. Элементный состав золы растений-торфообразователей.

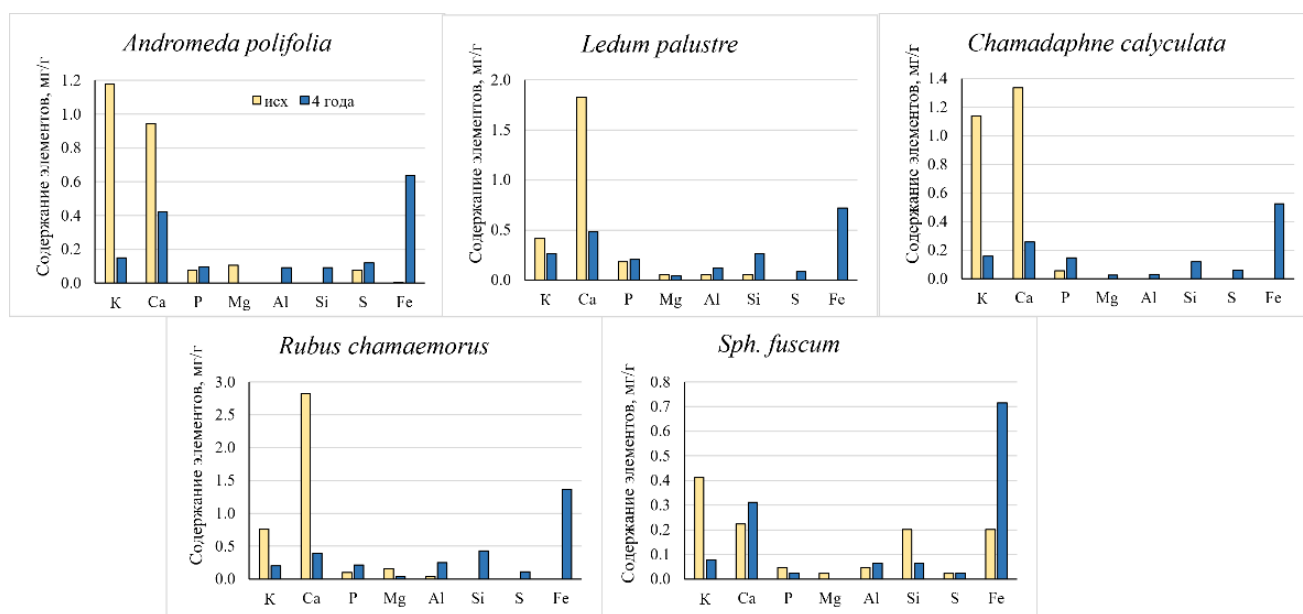


Рисунок 4. Изменение состава золы в процессе трансформации растений-торфообразователей.

Динамика нормализованных концентраций элементов (концентрация любого элемента равна 100% в нулевой момент времени) в процессе разложения показана на рисунке 5. Во всех образцах общей тенденцией является выщелачивание K ($p < 0,001$) и Ca ($p < 0,05$); исключение составляют образцы *Sphagnum fuscum*, где происходит накопление кальция. Накопление Mg произошло в образцах *Chamaedaphne calyculata*, для остальных видов торфообразователей характерно снижение концентрации магния. В целом можно отметить увеличение концентрации фосфора в образцах кустарничков и *Rubus chamaemorus* и снижение его содержания в образцах *Sphagnum fuscum*. Для всех образцов характерно накопление железа. Возможно, это связано с тем, что исследуемое болото находится на территории Бакcharского железорудного месторождения.

