



Потери массы торфа при экспериментальной деструкции в болотах Западной Сибири в связи с локальными условиями и широтной зональностью

© 2026 Н. Г. Коронатова 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: coronat@mail.ru

Цель исследования. Выявить особенности изменения массы торфа в ходе экспериментальной деструкции с учётом инициального выщелачивания в зависимости от качества субстрата, элемента микрорельефа и широты местности.

Место и время проведения. Полевой эксперимент проводили на болотах, расположенных в разных зонах и подзонах Западной Сибири – от лесостепи до лесотундры. Во всех болотных комплексах эксперимент закладывали одновременно в повышенных (сосново-кустарничково-сфагновых микрорландшафтах, грядах грядово-мочажинных комплексов – ГМК, мерзлотных буграх) и пониженных (обводнённых мочажинах и топях) элементах микрорельефа. Начало полевого эксперимента на разных болотах охватывало период с 2006 по 2012 гг., длительность эксперимента составила от трёх до шести лет.

Методы. Потери массы торфа оценивали традиционным методом сетчатых мешочков. Образцы помещали в торфяную почву на глубину 5–10 и 25–30 см, в отдельных случаях – на 45–50 см. Торф, извлечённый из залежи повышенных и пониженных элементов микрорельефа, закладывали в почву тех же локаций, где его отбирали, либо в аналогичные сообщества других биогеографических поясов. Отбор образцов проводили через определённые промежутки времени в 4–8-кратной повторности. В повышенных элементах микрорельефа использовали верховой фускум-торф, а в пониженных – мочажинный торф верхового или переходного типа с разной степенью разложения. Для сравнения скорости деструкции в разных биоклиматических зонах использовали торф, отобранный в Бакcharском болоте. Скорость деструкции оценивали, рассчитывая процент потери массы и константу скорости разложения. Статистическая обработка включала расчёт основных статистических показателей и тестирование значимости разницы между выборками.

Основные результаты. Медианы инициального выщелачивания торфа составили 0–19,5% от исходной массы; в одних и тех же сообществах выщелачивание значительно различалось в разные годы начала эксперимента. Константы разложения с учётом выщелачивания и без него различались в среднем в полтора раза. Максимальные потери массы выявлены в поверхностном слое залежи повышенных элементов микрорельефа лесостепи, южной и средней тайги (40–55%), меньшие потери – на обеих глубинах обводнённых понижений рельефа южной тайги (31–33%); после достижения этого уровня потери массы перестали меняться. Потери массы в нижележащем слое повышенных элементов микрорельефа южной части Западной Сибири и в болотах ее северной части остались на уровне инициального выщелачивания. Характерной особенностью потерь при деструкции торфа было наличие периода начальной задержки, который увеличивался от южных к северным болотам, достигая длительности до пяти лет. В одних и тех же элементах рельефа потери массы торфа с более высокой степенью разложения оказались больше по сравнению с торфом с низкой степенью разложения и чаще оставались в рамках инициального выщелачивания. В пределах одного болотного комплекса потеря массы одного и того же вида торфа значительно различалась в аналогичных местообитаниях: между рямом и грядой ГМК, топью и мочажинной ГМК в сфагновом олиготрофном болоте, сфагновой кочкой и лишайниковым понижением на мерзлотном бугре.

Заключение. Закономерности деструкции торфа являются слабоизученным, но важным направлением исследований, способствующим прогнозированию поведения болотных экосистем при естественных и антропогенных воздействиях (климатических изменениях, пожарах, осушении), ведущих к понижению уровня болотных вод и возникновению аэробных условий в катотельме. Проведённый эксперимент по деструкции вдоль широтного градиента показал, что в болотах южной части Западной Сибири торф быстрее включается в процесс биологического разложения. Необходимы дальнейшие исследования, включающие проведение длительных многолетних экспериментов, определение химического статуса субстрата перед началом инкубации и на разных её этапах, выявление состава сообщества деструкторов, что позволит приблизиться к пониманию механизмов, управляющих скоростью и траекторией деструкции торфа.

Ключевые слова: олиготрофная торфяная почва; мерзлотная торфяная почва; инициальное выщелачивание; фаза начальной задержки; верховое болото; мерзлотное болото; метод инкубации мешочков.

Цитирование: Коронатова Н.Г. Потери массы торфа при экспериментальной деструкции в болотах Западной Сибири в связи с локальными условиями и широтной зональностью // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 3. e359. DOI: [10.31251/pos.v9i3.359](https://doi.org/10.31251/pos.v9i3.359)

ВВЕДЕНИЕ

Деструкция растительного опада является одним из ключевых процессов углеродного цикла, который в болотных экосистемах определяет связывание углерода в торфяных почвах. Деструкция зависит от качества опада, почвенных организмов и климата, причём повышение температуры увеличивает деструкцию при условии достаточной влажности субстрата (Aerts, 2006). Известно, что в болотах скорость разложения различается между видами растений (Вишнякова и др., 2012; Головацкая, Никонова, 2017) в связи с разницей в физико-химическом и химическом качестве опада (Turetsky et al., 2008; Почикалов, Карелин, 2014), а также зависит от уровня стояния болотных вод (Головацкая, Никонова, 2017; Никонова и др., 2019) и температуры среды (Почикалов, Карелин, 2014; Никонова и др., 2018, 2019). При этом для сфагновых мхов микротопографическое положение, содержание азота и соотношение C/N в тканях не оказывают существенного влияния на скорость разложения (Turetsky et al., 2008).

Начальные потери массы при деструкции опада происходят в результате выщелачивания, т.е. выноса водорастворимого органического вещества из образцов в течение первого периода разложения (от первых часов и дней до трёх недель) без участия микроорганизмов, после чего скорость потери массы снижается (Lind et al., 2022; Müller et al., 2023; Teickner et al., 2025). Размер инициального выщелачивания составляет в среднем от 3 до 18% от исходной массы (Teickner et al., 2025), при нижнем пределе <1% (Limpens, Berendse, 2003; Del Guidice, Lindo, 2017; Müller et al., 2023). Дальнейшее разложение органической массы сопровождается деполимеризацией крупных молекул, при этом игнорирование первичного выщелачивания ведёт к переоценке скорости этого процесса (Lind et al., 2022). Агентами деполимеризации являются микроорганизмы; для болот Томской области установлена высокая плотность бактериальных популяций (Головченко и др., 2005) и преобладание микромицетов в верховых торфяниках (Добровольская и др., 2012).

Помимо свежего растительного опада, торфяные почвы также подвержены деструкции. Разложение торфа по всей глубине залежи объясняет рост и формирование торфяных отложений в болотах (Cluys, 1984): согласно предложенной экспоненциальной модели, скорость разложения снижается с глубиной, что связано с возрастающей устойчивостью органической массы. Это объясняется деградацией наиболее восприимчивых к деструкции компонентов на первых этапах и относительным накоплением более устойчивых соединений, а также всё менее благоприятными для распада органических веществ условиями вследствие снижения температуры и падения содержания кислорода. Кроме естественной деградации торфа в ненарушенных болотах, деструкция глубоких слоёв залежи может происходить в результате понижения уровня болотных вод (УБВ), что приводит к возникновению аэробных условий в нижележащей обводнённой зоне торфяных почв. Падение УБВ возникает не только в результате осушения болот, которое в 21 веке практически не проводится, но и под воздействием климатических изменений, а также участвовавших пожаров. Понимание закономерностей разложения торфа, который оказался в аэробной зоне, позволит оценивать и моделировать поведение болотных экосистем при различных катастрофических и климатических сценариях. Однако деструкция торфа изучена значительно слабее, чем растений-торфообразователей. Для болот Канады показано, что потери углерода при минерализации торфа составляют 59–140 мкг на 1 г торфа в день (Louis et al., 2003). Потери массы торфа в эксперименте в болотах Западной Сибири различаются в зависимости от вида торфа и элемента болотного микрорельефа, а также глубины инкубации, достигая за год 38% от исходной массы в поверхностном слое почвы в повышенных элементах микрорельефа и до 12% – в пониженных (Коронатова, Шибарева, 2010). Как и для других типов опада, скорость минерализации торфа зависит от его химического качества, а значимыми факторами разложения являются температура, содержание воды в почве или УБВ, глубина инкубации (Grover, Baldock, 2010, 2012). Установлено, что торф, заложенный в свежем состоянии, минерализуется медленнее, чем предварительно высушенный (Grover, Baldock, 2012). Высушенное или исходное влажное состояние образцов при закладке эксперимента влияет в первые месяцы деструкции, увеличивая потери массы из сухих образцов, но через год разница перестаёт быть значимой (Коронатова, 2010). Установлено, что в верховых обводнённых топях с хорошо развитым травяным покровом, живые корни осок, проникающие глубоко в торфяную залежь и отмирающие там, играют заметную роль в пополнении запаса торфа (Коронатова, Шибарева, 2010).

Поэтому участие корней живых растений в формировании торфяных отложений учитывается при моделировании торфообразования (Frolking et al., 2001).

Целью данной работы было выявление особенностей изменения массы торфа в ходе экспериментальной деструкции с учётом инициального выщелачивания в зависимости от качества субстрата, элемента микрорельефа и широты местности. Достижение поставленной цели предполагает поиск ответов на следующие вопросы: какие потери массы торфа при инициальном выщелачивании и как учёт выщелачивания влияет на константу разложения? как меняется с течением времени траектория потери массы торфа в разных биоклиматических зонах? как влияют на потери массы торфа качество субстрата и элемент болотного микрорельефа (местообитание)?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ключевыми участками для проведения экспериментальной деструкции торфа стали болота, расположенные в разных зонах и подзонах Западной Сибири (таблица, рис. 1).

Таблица

Краткая характеристика ключевых участков

Зона/ под- зона	Ключевой участок	Коорди- наты	Т / О	Микроландшафт/его элемент, местообитание	Год начала экспер- имента	Характеристика образцов торфа:		
						г, %	происхож- дение	вид
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лесо- степь	Николаев- ский рям	55°13' с.ш. 79°03' в.д.	0,9 / 411	Сосново-кустарничково- сфагновый (Рямовый)	2010	5	Бакчарское болото, рям	Фускум-торф
Юж- ная тайга	Плотниково (в пределах Бакчарского болотного комплекса)	56°52' с.ш. 82°50' в.д.	0,5 / 499	Рямовый	2006, 2007	5	Местный*, рям	Фускум-торф
		56°51' с.ш. 82°50' в.д.		Пушицево- кустарничково- сфагновое, переходная к ряму часть топи (ПЧТ)	2006, 2007	15	Местный, ПЧТ	Сфагновый мочажинный
				Осоково-сфагновая топь, центральная часть топи (ЦЧТ)	2006, 2007	25	Местный, ЦЧТ	Сфагновый переходный
				56°48' с.ш. 82°51' в.д.	Рямовое сообщество гряды грядово- мочажинного комплекса (ГМК)	2006	5	Рям этого же болота
		Травяно-сфагновое сообщество мочажины ГМК			2006	15	Топь (ПЧТ) этого же болота	Сфагновый мочажинный
Сред- няя тайга	Мухрино	60°53' с.ш. 68°41' в.д.	–0,4 / 548	Рямовый	2009	5	Бакчарское болото, рям	Фускум-торф
					2010	5	Местный, рям	Фускум-торф
						20	Местный, рям	Фускум-торф
		60°53' с.ш. 68°40' в.д.		Рямовое сообщество гряды ГМК	2012	5	Местный, гряда	Фускум-торф
				Травяно-сфагновая топь	2012	25	Местный, топь	Сфагновый мочажинный
						15	Бакчарское болото, ПЧТ	Сфагновый мочажинный
Север- ная тайга	Тету- Мамон- тотай	63°13' с.ш. 75°43' в.д.	–1,4 / 544	Кустарничково- сфагново-лишайниковый мерзлотный бугор	2012	5	Бакчарское болото, рям	Фускум-торф
				Травяно-сфагновая мочажина	2012	40	Местный, мочажина	Осоково- сфагновый переходный
						15	Бакчарское болото, ПЧТ	Сфагновый мочажинный

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лесо- тундра	Пангоды	65°52' с.ш. 74°57' в.д.	–6,4 / 471	Мерзлотный бугор, кочка и межкочье	2009	45	Местный, под лишайником	Н.д.
				Мерзлотный бугор, кочка		5	Местный, под <i>S. fuscum</i>	Фускум-торф
						5	Бакчарское болото, рям	Фускум-торф
				Травяно-сфаговая мочажина	2009	30	Местный, мочажина	Осоково- сфаговый переходный мочажинный
					2009, 2012	15	Бакчарское болото, ПЧТ	Сфаговый мочажинный
					2012	40	Местный, мочажина	Осоково- сфаговый переходный

Примечание. Т – средняя годовая температура (°С), О – годовые осадки (мм), данные Гидрометцентра России (meteoinfo.ru) за период с 1991 по 2020 гг.; r – степень разложения торфа; * «местный» означает, что образцы заложили в том же месте, откуда отобрали торф.

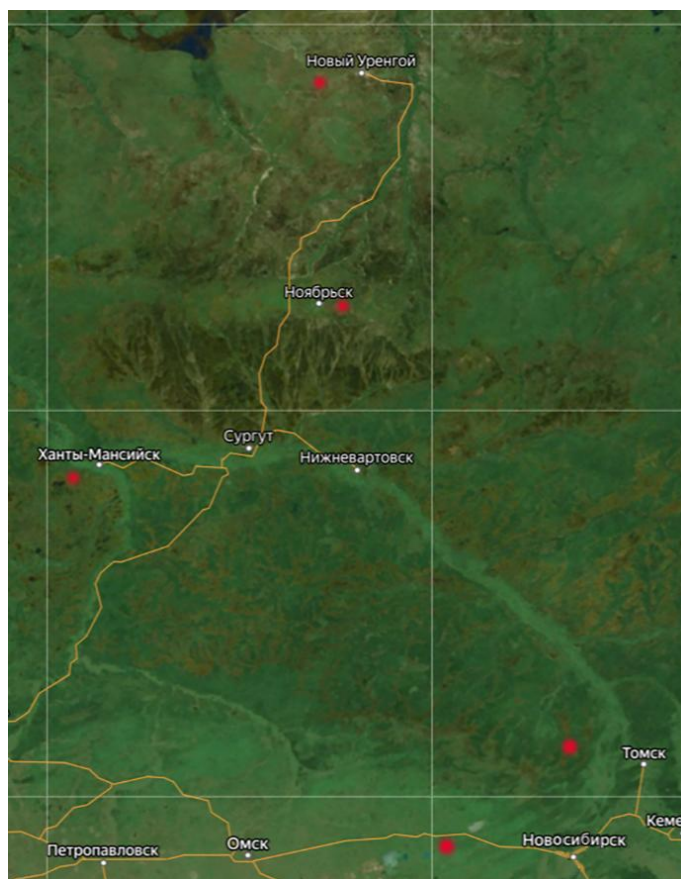


Рисунок 1. Схема расположения ключевых участков (красные точки) на территории Западной Сибири.

Болота Николаевский рям, Плотниково и Мухрино в лесостепи, южной и средней тайге являются сфагновыми олиготрофными комплексами; болота Тету-Мамонтотай и Пангоды – мерзлотные плоскобугристые комплексы в северной тайге и лесотундре. Все болота включают повышенные и пониженные элементы микрорельефа: к повышенным относятся сосново-кустарничково-сфаговые (рямовые) микроландшафты, гряды **грядово-мочажинных комплексов (ГМК)** и мерзлотные бугры, а к пониженным – обводнённые местообитания мочажин и топей. Во всех болотных комплексах эксперимент заложили в обоих типах микрорельефа, за исключением

лесостепного рьяма. Кроме того, на бугре болота Пангоды образцы поместили в сфагновой кочке и в лишайниковом межкочечном понижении.

Ход эксперимента включал следующий порядок действий. В типичных сообществах на ключевых участках извлекли торф с глубины около 50 см, а на мерзлотных буграх – талый торф на глубине около 30–40 см выше уровня залегания многолетнемерзлых пород. Из торфа удалили крупные растительные объекты и перемешали. Образцы торфа определённой массы заложили в сетчатые синтетические мешочки размером 12×12 см с диаметром ячеек 0,3 мм. После мешочки поместили в торфяную почву на глубину 5–10 см (далее – «поверхностный слой») и 25–30 см («нижележащий» или «глубокий слой»), располагая друг над другом, и в отдельных случаях – также на глубину 45–50 см. Каждую из глубин в каждом элементе микрорельефа считали отдельной локацией. Торф из повышенных и пониженных местообитаний заложили в почву тех же либо аналогичных элементов микрорельефа других биогеографических поясов. Отбор образцов проводили через определённые промежутки времени в 4–8-кратной повторности (в среднем 5–6). Из свежих образцов извлекали живые подземные органы растений, проросшие в мешочки, затем сушили до постоянного веса при 60°C и взвешивали. Годы начала полевых экспериментов охватили период с 2006 по 2012 гг. в разных болотных комплексах Западной Сибири. При этом подразумевалось, что динамика изменения массы слабо зависит от года закладки, а определяется в первую очередь локальными почвенно-гидрологическими и климатическими факторами, а также качеством субстрата. Длительность эксперимента составила от трёх до шести лет на разных болотах. В отдельных случаях она снизилась до года-двух в связи с возникшими непредвиденными обстоятельствами, которые привели к утрате образцов.