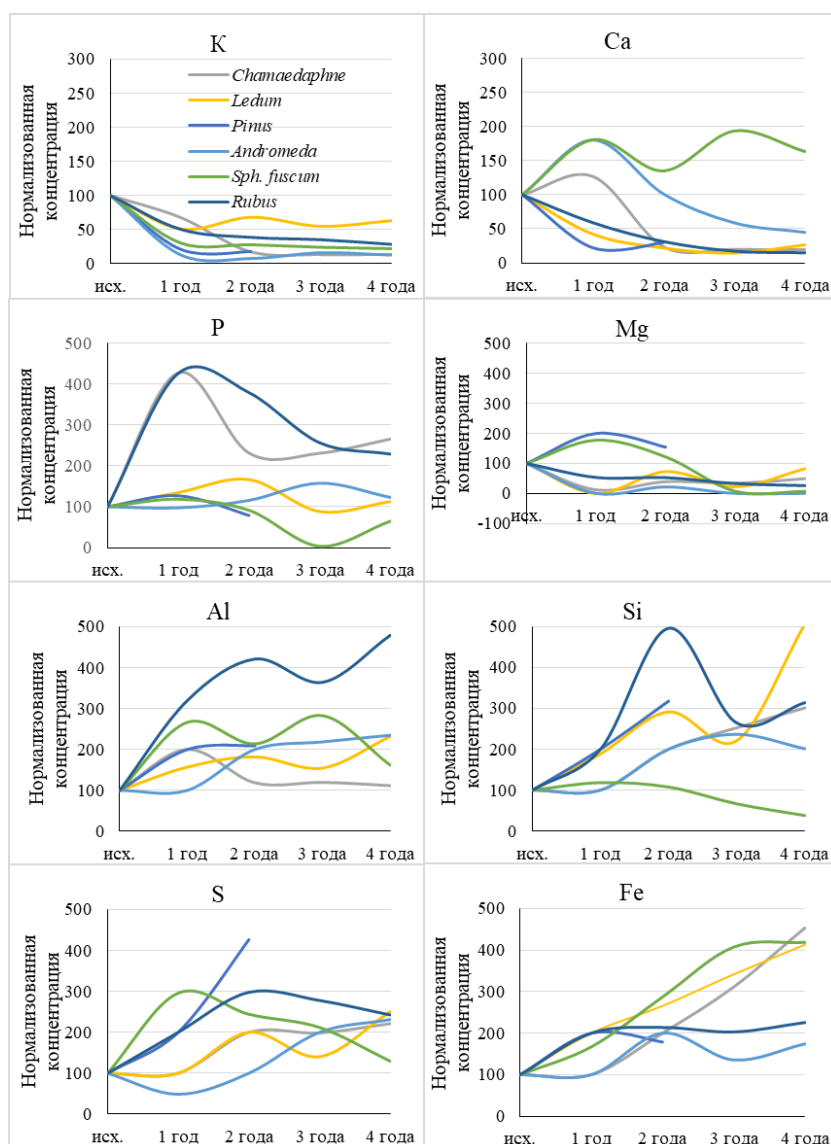


Рисунок 5. Нормализованные концентрации химических элементов (концентрация любого элемента равна 100% в нулевой момент времени) в процессе разложения растительных остатков.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные растительные образцы отличались по химическому составу (табл. 1). Самым низким содержанием углерода, азота, и самым высоким соотношением C/N (85) характеризуется сфагновый мох, он же является и самым низкзольным. Для кустарничков и сосны установлено самое высокое содержание общего углерода и общего азота, относительно низкое отношение C/N; сосна отличается наибольшей зольностью. Наиболее благоприятными характеристиками для микроорганизмов-деструкторов обладают листья морошки: высокое содержание углерода и азота, наименьшее значение C/N. Ранее было показано, что скорость разложения во многом определяется видом растительного опада (а именно, его химическим составом) (Никонова и др., 2019).

Регрессионный анализ подтвердил зависимость скорости разложения растительных остатков от исходного содержания азота и отношения C/N: коэффициент детерминации (R^2) равен 0,72 и 0,79, соответственно (рис. 6), зависимость скорости разложения от содержания углерода и зольных элементов статистически незначима. Опад, характеризующийся высоким соотношением C/N, слабо перерабатывается микроорганизмами, тогда как при соотношении C/N в пределах 20-30, опад является наиболее благоприятным для микроорганизмов-деструкторов (Козловская и др., 1978; Bragazza et al., 2007). Кроме того, соотношение C/N определяет доступность опада не только микроорганизмам, но и почвенным беспозвоночным (Мишустин, 1975; Лиштван, 1989; Физикохимия и биология ..., 2013; Soong et al., 2016). Чем уже соотношение C/N, тем выше суммарная численность микроорганизмов и активнее идут процессы трансформации органического вещества. Наименьшая микробиологическая

активность и, соответственно, скорость трансформации органического вещества была отмечена для растительных остатков *Sphagnum fuscum*, характеризующихся максимально широким среди исследованных растений соотношением C/N (Никонова и др., 2017, Nikonova et al., 2020).

Таблица 1

Химический состав исходных растений-торфообразователей

Вид растения	Содержание элементов, %			C/N
	Углерод	Азот	Зольность	
<i>Sphagnum fuscum</i>	39,3±0,11	0,46±0,02	1,2±0,00	85
<i>Andromeda polifolia</i>	49,5±0,14	1,15±0,01	2,62±0,03	33
<i>Ledum palustre</i>	50,3±0,31	1,27±0,01	2,61±0,03	39
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	50,3±0,13	1,38±0,02	2,53±0,01	37
<i>Pinus sylvestris</i>	48,63±0,30	1,15±0,01	4,01±0,02	42
<i>Rubus chamaemorus</i>	41,87±0,26	1,38±0,02	2,15±0,01	30

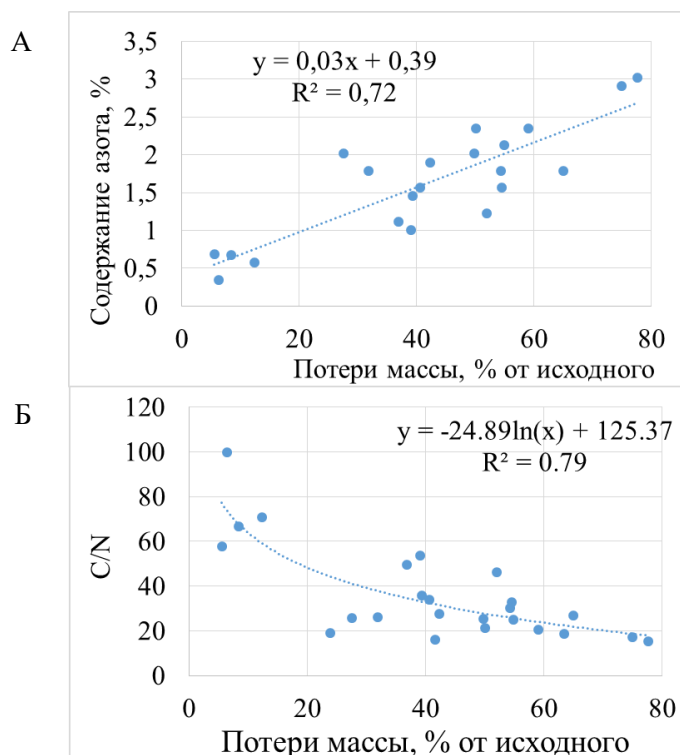


Рисунок 6. Зависимость скорости разложения растительных остатков от исходного содержания азота (А) и отношения C/N (Б).

Наиболее интенсивное разложение органического вещества происходит на первых этапах деструкции, что объясняется всплеском активности микроорганизмов в ответ на попадание свежего опада в торфяную залежь (Физикохимия и биология ..., 2013). В течение первого года эксперимента по оценке скорости трансформации растительных остатков наименьший коэффициент трансформации получен для *Sphagnum fuscum* (0,06), максимальный (0,54) для *Rubus chamaemorus* (табл. 2). В процессе трансформации растительных остатков происходит смена эвтрофного микробного сообщества на олиготрофное, увеличение коэффициентов олиготрофности и снижение коэффициента минерализации, что свидетельствует о замедлении скорости трансформации органического вещества растительных остатков (Никонова и др., 2017). К концу эксперимента скорость разложения снижается в 1,2–2,2 раза (см. табл. 2). При этом процесс трансформации растительных остатков протекает нелинейно и для некоторых видов, например, сфагновых мхов, практически прекращается через 15–50 лет (*Sphagnum fuscum*). Трансформация растительных остатков трав протекает значительно быстрее и уже через 15–20 лет опад трав разлагается практически полностью (рис. 7). Разложение листьев кустарничков занимает больше времени – процесс трансформации прекращается только через 20–60 лет в зависимости от вида кустарничков; оставшиеся в виде хорошо разложившего торфа растительные остатки листьев составляют менее 5%.

Таблица 2

Коэффициенты скорости разложения (k) органического вещества растений-торфообразователей

Вид растения	Коэффициент разложения			
	1 год	2 года	3 года	4 года
<i>Sphagnum fuscum</i>	0,06	0,03	0,03	0,03
<i>Andromeda polifolia</i>	0,38	0,25	0,19	0,17
<i>Ledum palustre</i>	0,38	0,25	0,19	0,17
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	0,27	0,26	0,24	0,22
<i>Pinus sylvestris</i>	0,50	0,37	0,26	0,20
<i>Rubus chamaemorus</i>	0,54	0,50	0,47	0,37

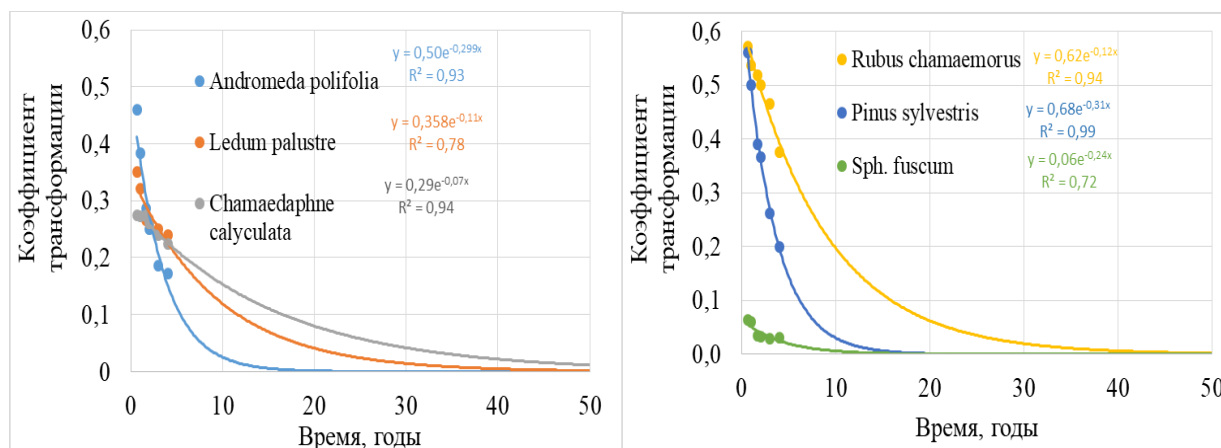


Рисунок 7. Изменение коэффициентов трансформации растительных остатков растений-торфообразователей в торфяных залежах. Линиями показан прогноз изменения коэффициента трансформации со временем.

Данные ботанического состава торфяной залежи и датирования верхних горизонтов торфа (рис. 8) подтверждают выводы о существенном снижении скорости трансформации растительных остатков сфагновых мхов со временем. Так, верхняя часть (0–60 см) торфяной залежи низкого яра сложена фускум-торфом со степенью разложения 5% при возрасте на глубине 50–60 см 230 лет. Растительные остатки трав в этих слоях торфа практически отсутствуют, содержание растительных остатков кустарничков составляют менее 5% (Головацкая, Никонова 2013, 2017).