Виды торфа, участвовавшие в эксперименте, относились к типу верховых или переходных с разной степенью разложения (см. табл.). В повышенных элементах микрорельефа использовали верховой фускум-торф; единственным исключением стал торф из межкочечного понижения бугра болота Пангоды, вид которого было невозможно установить по макроскопическим признакам в связи с высокой степенью разложения. В пониженных элементах микрорельефа задействовали мочажинный торф верхового или переходного типа с разной степенью разложения (r), которую оценили по макроскопическим признакам (Тюрменов, 1976).

Растительный материал, который используют в инкубационных экспериментах, может быть заложен как в высушенном, так и свежем состоянии, что оказывает влияние на инициальное выщелачивание и колонизацию грибами (Bärlocher, 1997; Gessner, Schwoerbel, 1989). Поэтому на первом этапе была проведена методическая работа на ключевом участке Плотниково для обоснования методики использования свежих образцов торфа в эксперименте и сравнения результатов инкубации образцов, заложенных в сухом и влажном состоянии. Установлено, что в первый год деструкции потери массы предварительно высушенного торфа были выше, но динамика изменений высушенных и влажных образцов оказалась сходной, а потери через год перестали значительно различаться между ними (Коронатова, 2010). В данной работе приведены результаты инкубации торфа, заложенного как во влажном, так и в сухом состоянии, подразумевая, что состояние закладываемого торфа не влияет на исход эксперимента. Для того, чтобы рассчитать сухую массу образцов, заложенных во влажном состоянии, во время подготовки откладывали по восемь штук, равномерно распределяя во времени от начала до окончания работы и периодически перемешивая всю массу торфа для сохранения равномерной степени увлажнения. В дальнейшем расчёт среднего квадратичного отклонения и стандартной ошибки массы высушенных образцов показал низкие значения.

Схема эксперимента для выполнения поставленных задач была следующей:

1. Инициальное выщелачивание определили на двух ключевых участках: Плотниково в южной тайге и Пангоды в лесотундре. Везде использовали высушенный торф низкой и средней степени разложения из Бакчарского болота, отобранный в 2006 и 2007 гг. (в болоте Пангоды заложили торф 2007 г. отбора). В южнотаёжном болоте использовали торф трёх видов (фускум-торф, сфагновый переходный и сфагновый мочажинный) для размещения в рьяме, центральной части топи (ЦЧТ) и переходной части топи (ПЧТ), а в лесотундре – только фускум-торф. Зольность торфов, определённая методом сухого озоления (Дурынина, Егоров, 1998), составила у фускум-торфа $1,5 \pm 0,1\%$ в 2006 г. и $2,3 \pm 0,1\%$ в 2007 г., поскольку торфа были взяты в разных участках рьяма; $1,4 \pm 0,04\%$ в ПЧТ и $5,4 \pm 0,3\%$ в ЦЧТ (Коронатова, 2025). В Плотниково образцы заложили в период с 10 по 14 июня в 2006 и 2007 гг. и провели их отбор через 18–19 дней, а в Пангодах – 29 июля 2009 г. с отбором через 9 дней.

2. Для выявления влияния широтной зональности на потери массы заложили высушенные образцы торфа низкой степени разложения из Бакчарского болота (ключевой участок Плотниково):

фускум-торф для инкубации в повышенных элементах микрорельефа и мочажинный торф – в пониженных. Эксперимент провели в болотах лесостепи, южной, средней и северной тайги, а также лесотундры. Годы начала эксперимента охватили период с 2006 по 2012 гг. Срок инкубации составил от двух до шести лет в разных болотах. В лесостепи и южной тайге эксперимент стартовал в июне-начале июля, в средней, северной тайге и лесотундре – в конце июля и августе.

3. Для определения влияния качества субстрата выполнили эксперимент в среднетаёжном олиготрофном болоте Мухрино и лесотундровом мерзлотном болоте Пангоды. В повышенных элементах микрорельефа разместили местный торф во влажном состоянии, в пониженных – как местный влажный, так и высушенный торф из Бакчарского болота. Это связано с тем, что на данных ключевых участках торф разной степени разложения (от 5 до 45%) можно было найти в повышенных элементах микрорельефа, в то время как в пониженных обводнённых участках торф слабо различался по степени разложения. Начало эксперимента охватило период с 2009 по 2012 гг., образцы закладывали в первой половине августа.

Для оценки скорости разложения торфа рассчитали общий процент потерь массы за определённый промежуток времени, потери с учётом инициального выщелачивания, а также константу разложения.

Потери массы рассчитали по формуле:

$$X = ((m_0 - m_t) / m_0) \times 100,$$

где X – потери массы торфа (%), m_0 – исходная масса торфа (г), m_t – масса торфа через заданный промежуток времени t (год).

Потери массы с учётом инициального выщелачивания рассчитали по формуле:

$$X_l = ((m_{il} - m_t) / m_{il}) \times 100,$$

где X_l – потери массы торфа (%) за исключением инициального выщелачивания, m_{il} – масса торфа, оставшаяся после инициального выщелачивания, m_t – масса торфа через заданный промежуток времени t .

Согласно классической модели разложения растительных остатков, масса образцов уменьшается по экспоненте ($m_t = m_0 \times e^{-kt}$), что позволяет рассчитать константу скорости разложения (Olson, 1963):

$$k = (-\ln(m_t / m_0)) / t,$$

или для случая с учётом инициального выщелачивания:

$$k_l = (-\ln(m_t / m_{il})) / t,$$

где k и k_l – константы разложения без учёта и с учётом инициального выщелачивания (год⁻¹).

Расчёт основных статистических показателей (медиана, межквартильный размах в пределах 25–75%, значимость разницы между выборками) провели в программе PAST V.2.17, графическую иллюстрацию результатов эксперимента – в программах Excel MS и PAST. Значимость разницы между выборками (p) оценили с применением непараметрического теста Краскела-Уолиса и апостериорным парным сравнением Манна-Уитни, поскольку распределение полученных данных не всегда соответствовало нормальному, что подтвердили тестом Шапиро-Уилка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Инициальное выщелачивание изучали на примере торфа из Бакчарского болота, который закладывали в высушенном состоянии в южной тайге повторно в течение двух лет (2006 и 2007 гг.) и в лесотундре (рис. 2). Полученные результаты неожиданно продемонстрировали существенную разницу между годами на ключевом участке Плотниково, где медианные значения составили в разных локациях в 2006 г. от 3 до 19% и в 2007 г. от 0 до 3%. Наибольшие потери в 2006 г. в поверхностном слое ряма и глубоком слое ЦЧТ связаны, вероятно, с началом биологической деструкции. Потери в мерзлотном бугре болота Пангоды на уровне 8,5% соответствовали обычному объёму абиотического выщелачивания из растительных тканей (Teickner et al., 2025). Тест на значимость разницы между потерями при инициальном выщелачивании для каждой глубины в каждом элементе микрорельефа провели отдельно для образцов, отобранных в Плотниково в 2006 и 2007 гг. Для образцов, заложенных в 2006 г., не выявлено значимых различий между всеми локациями. Для образцов, заложенных в 2007 г., установлена значимая разница потери массы для ПЧТ на обеих глубинах ($p < 0,05$). Следующим шагом стало сравнение потерь в Плотниково в 2006 и 2007 гг. между собой, для чего сгруппировали все измерения одного года в единую выборку. Разница между годами оказалась значимой ($p = 1,75 \cdot 10^{-9}$). Величина потери массы в болоте Пангоды была промежуточной в сравнении с потерями в Плотниково за два года и достоверно отличалась от потерь в южной тайге в 2007 г. ($p = 0,00013$), но не в 2006 г. Несмотря на разницу между годами, полученные

оценки в общем находятся в пределах значений, установленных для различных растительных материалов (Lind et al., 2022; Müller et al., 2023; Teickner et al., 2025), что позволяет экстраполировать их на соответствующие виды торфа в других экосистемах для корректного расчёта константы разложения.

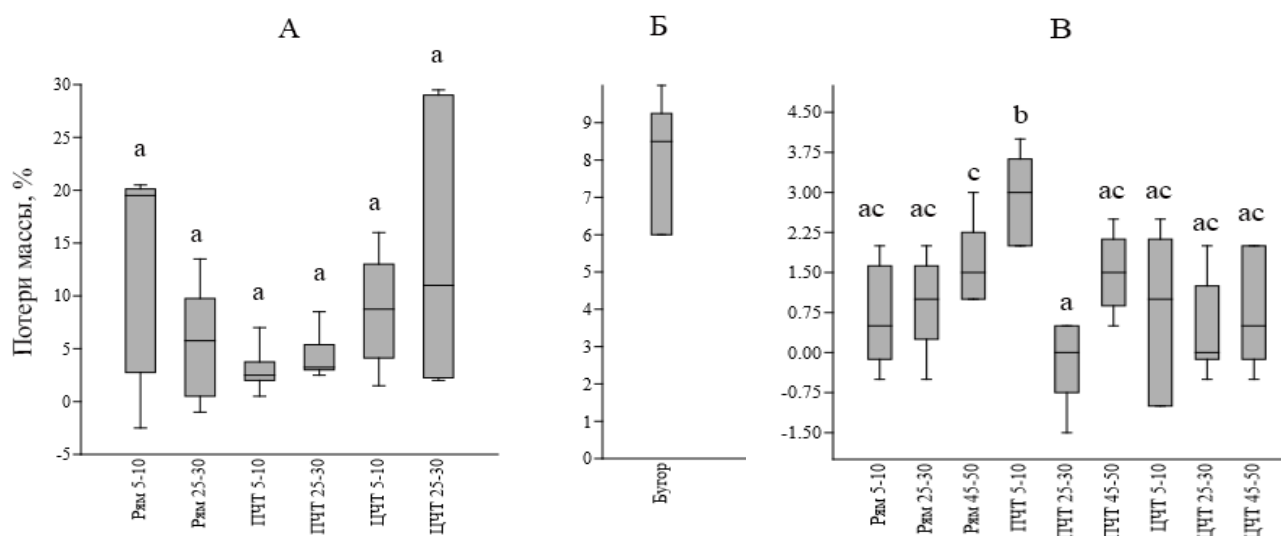


Рисунок 2. Потери массы торфа при инициальном выщелачивании, % от исходной массы. А – Плотниково, заложены в 2006 г., срок инкубации 19 дней. Б – Пангоды, заложены в 2009 г., срок инкубации 9 дней. В – Плотниково, заложены в 2007 г., срок инкубации 18 дней. ПЧТ – переходная часть топи, ЦЧТ – центральная часть топи. Число повторностей 6–8. Одни и те же буквы указывают на отсутствие значимой разницы согласно тесту Краскела-Уоллиса. «Коробки» показывают межквартильный размах в пределах 25–75%, горизонтальная линия внутри – медиана, «усы» – минимальные и максимальные значения.

Потери массы торфа в разных биоклиматических зонах исследовали с использованием высушенного фускум-торфа и сфагнового мочажинного торфа из Бакчарского болота, которые заложили, соответственно, в повышенные и пониженные элементы микрорельефа всех ключевых участков.

В повышенных элементах микрорельефа потери торфа снижались с юга на север. В лесостепи и южной тайге образцы, заложенные в 2006 г., в течение вегетационного сезона потеряли из поверхностного слоя от 22 до 37% (рис. 3 А, Б). Значимая разница в этих потерях подтверждена только между торфом в южнотаёжном ряме 2007 г. закладки, где потери составили 6,5%, и остальными локациями ($p < 0,05$). Однако по прошествии трёх вегетационных сезонов потери в данных элементах микрорельефа южной тайги стали сопоставимы (45–55%) без статистически значимой разницы между ними. В отличие от поверхностного слоя, потери на глубине 25–30 см в обеих зонах в основном не превысили 10%, что сопоставимо с оценками инициального абиотического выщелачивания. Потери и динамика изменений на глубине 45–50 см в обеих зонах были схожи с потерями на глубине 25–30 см, не превысив 6% за три тёплых сезона.

В отличие от повышенных элементов болотного микрорельефа лесостепи и южной тайги, потери торфа, заложенного в средней тайге в 2009 г., составили через три года 10% на обеих глубинах (рис. 3 В). Однако в эксперименте, начатом в 2012 г., уже через год потери на глубине 5–10 см достигли 35%, что сходно с потерями в более южных болотах.

На буграх мерзлотных болот северной тайги и лесотундры потери торфа при деструкции были самыми низкими: от 6 до 13,5% (рис. 3 Г). Значимой разницы между потерями массы в поверхностном и нижележащем слоях не установлено.

В пониженных обводнённых элементах микрорельефа наблюдалась аналогичная тенденция снижения потерь массы торфа от южных болот к северным. В южной тайге масса торфа в ПЧТ снизилась более, чем на 30% в поверхностном слое спустя два вегетационных сезона и достигла таких же потерь в нижележащем слое спустя три вегетационных сезона в эксперименте, начатом в 2006 г. (рис. 4 А). При этом, в мочажине ГМК потери составили около 10% на обеих глубинах, а в ПЧТ в эксперименте 2007 г., потери оказались ниже 5%. Потери торфа 2006 г. закладки в ЦЧТ имели

более высокую скорость, чем при начале эксперимента в 2007 г. (рис. 4 Б), когда потери достигли 25% лишь на пятый год инкубации в поверхностном слое, а в нижележащем слое начали увеличиваться только на шестой год.