В процессе разложения растительных остатков происходит вынос углерода и азота (Козловская и др., 1978; Бамбалов и др., 1990; Миронычева-Токарева, Вишнякова, 2004; Миронычева-Токарева и др., 2007; Паршина, 2009). И если содержание углерода в растительных образцах тесно связано с потерей массы органического вещества (коэффициент корреляции 0,97), то относительно динамики содержания азота в растительных остатках все не так однозначно. Как правило, в процессе деструкции органического вещества происходит снижение содержания общего азота в растительных образцах, однако в отдельных случаях может происходить и увеличение (иммобилизация) содержания азота в растительных остатках. Сведения о процессах накопления азота при деструкции растительных остатков встречаются в литературе, однако причины этого явления до конца еще не установлены. Предполагается, что на первых стадиях разложения может наблюдаться повышение концентрации азота в субстрате за счет деструкции безазотистых соединений, азотфиксации и потребления азота гифами грибов из почвы (Базилевич, Титлянова, 2008; Lindahl et al., 2007). Возможно, это может быть связано с вращением сапротрофных грибковых гиф, транспортирующих N из окружающей среды (Frey et al., 2000), а освобождение минерального азота начинается после достижения в разлагающемся материале критической концентрации азота (Trentbath, Diggle, 1997). Значительное увеличение содержания азота при разложении сфагновых мхов (почти в четыре раза) отмечается Л.С. Козловской с соавторами (1978), при более длительном процессе разложения содержание азота убывает. В то же время, согласно С.Г. Прокушкину с соавторами (2014), увеличение содержания азота не всегда сопровождается усилением минерализации, возможно этот процесс связан с образованием или наличием трудноразлагаемых азотсодержащих веществ, что как раз и может способствовать замедлению процесса минерализации. Величина иммобилизации N при разложении растительных остатков также может регулироваться начальной доступностью N в субстрате (растительных остатках),

поскольку микробы сталкиваются с острым дефицитом N (Manzoni et al., 2012; Bonanomi et al., 2017). В работе М. Mooshammer с соавторами (2012) показано наличие отрицательной связи между начальным содержанием N в подстилке и скоростью иммобилизации N. Нами также получена отрицательная зависимость между начальной концентрацией азота в растительных остатках и величиной выноса/накоплений азота в процессе трансформации (коэффициент корреляции $r = -0,84$).