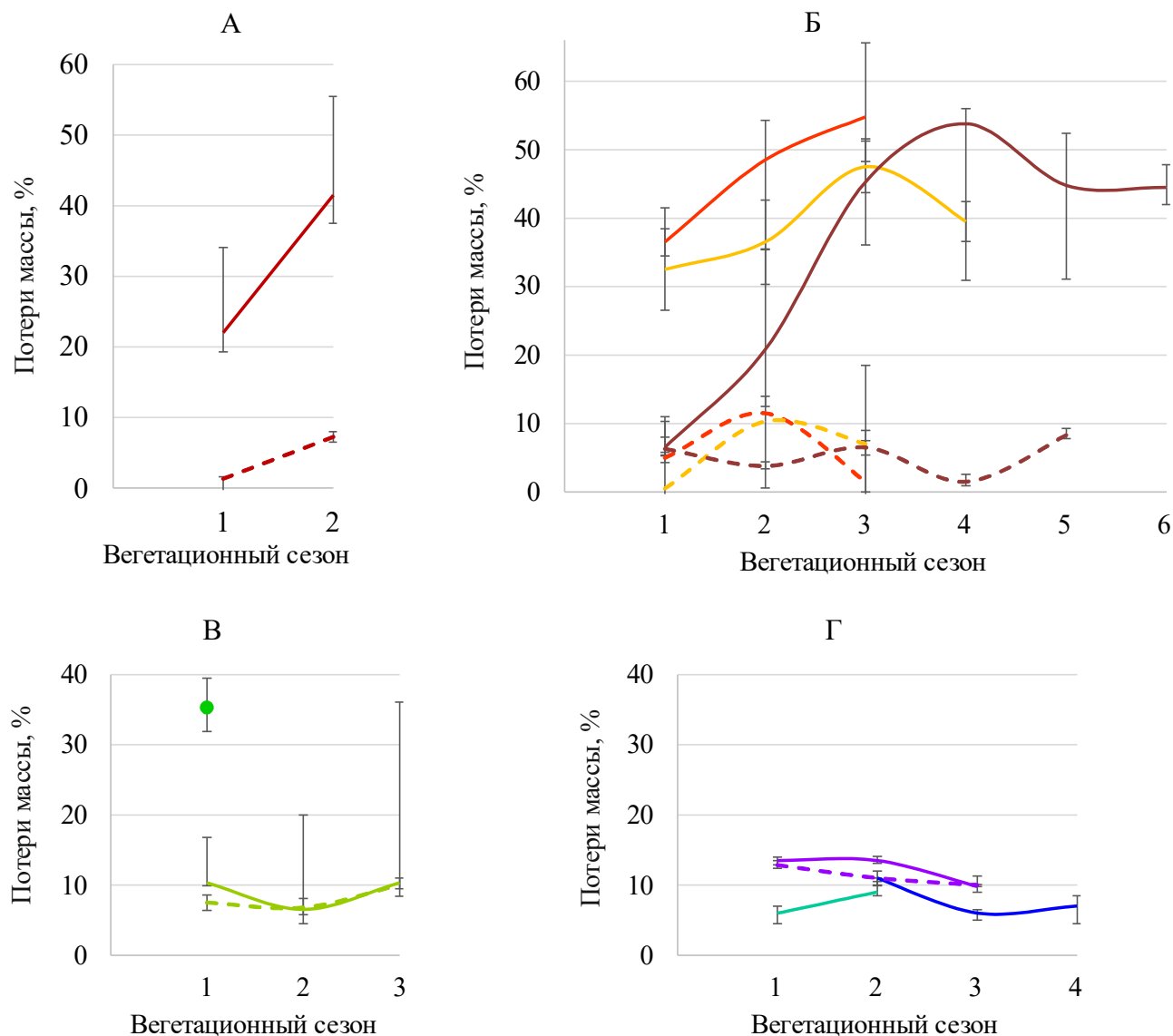


Рисунок 3. Потери массы торфа, отобранного в ряме Бакчарского болота, от исходной массы (%) в повышенных элементах болотного микрорельефа разных биоклиматических зон: А – лесостепь, Б – южная тайга, В – средняя тайга, Г – северная тайга и лесотундра. Цветовые обозначения ключевого участка, элемента микрорельефа и года начала эксперимента: — Николаевский рям, 2010 г.; — Плотниково, рям, 2006 г.; — Плотниково, рям, 2007 г.; — Плотниково, гряда ГМК, 2006 г.; — Мухрино, рям, 2009 г.; — Мухрино, рям, 2012 г. (5–10 см); — Тету-Мамонтотай, бугор, 2012 г.; — Пангоды, бугор, 2012 г.; — Пангоды, бугор, 2009 г. Глубина инкубации: сплошная линия – 5–10 см, пунктирная линия – 25–30 см. Приведены медианные значения, «усы» показывают межквартильный размах в пределах 25–75%.

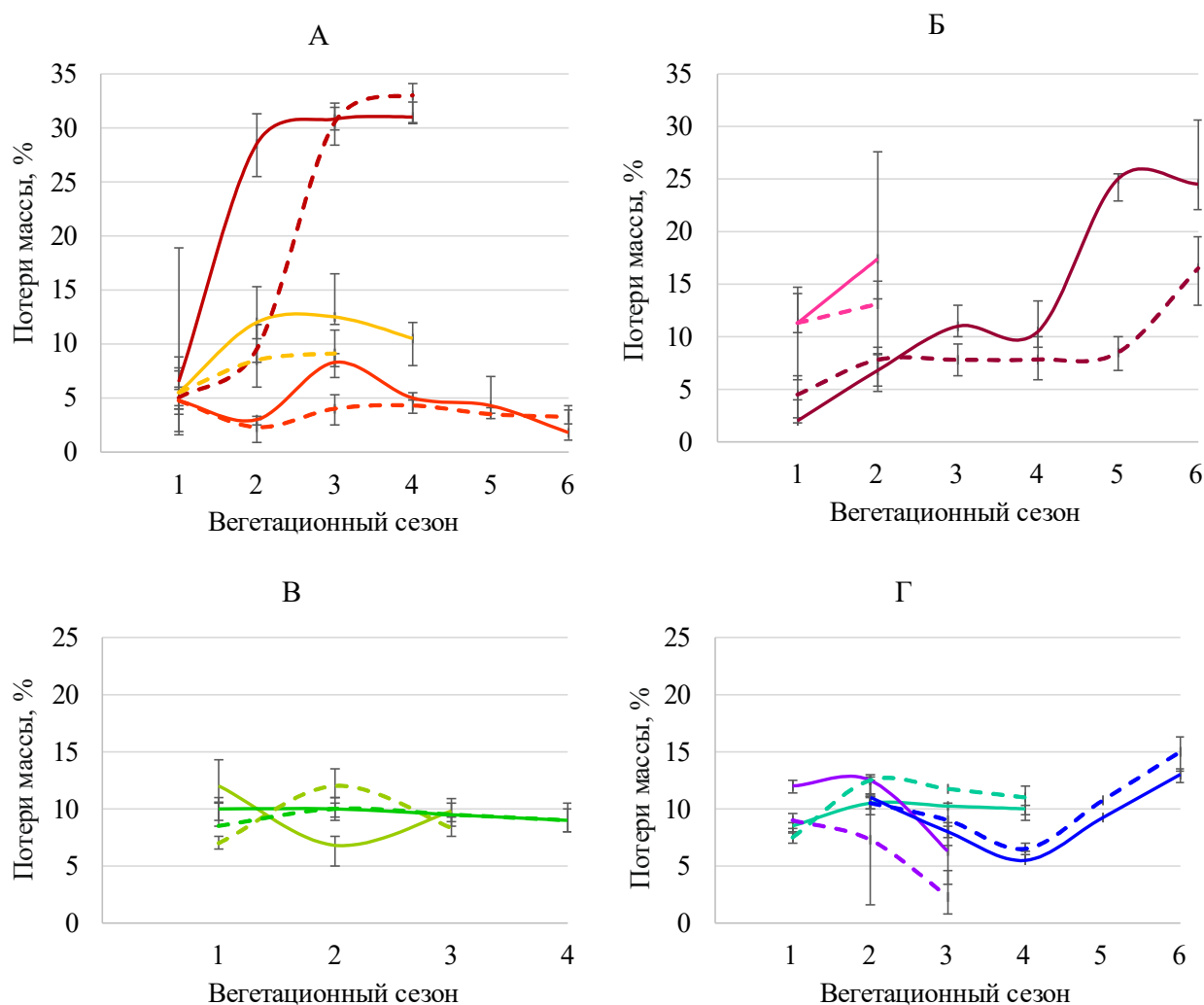


Рисунок 4. Потери массы торфа, отобранного в топи Бакчарского болота, от исходной массы (%) в пониженных элементах болотного микрорельефа разных биоклиматических зон: А и Б – южная тайга, В – средняя тайга, Г – северная тайга и лесотундра. Цветовые обозначения ключевого участка, элемента микрорельефа и года начала эксперимента: — Плотниково, ПЧТ, 2006 г.; — Плотниково, ПЧТ, 2007 г.; — Плотниково, мочажина ГМК, 2006 г.; — Плотниково, ЦЧТ, 2006 г.; — Плотниково, ЦЧТ, 2007 г.; — Мухрино, топь, 2009 г.; — Мухрино, топь, 2012 г.; — Тету-Мамонтотяй, мочажина, 2012 г.; — Пангоды, мочажина, 2012 г.; — Пангоды, мочажина, 2009 г. Глубина инкубации: сплошная линия – 5–10 см, пунктирная линия – 25–30 см. Приведены медианные значения, «усы» показывают межквартильный размах в пределах 25–75%.

В топи среднетаёжного болота Мухрино за год инкубации потери достигли 10–12% в поверхностном слое и 7–8,5% в нижележащем в разные годы начала эксперимента и в дальнейшем оставались на уровне около 10% в течение трёх-четырёх вегетационных сезонов (рис. 4 В). В мочажинах плоскобугристых болот снижение массы и ход её изменения часто совпадали на двух глубинах (рис. 4 Г). Как и в средней тайге, потери были низки: 11% в северной тайге и 7,3–12,5% в лесотундре через два года инкубации. Через шесть лет потери в мочажине болота Пангоды возросли до 13–15%.

Константы скорости разложения k и k_l рассчитали для двух болот, на которых оценивали объём инициального выщелачивания: болота Плотниково в южной тайге и бугра болота Пангоды в лесотундре (рис. 5). Значение константы обычно снижается со временем, что в нашем эксперименте наблюдалось не всегда. В половине случаев константы возросли на второй или третий вегетационный сезон, а в ЦЧТ (2007 г. закладки) – на пятый и шестой, что отражает интенсификацию разложения в это время. Средняя разница между значениями k и k_l составила 2,3 раза для повышенных элементов микрорельефа в Плотниково 2006 г. начала эксперимента; 1,4 раза для пониженных элементов

микрорельефа здесь же; 2,4 раза в болоте Пангоды. Разница между k и k_l в Плотниково 2007 г. начала эксперимента была 1,1–1,2 в связи с незначительным инициальным выщелачиванием.

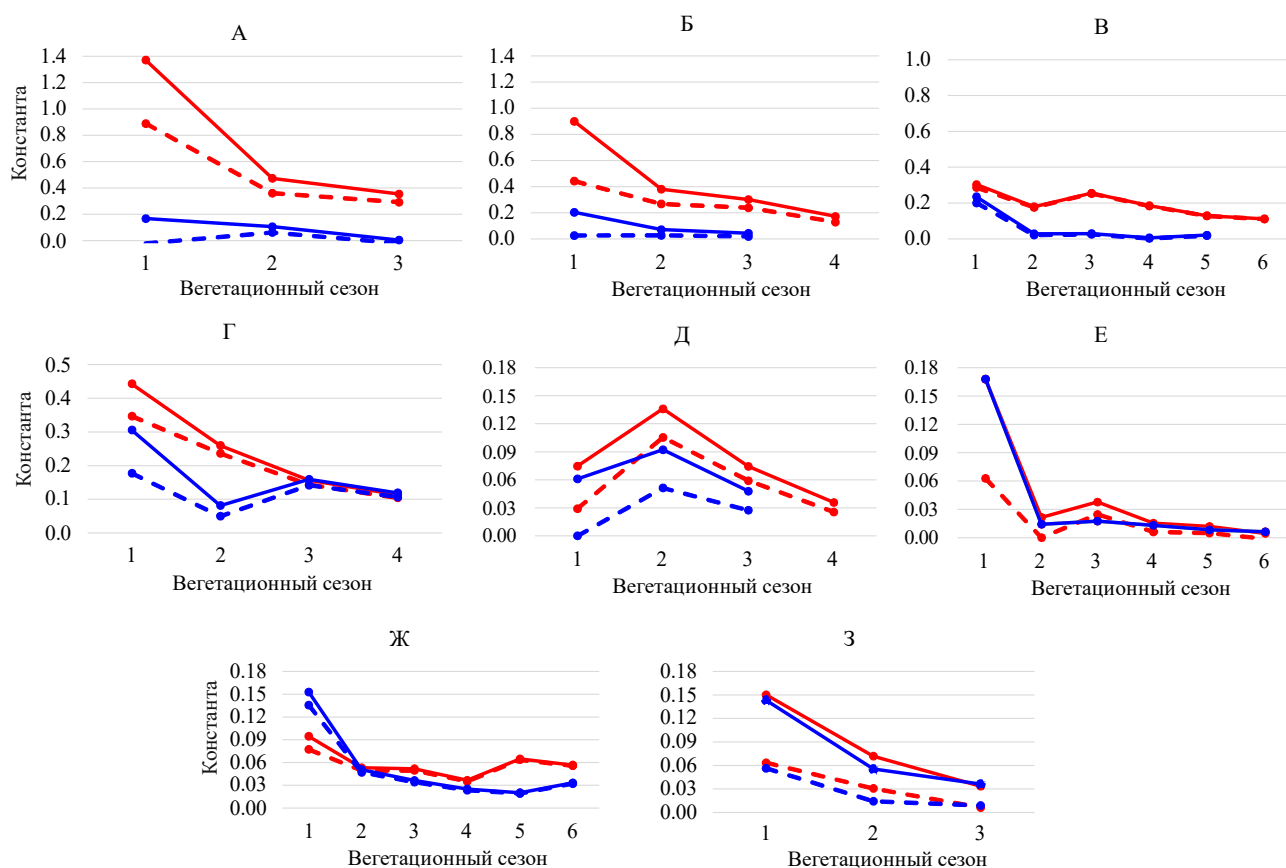


Рисунок 5. Константы разложения торфа в болотах Плотниково и Пангоды: — на глубине 5–10 см, включая инициальное выщелачивание; - - - на глубине 5–10 см без учёта инициального выщелачивания; — на глубине 25–30 см, включая инициальное выщелачивание; - - - на глубине 25–30 см без учёта инициального выщелачивания. Ключевой участок, элемент болотного микрорельефа и год начала эксперимента: А – Плотниково, рям, 2006 г.; Б – Плотниково, гряда ГМК, 2006 г.; В – Плотниково, рям, 2007 г.; Г – Плотниково, ПЧТ, 2006 г.; Д – Плотниково, мочажина ГМК, 2006 г.; Е – Плотниково, ПЧТ, 2007 г.; Ж – Плотниково, ЦЧТ, 2007 г.; З – Пангоды, бугор, 2009 г.

Значение качества субстрата для деструкции торфа выявили по результатам экспериментов на ключевых участках Мухрино и Пангоды. В данном эксперименте косвенным признаком качества субстрата (т.е. химического состава, который определяет соотношение легко- и трудноразлагаемых компонентов) стала степень разложения торфа. В повышенных элементах микрорельефа среднетаёжного болота Мухрино местный фускум-торф разной степени разложения инкубировали в ряме и гряде ГМК. Через год потери в двух случаях из трёх не превысили 13,3%, т.е. были связаны с инициальным выщелачиванием; исключением стали потери массы торфа средней степени разложения ($r = 20\%$) в поверхностном слое рям, которые достигли 31,2% (рис. 6 А). Через два года потери из поверхностного слоя выросли в ряме до 39,5% у торфа с низкой степенью разложения и до 56,6% – со средней, а на гряде ГМК они составили 7,8% ($r = 5\%$). В то же время, в нижележащем слое этих же сообществ высокая потеря массы (27,6%) была у среднеразложившегося торфа, а у остальных – около 9%. Таким образом, самые высокие потери в средней тайге, которые превысили таковые для болот лесостепи и южной тайги, наблюдались в образцах торфа с $r = 20\%$.

На буграх болота Пангоды торф с высокой степенью разложения также более интенсивно терял массу в ходе деструкции: через три года потери сильноразложившегося торфа в трёх локациях из четырёх составили 12,4–13,4%, а слаборазложившегося – от 4,8 до 7,6% (рис. 6 В). Отметим, что эти потери находились в пределах инициального выщелачивания; увеличение снижения массы торфа с более высокой степенью разложения может быть связано с ростом объёма мелких частиц, которые физически вымывались сквозь ячеи мешочков. Потери массы торфа за год в межкочечном лишайниковом понижении были выше, чем на сфагновых кочках, но стали сравнимы в слое 5–10 см через три года.

В пониженных элементах микрорельефа среднетаёжного болота Мухрино потери торфа с более высокой степенью разложения через год деструкции были выше по сравнению с менее разложившимся торфом: 18,7% против 10 % в поверхностном слое и 10% против 8,5% в нижележащем (рис. 6 Б). В течение дальнейшего времени потери здесь менялись слабо с тенденцией к снижению, однако значимой разницы между временными точками (отборами) на обеих глубинах не установлено. Достоверная разница выявлена между потерями массы местного торфа с $r = 25\%$ и торфа из Бакчарского болота с $r = 15\%$ ($p = 0,0003$). В мочажинах лесотундрового болота Пангоды наибольшие потери наблюдались у торфа с $r = 40\%$, однако наименьшие потери также оказались у торфа с высокой степенью разложения ($r = 30\%$), а не с минимальной (рис. 6 Г). При этом потери находились в пределах инициального выщелачивания (от 3,6 до 17,6% за два вегетационных сезона). Разница в потере массы торфа разных видов через два и три года деструкции была почти во всех случаях значимой ($p < 0,05$). Интересно, что через три и четыре года эксперимента потери снизились, что вероятно связано с прорастанием живых корней и их отмиранием в образцах, что отмечено ранее для обводнённых болотных местообитаний с развитым травяным покровом (Коронатова, Шибарева, 2010).