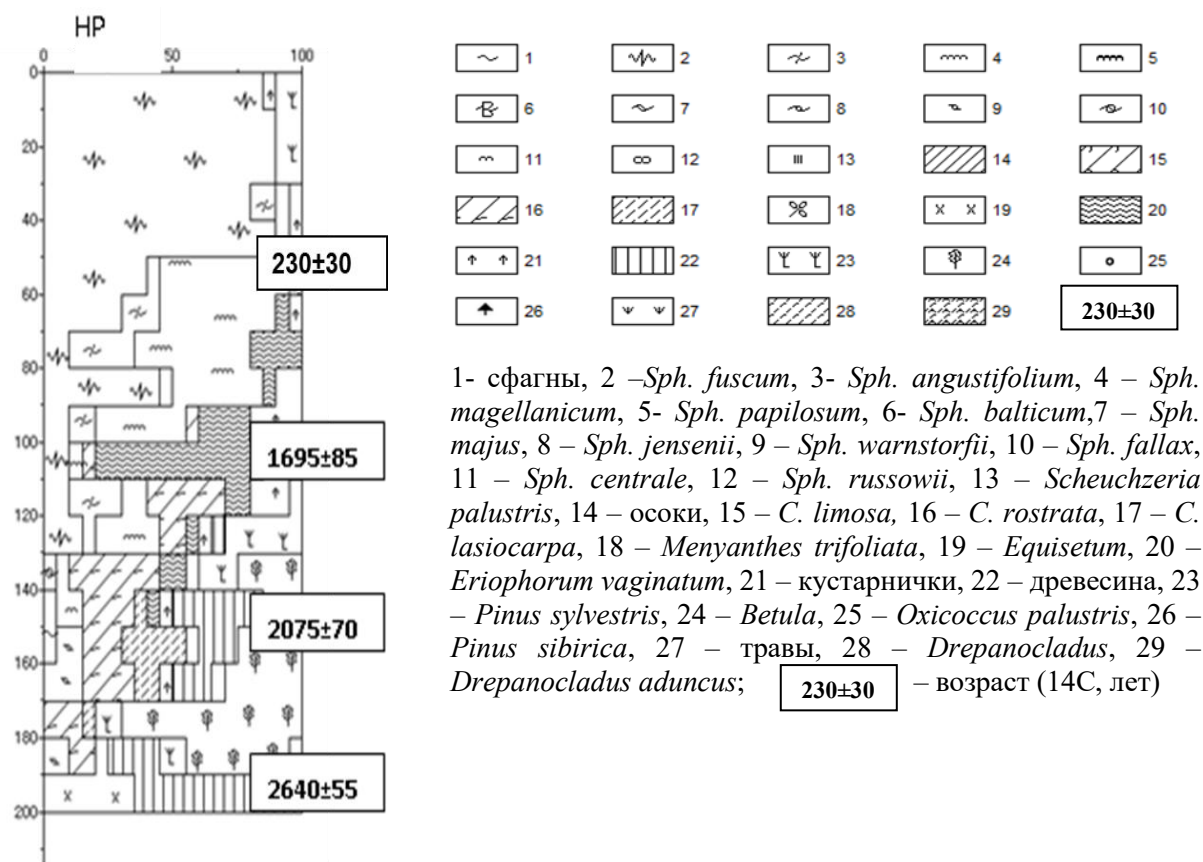


Рисунок 8. Строение торфяной залежи сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза (низкого яряма).

Калий является очень мобильным элементом и выщелачивался из исследуемых образцов с самого начала эксперимента. Магний относительно мобилен и его выщелачивание происходит примерно с той же скоростью, что и потеря массы органического вещества. Эти тенденции, а также увеличение содержания S и P, были, в основном, идентичны тем, что описаны ранее для опавшей хвои с разных видов деревьев (Berg, 2014). Накопление P в подстилках зафиксировано и в других исследованиях (Moore et al., 2011), что может быть связано с недостатком фосфора в исходных растительных остатках для обеспечения микробиологической активности (Manzoni et al., 2012; Mooshammer et al., 2012). В процессе разложения растительных остатков происходит накопление кремния, алюминия и железа; подобные данные получены при исследовании разложения растительных остатков в типичных тундровых фитоценозах Крайнего Северо-Востока Азии (Пугачев, Тихменев, 2017). Анализ зависимости изменения содержания химических элементов в растительных остатках от исходного состава растительных остатков (содержание углерода, азота, C/N, зольности) показал, что почти все элементы зависят от потери массы, за исключением Mg и Al, для которых не выявлено значимых зависимостей. Для калия, кальция и фосфора зависимость положительная, т.е. вместе с потерей массы происходит активное выщелачивание элементов, в то время как для кремния, серы и железа наблюдается отрицательная связь: с уменьшением массы происходит увеличение содержания этих элементов. Кроме того, выявлено, что динамика содержания фосфора, алюминия, кремния, серы и железа связана с содержанием азота в растительных остатках (табл. 3). Снижение зольности, в целом, коррелирует с изменением содержания химических элементов, о чем свидетельствуют полученные коэффициенты корреляции. Общее снижение зольности в процессе трансформации растительных остатков обусловлено выносом преобладающих в составе минеральной части элементов, таких как K,

Ca, Mg, но при этом может замедляться за счет аккумуляции Fe, S, Si, Al и P, а в некоторых случаях аккумуляция этих элементов может даже привести к увеличению зольности, например, в растительных остатках *Sphagnum fuscum* (см. рис. 2B).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона между элементным составом золы и свойствами растительных остатков

Элементы Параметры	K	Ca	P	Mg	Al	Si	S	Fe
Потери массы	0,52	0,47	-0,52			-0,38	-0,55	-0,51
Углерод			0,30					
Азот			0,70		0,50	0,42	0,47	0,43
C/N			-0,56					
Зольность	0,46	0,69	0,59	0,74	0,37	0,42	0,35	0,38

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали специфику процесса разложения шести видов растений–торфообразователей олиготрофного болота в нативных условиях. Каждый вид характеризуется своей динамикой скорости потери массы и изменения элементного состава. Скорость разложения растительных остатков зависит от исходного содержания в них азота и отношения C/N, при этом отношение C/N обычно является показателем доступности органического вещества для микроорганизмов–деструкторов: чем оно ниже, тем более доступны растительные остатки для микроорганизмов. Процесс трансформации растительных остатков протекает нелинейно и в зависимости от вида растений может практически прекращаться через 15–50 лет, либо в результате консервации (сфагновые мхи), либо в результате почти полного разложения (травы и листья кустарничков). Основным торфообразователем на исследуемых олиготрофных болотах являются сфагновые мхи, о чем также свидетельствует ботанический состав торфяной залежи.

В процессе разложения наблюдается вынос углерода во всех растительных остатках, при этом динамика выноса углерода строго соответствует потерям массы органического вещества; во всех образцах (за исключением *Sph. fuscum*) наблюдается вынос азота. Выявлено, что зольность растительных остатков снижается в 1,2–1,9 раз, за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено небольшое увеличение зольности, что может быть связано с накоплением зольных элементов в растительных остатках сфагнум фускум, в сочетании с низкой скоростью потери массы органического вещества. В процессе разложения растительных остатков происходит выщелачивание калия, кальция и накопление Fe, Al, Si, P во всех исследуемых образцах.

Таким образом, выявленные особенности динамики элементного состава при разложении растительных остатков позволили установить специфический ход деструкции для каждого вида растений торфообразователей сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза Бакчарского болота.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031300154-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биологический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / отв. ред. А.А. Тишков. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 381 с.
- Бамбалов Н.Н., Хоружик А.В., Лукашко Е.С., Стригутский В.П. Превращение отмерших растений в болотных биогеоценозах // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. Москва: Наука, 1990. С. 53–63.
- Веретенникова Е.Э., Головацкая Е.А. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Том 20. № 2. С. 181–187.
- Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс] <https://www.meteorf.ru> (дата обращения 20.09.2021).

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 3(23). С. 137–151.

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613. <https://doi.org/10.7868/80032180X17030030>

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Биогеохимическая трансформация органического вещества растений-торфообразователей в процессе разложения // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Седьмого международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 15–27 августа 2024 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2024. С. 110–112.

ГОСТ 11306-83. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Москва: Издательство стандартов, 1994. 7 с.

Денисенков В.П. Основы болотоведения: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство С.-Петерб. ун-та, 2000. 220 с.

Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука. Ленингр. отделение, 1978. 172 с.

Лиштван И.И. Физика и химия торфа: учебное пособие для вузов. Москва: Недра, 1989. 303 с.

Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. АН СССР. Ин-т микробиологии. Москва: Наука, 1975. 107 с.

Миронычева-Токарева Н.П., Вишнякова Е.К. Динамика разложения органического вещества на болотах различного генезиса // Болота и биосфера: Сборник материалов Третьей Научной школы; 400-летию города Томска посвящается (Томск, 13–16 сентября 2004 г.). Томск: Томский центр научно-технической информации, 2004. С. 23–30.

Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Компоненты углеродного баланса на болотах средней тайги и лесотундры Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Второго Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 24 августа – 02 сентября 2007 г.) / Под редакцией академика С.Э. Вомперского. Ханты-Мансийск: Издательство научно-технической литературы, 2007. С. 117–118.

Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жмурич В.А., Головацкая Е.А. Влияние абиотических факторов на разложение опада растений-торфообразователей в инкубационном эксперименте // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 46. С. 148–170. <https://doi.org/10.17223/19988591/46/8>

Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири. Автореферат диссертации... канд. биол. наук. Томск, 2009. 23 с.

Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Ленинград: Наука, 1975. 105 с.

Прокушкин С.Г., Прокушкин А.С., Сорокин Н.Д. Интенсивность разложения отдельных компонентов фитодетрита в листовничниках криолитозоны Средней Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2014. № 1. С. 76. <https://doi.org/10.7868/S0002332914010093>

Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Консервация растительного органического вещества и почвообразование в экосистемах зональных тундр Крайнего Северо-Востока Азии // Arctic Environmental Research. 2017. Том 17. № 3. С. 255–264. <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255>

Татаринцева В.Г., Котова Е.И., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 60–65. <https://doi.org/10.17513/use.37842>

Физикохимия и биология торфа. Методы оценки численности и разнообразия бактериальных и актиномицетных комплексов торфяных почв: учебное пособие / Т.Г. Добровольская и др.; науч. ред. Л.И. Инишева. Томск: Издательство Томского гос. пед. ун-та, 2010. 99 с.

Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>

Bonanomi G., Cesarano G., Gaglione S.A., Ippolito F., Sarker T., Rao M.A. Soil fertility promotes decomposition rate of nutrient poor, but not nutrient rich litter through nitrogen transfer // Plant and Soil. 2017. Vol. 412. P. 397–411. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3072-1>

- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: the role of microbial adaptability to litter chemistry // Soil Biology and Biochemistry. 2007. No. 39. No. 1. P. 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>
- Frey S.D., Elliott E.T., Paustian K., Peterson G.A. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem // Soil Biology and Biochemistry. 2000. Vol. 32. No. 5. P. 689–698. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00205-9)
- Jonczak J. Effect of peat samples drying on measured content of carbon and nitrogen fractions // Soil Science Annual. 2013. Vol. 64. No. 4. P. 130–134. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0020>
- Hättenschwiler S., Tiunov A.V., Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2005. Vol. 36. No. 1. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.112904.151932>
- Lindahl B.D., Ihrmark K., Boberg J., Trumbore S.E., Höglberg P., Stenlid J., Finlay R.D. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest // New Phytologist. 2007. Vol. 173. No. 3. P. 611–620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01936.x>
- Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G. I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils // New Phytologist. 2012. Vol. 196. No. 1. P. 79–91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Tituset B.D. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests // Plant Soil. 2011. Vol. 339. No. 1. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0563-3>
- Mooshammer M., Wanek W., Schnecker J., Wild B., Leitner S., Hofhansl F. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter // Ecology. 2012. Vol. 93. No. 4. P. 770–782. <https://doi.org/10.1890/11-0721.1>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Tereshchenko N.N. Decomposition rate of peat-forming plants at the initial stages of destruction in peat deposits of the oligotrophic bogs “Bakcharskoe” and “Timiryasevskoe” // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2020. Vol. 11. No 1. P. 37–48. <https://doi.org/10.17816/edgcc34045>
- Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems // Ecology. 1963. Vol. 44. No. 2. P. 322–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: Advances in Environmental Research. Vol. 4. Novosibirsk: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 99–119.
- Soong J.L., Vandegehuchte M.L., Horton A.J., Nielsen U.N., Deneff K., Shaw E.A., de Tomasel C.M., Parton W., Wall D.H., Cotrufo M.F. Soil microarthropods support ecosystem productivity and soil C accrual: evidence from a litter decomposition study in the tallgrass prairie // Soil Biology and Biochemistry. 2016. Vol. 92. P. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment // Australian Journal of Agricultural Research. 1997. Vol. 43. No. 3. P. 537–553.