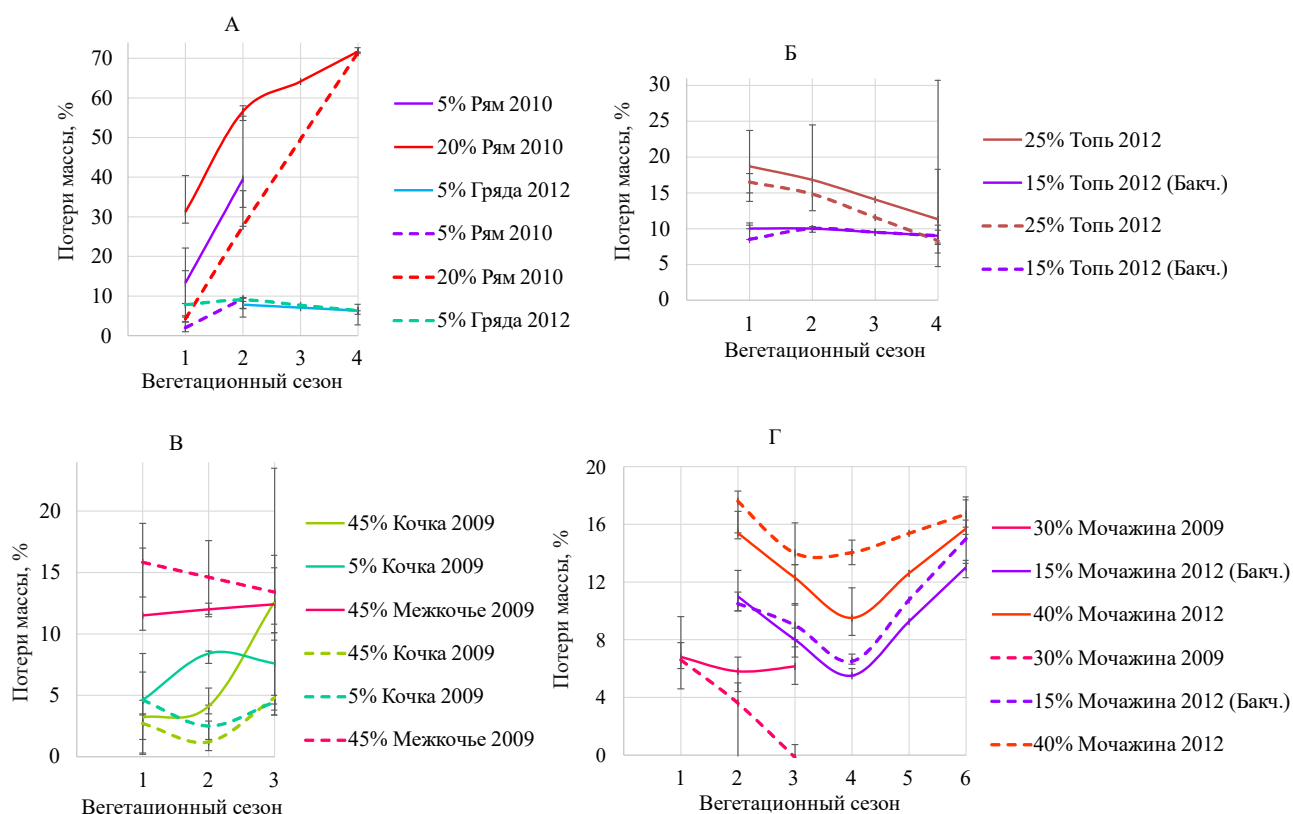


Рисунок 6. Потери массы торфа с разной степенью разложения в различных болотах. А – повышенные элементы микрорельефа ключевого болота Мухрино, Б – пониженные элементы микрорельефа ключевого болота Мухрино, В – повышенные элементы микрорельефа ключевого болота Пангоды, Г – пониженные элементы микрорельефа ключевого болота Пангоды. Условные обозначения разных цветов показывают локацию, исходную степень разложения торфа и год начала эксперимента, а также привезённый для эксперимента торф из Бакчарского болота (в скобках). Глубина инкубации: сплошная линия – 5–10 см, пунктирная линия – 25–30 см. Приведены медианные значения, «усы» показывают межквартильный размах в пределах 25–75%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Инициальное выщелачивание из образцов торфа Бакчарского болота, заложенных в южной тайге и лесотундре, составило от 0 до 19,5% по медиане (и 0–15% в среднем), что сходно с результатами для растительного материала другого качества, для которого оно варьировало от 3 до 18% (Teickner et al., 2025). При этом потери более 8% объясняли циклами замораживания-оттаивания, которые разрушают клеточные стенки растений (Limpen, Berendse, 2003). Поскольку инициальное выщелачивание в данном эксперименте проходило в летний период, наибольшие потери 2006 года в поверхностном слое рья (19,5%) и нижнем слое ЦТТ (медианное значение 11% с разбросом от 2 до

30%) скорее связаны с началом деструкции микроорганизмами. Это предположение косвенно подтверждено дальнейшими быстрыми и максимальными потерями массы торфа именно в этих локациях.

Ранее было показано для листьев разных видов растений, что существуют значительные различия в инициальном разложении между свежими и высушенными образцами, причём свежие практически не теряли массы в течение 10 дней погружения в воду, в то время как высушенные на воздухе теряли от 20 до 25% (Gessner, Schwoerbel, 1989); колонизация листьев грибами была также ниже у свежих листьев (Bärlocher, 1997). Сходные результаты получены и для торфа, потери массы которого были выше у высушенных образцов, но эта разница нивелировалась через год (Коронатова, 2010). В данной работе разница в потерях при инициальном выщелачивании на ключевом участке Плотниково была выявлена для высушенных образцов, заложенных в эксперимент в разные годы (2006 и 2007 гг.); эта разница не зависела от элемента микрорельефа и вида торфа. Это демонстрирует, что на инициальные потери влияет не только способ обработки торфа перед началом эксперимента, но и другие факторы. Погодные условия в июне 2006 и 2007 гг. отличались: в 2007 г. УБВ был чрезвычайно высок, а температура воздуха ниже, чем в 2006 г. Поскольку в предыдущих исследованиях показано, что увеличение влажности почвы скорее способствует выщелачиванию (Lind et al., 2022), можно предположить, что причина заключается скорее в температуре, среднее значение которой составило 19,9°C в 2006 г. и 15,7°C в 2007 г. Это соответствует результатам Lind et al. (2022), которые обнаружили, что инициальное выщелачивание увеличивается с повышением температуры. В то же время, в болоте Пангоды в период первичного выщелачивания в августе средняя температура воздуха была 13,0°C, что ниже, чем в Плотниково в 2007 г., а потери массы в лесотундре были выше. Таким образом, можно констатировать влияние года на величину инициального выщелачивания, однако определяющие факторы не вполне понятны.

Изучение *деструкции торфа вдоль широтного градиента* ранее не проводилось, результаты впервые представлены в нашей работе. За время наблюдений наибольшие потери массы торфа произошли в лесостепной и южнотаёжной зонах в торфяных почвах повышенных элементов микрорельефа на глубине 5–10 см. В пониженных элементах микрорельефа этих же ключевых участков масса торфа интенсивно снижалась на обеих глубинах, причём потери в нижележащем слое часто превышали потери из поверхностного слоя. Это соответствует данным Grover и Baldock (2010), которые связали потери торфа из более глубокого слоя, где наблюдалась флуктуация УБВ, с потребностью редуцентов как в кислороде, так и в воде. Потери массы торфа сопровождалось запаздыванием скорости разложения в отдельные годы. Это привело к тому, что разница в потерях одного типа торфа, заложенного в разные годы в одном сообществе, составила 3–4,5 раза после первого вегетативного сезона. Примером стали разные элементы микрорельефа южнотаёжного болота Плотниково, а также среднетаёжное болото Мухрино. В средней тайге потери массы в поверхностном слое рья в зависимости от года начала эксперимента были либо сходны с потерями в более южных болотах, либо оставались на уровне инициального выщелачивания и стали возрастать лишь через три года деструкции. В южной тайге потеря массы стабилизировалась через три года инкубации, остановившись на уровне около 50% от исходной в повышенных элементах микрорельефа и около 30% – в пониженных. В обводнённых топях и мочажинах юга Западной Сибири такая стагнация наблюдалась иногда через пять лет и более. В средней, северной тайге и лесотундре потери массы торфа в обводнённых понижениях не превысили 13,5% на протяжении ряда лет, что соответствует потерям при инициальном выщелачивании и свидетельствует о подавлении биологической деструкции. В то же время, в мочажине мерзлотного болота Пангоды потери стали возрастать через шесть лет эксперимента. Такие запаздывания начала потери массы в разных элементах микрорельефа и болотах свидетельствуют о позднем включении сообщества деструкторов, которым необходима длительная подготовка к разложению трудноразлагаемого торфяного субстрата (Del Guidice, Lindo, 2017). Полученные результаты указывают на необходимость проводить длительные наблюдений *in situ*, рассчитанные на десять и более лет.