Поступила в редакцию 14.11.2025

Принята 03.12.2025

Опубликована 08.12.2025

Сведения об авторах:

Головацкая Евгения Александровна – доктор биологических наук, профессор РАН, директор ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); golovatskayaea@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4354-7156>


Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); lili12358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland

© 2025 E. A. Golovatskaya,  L. G. Nikonova 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskii prospect, 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

The aim of the study was to assess the influence of the plant litter type on the organic matter transformation rate and the release of macro- and microelements.

Location and time of the study. The study was conducted from 2008 to 2012 on the territory of the oligotrophic peatlands "Bakcharskoye" (Bakcharsky district of Tomsk region) in a pine-shrub-sphagnum phytocenosis (Low ryam) (56°58'34,10" N 82°36'27,48" E).

Methods. The plant residues decomposition rate was determined by the litterbag method. Carbon and nitrogen contents, as well as ash content, were determined in the initial and post-experiment samples. The elemental composition of plant residue ash was determined using a HITACHI-S-3400N electron microscope with an X-ray spectral analyzer.

Results. The mass loss of the studied plant samples revealed that the decomposition processes were most intensive at the initial stage of decomposition during the first 12 months, afterwards the decomposition rate significantly decreasing. During the first year of plant residues decomposition, nitrogen immobilization generally occurred in all plant samples. However, by the end of the experiment, nitrogen loss was observed in all samples, with the exception of *Sphagnum fuscum*, for which a 5% increase in nitrogen content was observed. As a result of the mineralization of organic matter in plant litter, ash content decreased, also with the exception of *Sph. fuscum*, for which a slight increase of 1,1 times was revealed. The ash of the studied plants contained a number of elements, including K, Ca, P, Mg, Al, Si, S, Fe, and others, with K and Ca being the major components. During decomposition the ash content changed: a sharp decrease in K (by 1,6–7,9 times) and Ca (by 2,2–7,1 times) took place in all samples except for *Sph. fuscum*. All samples also showed accumulation of iron, aluminum, and silicon. Phosphorus content was found to increase in all samples except *Sph. fuscum*.

Conclusions. During decomposition, carbon depletion was found in all plant residues, with the dynamics of carbon loss strictly corresponding to the mass loss of organic matter. Nitrogen loss was revealed in all samples, except *Sph. fuscum*. The ash content of plant residues decreased by 1,2–1,9 times, with the exception of *Sph. fuscum*, for which a slight increase in ash content was found. The latter may be due to the accumulation of ash elements in the plant residues of *Sph. fuscum*, in combination with the low rate of organic matter mass loss. During the plant residues decomposition the leaching of K and Ca, and accumulation of Fe, Al, Si, P occurred in all the studied samples. The identified dynamics pattern of the elemental content during the decomposition of plant residues provided a better insight into the specifics of destruction of each peat-forming plant species in the pine-shrub-sphagnum biogeocenoses of the Bakchar bog.

Keywords: peatlands; peat-forming plants; West Siberia; decomposition rate; mineral composition.

How to cite: Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e344. DOI: [10.31251/pos.v8i4.344](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. № 121031300154-1).

REFERENCES

- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems / A.A. Tishkov (ed.). Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 381 p. (in Russian).
- Bambalov N.N., Khoruzhik A.V., Lukashko E.S., Strigutsky V.P. Transformation of dead plants in bog biogeocenoses. In book: Experiment and mathematical modeling in the study of biogeocenoses of forests and bogs. Moscow: Nauka Publ., 1990. P. 53–63. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Golovatskaya E.A. Distribution of lead and mercury in peat deposits of West Siberia (marshland of Vasyuganye). *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2012. Vol 20. No. 2. P. 181–187. (in Russian).
- Vorobyeva L.A. Theory and practice of soil chemical analysis. Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Russian Research Institute for Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC) [Electronic resource] <https://www.meteorf.ru> (accessed on 20.09.2021). (in Russian).

- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Decomposition of plant residues in peat soils of oligotrophic peatlands. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2013. No. 3(23). P. 137–151. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 5. P. 580–588. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Biogeochemical transformation of organic matter of peat-forming plants during the process of decomposition. In book: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present. Proceedings of the Seventh International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, 15–27 August, 2024)*. Tomsk: National Research Tomsk State University, 2024. P. 110–112. (in Russian).
- GOST 11306-83. Peat and its processed products. Methods for determining ash content. Moscow: Publishing House of Standards, 1994. 7 p. (in Russian).
- Denisenkov V.P. *Fundamentals of Swamp Science: Textbook*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2000. 220 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Pivchenko N.I. *Dynamics of Organic Matter in the Process of Peat Formation*, Leningrad: Nauka Publ., Leningrad Branch, 1978. 172 p. (in Russian).
- Lishtvan I.I. *Physics and chemistry of peat*. Moscow: Nedra Publ., 1989. 303 p. (in Russian).
- Mishustin E.N. Associations of Soil Microorganisms. In book: *USSR Academy of Sciences. Institute of Microbiology*. Moscow: Nauka Publ., 1975. 107 p. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K. Dynamics of the organic material in bogs of different genesis. In book: *Bogs and Biosphere: Proceedings of the Third Scientific School. Dedicated to the 400th Anniversary of the City of Tomsk (Tomsk, 13–16 September, 2004)*. Tomsk: Tomsk Center for Scientific and Technical Information, 2004. P. 23–30. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Carbon balance components of wetlands in the middle taiga and the forest-tundra. In book: *Peatlands of Western Siberia and the Carbon Cycle: Past and Present. Proceedings of the Second International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, 24 August – 2 September, 2007) / Edited by Academician S.E. Vompersky*. Khanty-Mansiysk: Publishing House of Scientific and Technical Literature, 2007. P. 117–118. (in Russian).
- Nikonova L.G., Kurganova I.N., López de Gerenu V.O., Zhmurin V.A., Golovatskaya E.A. Impact of abiotic factors on the decomposition of litter of peat-forming plants in the incubation experiment. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019. No. 46. P. 148–170. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/46/8>
- Parshina E. K. Destruction of plant matter in the bog ecosystems of the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia: Abstract of Dissertation... Cand. of Biol. Sci. Tomsk, 2009. 23 p. (in Russian).
- Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Guidelines for determining the composition of humus in soils (mineral and peat soils)*. Leningrad: Nauka Publ., 1975. 105 p. (in Russian).
- Prokushkin S.G., Prokushkin A.S., Sorokin N.D. The intensity of phytodetrit decomposition in larch forest of the permafrost zone in Central Siberia. *Biology Bulletin*. 2014. Vol. 41. No. 1. P. 89–97. <https://doi.org/10.1134/S1062359014010075>
- Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Conservation of plant organic matter and soil formation in ecosystems of zonal tundra of Extreme Northeast Asia. *Arctic Environmental Research*. 2017. Vol. 17. No. 3. P. 255–264. (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255>
- Tatarintseva V.G., Kotova E.I., Orlov A.S., Ponomareva T.I., Selyanina S.B., Daibova E.B. Metals and As in peat of high-level swamps of the Arkhangelsk region. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022. No. 6. P. 60–65. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.37842>
- Physico-chemistry and biology of peat. Methods for estimating the abundance and diversity of bacterial and actinomycete complexes of peat soils / T.G. Dobrovolskaya et al.; ed. by L.I. Inishev. Tomsk: Publishing House of Tomsk State Pedagogical University, 2010. 99 p. (in Russian).
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>
- Bonanomi G., Cesarano G., Gaglione S.A., Ippolito F., Sarker T., Rao M.A. Soil fertility promotes decomposition rate of nutrient poor, but not nutrient rich litter through nitrogen transfer. *Plant and Soil*. 2017. Vol. 412. P. 397–411. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3072-1>

- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: the role of microbial adaptability to litter chemistry. *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. No. 39. No. 1. P. 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>
- Frey S.D., Elliott E.T., Paustian K., Peterson G.A. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32. No. 5. P. 689–698. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00205-9)
- Jonczak J. Effect of peat samples drying on measured content of carbon and nitrogen fractions. *Soil Science Annual*. 2013. No. 64. No. 4. P. 130–134. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0020>
- Hättenschwiler S., Tiunov A.V., Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005. Vol. 36. No. 1. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.112904.151932>
- Lindahl B.D., Ihrmark K., Boberg J., Trumbore S.E., Höglberg P., Stenlid J., Finlay R.D. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. *New Phytologist*. 2007. Vol. 173. No. 3. P. 611–620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01936.x>
- Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G. I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*. 2012. Vol. 196. No. 1. P. 79–91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Tituset B.D. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. *Plant Soil*. 2011. Vol. 339. No. 1. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0563-3>
- Mooshammer M., Wanek W., Schnecker J., Wild B., Leitner S., Hofhansl F. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter. *Ecology*. 2012. Vol. 93. No. 4. P. 770–782. <https://doi.org/10.1890/11-0721.1>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Tereshchenko N.N. Decomposition rate of peat-forming plants at the initial stages of destruction in peat deposits of the oligotrophic bogs “Bakcharskoe” and “Timiryasevskoe”. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2020. Vol. 11. No 1. P. 37–48. <https://doi.org/10.17816/edgcc34045>
- Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*. 1963. Vol. 44. No. 2. P. 322–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: *Advances in Environmental Research*. Vol. 4. Novosibirsk: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 99–119.
- Soong J.L., Vandegehuchte M.L., Horton A.J., Nielsen U.N., Deneff K., Shaw E.A., de Tomasel C.M., Parton W., Wall D.H., Cotrufo M.F. Soil microarthropods support ecosystem productivity and soil C accrual: evidence from a litter decomposition study in the tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 92. P. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1997. Vol. 43. No. 3. P. 537–553.

Received 14 November 2025

Accepted 03 December 2025

Published 08 December 2025

About the authors:

Evgeniya A. Golovatskaya – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); golovatskayaea@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4354-7156>

Liliya G. Nikonova – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory for Monitoring the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); lili112358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)