Проведенные исследования выявили нетипичные траектории потери массы со временем, которые часто включали длительную начальную задержку. Длительность отсрочки перед началом биологического разложения увеличилась на северных болотах и в обводнённых понижениях. Ранее для анализа данных и моделирования применяли экспоненциальную модель разложения, предполагающую постоянную относительную скорость деструкции во времени. В соответствии с традиционной экспоненциальной моделью, значение константы разложения обычно постепенно снижается со временем, если в эксперименте участвуют отдельные виды болотных растений (например, Головацкая, Никонова, 2017). В нашем эксперименте изменение константы со временем в

соответствии с консервативными представлениями наблюдалось только на болоте Пангоды и, в определённой степени, в поверхностном слое повышенных элементов микрорельефа болота Плотниково в 2006 г. В остальных случаях значение константы возрастало через 2–3 года, а иногда 5 лет после окончания периода задержки. Согласно опубликованным данным, в настоящее время представлен широкий спектр возможных динамик разложения, встречающихся в природе, для которых экспоненциальная модель плохо описывает данные (Manzoni et al., 2012; Cornwell, Weedon, 2014). Установлено, что различия в траекториях обусловлены исходным химическим составом, распределением возраста компонентов образца и различиями в абиотической среде (Manzoni et al., 2012), а широко распространенная фаза задержки связана с низким содержанием азота (Cornwell, Weedon, 2014). Содержание азота в торфе, использованном в данном эксперименте, действительно низко, а соотношение C/N широко и чаще мало менялось через год деструкции (Коронатова, 2025). Известно, что перед распадом более трудноразлагаемых углеродных субстратов имеется период подготовки деструкторов, в течение которого рост и активность сообщества микроорганизмов стимулируется поступлением лабильного углерода (Del Guidice, Lindo, 2017). Поэтому в более обводнённых и холодных локациях требуется больше времени для начала биологического разложения торфа.

Влияние качества субстрата и элемента микрорельефа на скорость деструкции торфа. Качество субстрата, то есть соотношение легко- и трудноразлагаемых компонентов, является более значимым фактором эффективности и скорости разложения, чем температура и влажность (Семенов и др., 2022), а распределение компонентов разного возраста в начале разложения, определяемое предыдущей историей поступления веществ, является наиболее важным фактором дальнейшего хода деструкции (Manzoni et al., 2012). Общеизвестно, что скорость потери массы различными видами и фракциями растений при деструкции снижается со временем и с увеличением степени разложения, поскольку происходит относительное накопление трудноразлагаемых компонентов. Поэтому мы ожидали, что торф с более высокой степенью разложения будет разлагаться медленнее, но полученные в нашей работе результаты продемонстрировали обратное. Во всех четырёх локациях (повышенные и пониженные элементы микрорельефа среднетаёжного и лесотундрового болота) потери массы торфа с наибольшей степенью разложения превысили потери массы торфа с наименьшей степенью разложения. В том случае, когда потери массы сильноразложившихся образцов превышали 15% от исходной, они определялись не только инициальным выщелачиванием, но и функционированием сообщества микроорганизмов. Эти результаты позволяют предположить, что в глубоких обводнённых слоях торфяных почв продолжают процессы трансформации органических компонентов, что приводит к накоплению легкоразлагаемых соединений, которые сохраняются в анаэробных условиях, но становятся доступными для деструкторов, оказавшись в аэробной зоне. Если торф в глубине торфяной залежи остался слаборазложившимся, то накопления легкоразлагаемых компонентов не происходит и такой торф какое-то время недоступен для деструкции в аэробных условиях. Не исключено также, что сильноразложившемуся торфу характерны более высокие потери при инициальном выщелачивании. Эти предположения требуют дальнейшего экспериментального и аналитического подтверждения.

Роль элемента микрорельефа для деструкции одного и того же торфа в один год показана на ключевых участках в южной тайге и лесотундре. В южной тайге потери массы торфа в ряме превысили потери в рямовом сообществе гряды ГМК, а потери в топи были существенно выше, чем в мочажине ГМК. Это может объясняться как гидротермическими различиями (высокий УБВ и более холодные почвы в ГМК), так и различиями в составе деструкторов. В лесотундре потери массы при деструкции торфа были значимо выше в холодном межкочечном понижении с лишайником, чем на хорошо прогреваемой сфагновой кочке. Причина, вероятно, связана с сообществом деструкторов, которое лучше развито в межкочечных понижениях с лишайником, о чём свидетельствует активное разложение нижних отмирающих частей таллома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закономерности деструкции торфа являются слабоизученным, но важным направлением исследований, которое может стать основой для прогнозирования поведения болотных экосистем при естественных и антропогенных воздействиях (климатических изменениях, пожарах, осушении), ведущих к понижению уровня болотных вод и возникновению аэробных условий в катотельме.

Полученная оценка инициального выщелачивания торфа (0–19,5%) соответствует таковой для других растительных материалов. Инициальное выщелачивание одного вида торфа в одних и тех же локациях в разные годы начала эксперимента значимо различаются. Вероятной причиной являются

гидрологические и погодные условия, что требует дальнейшего изучения. Соответствующие константы разложения с учётом выщелачивания и без него демонстрируют разницу, которую необходимо принимать во внимание.

Эксперимент по деструкции вдоль широтного градиента показал, что в болотах южной части Западной Сибири торф быстрее включается в процесс биологического разложения. При этом максимальные потери массы наблюдаются в поверхностном слое залежи повышенных элементов микрорельефа лесостепи, южной и средней тайги (около 50%), а меньшие потери – на обеих глубинах обводнённых местообитаний южной тайги (около 30%); после достижения указанного уровня потерь масса перестаёт снижаться. Потери массы в нижележащем слое повышенных элементов микрорельефа и в обводнённых понижениях северной части Западной Сибири, в основном, остаются на уровне инициального выщелачивания. Характерной особенностью потерь при деструкции торфа стало наличие периода начальной задержки, которая увеличивалась от южных к северным болотам и достигала длительности в нескольких лет. Такая задержка в одном и том же болоте могла возникать при запуске эксперимента в одни годы и отсутствовать – в другие.

В одних и тех же элементах микрорельефа потери массы торфа с более высокой степенью разложения больше по сравнению с торфом с низкой степенью разложения. В пределах одного болотного комплекса потеря массы одного и того же вида торфа значимо различалась в аналогичных местообитаниях: между рямом и грядой ГМК; топью и мочажинной ГМК в сфагновом олиготрофном болоте; сфагновой кочкой и лишайниковым понижением на мерзлотном бугре, что может быть связано с отличиями в гидротермических условиях и составе сообщества деструкторов.

Выполненная нами работа подчёркивает необходимость дальнейших исследований, включающих проведение длительных многолетних экспериментов, определение химического статуса субстрата перед началом инкубации и на разных её этапах, выявление состава сообщества деструкторов, что, несомненно, позволит приблизиться к пониманию механизмов, управляющих скоростью и траекторией деструкции торфа.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Динамика разложения растений на болотах Васюганья // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7 (122). С. 87–93.
- 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/S0032180X17030030>
- Головченко А.В., Санникова Ю.В., Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г. Сапротрофный бактериальный комплекс верховых торфяников Западной Сибири // Микробиология. 2005. Том 74. № 4. С. 545–551.
- Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Кухаренко О.С., Якушев А.В., Семенова Т.А., Инишева Л.И. Структура микробных сообществ верховых и низинных торфяников Томской области // Почвоведение. 2012. № 3. С. 317–326. <https://doi.org/10.1134/S1064229312030039>
- Дурынина Е.П., Егоров В.С. Агрохимический анализ почв, растений, удобрений. Москва: Изд-во МГУ, 1998. 113 с.
- Коронатова Н.Г. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Том 1. № 1. С. 77–84. <https://doi.org/10.17816/edgcc1177-84>
- Коронатова Н.Г. Изменение элементного состава и содержания низкомолекулярных органических соединений в ходе экспериментальной деструкции торфа в южно-таёжных болотах Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. е308. <https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.308>
- Коронатова Н.Г., Шибарева С.В. Изменение массы торфа в процессе его разложения на болотах Польши и Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2010. Том 17. № 3. С. 445–451.
- Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жмурин В.А., Головацкая Е.А. Оценка влияния температуры на скорость разложения растений-торфообразователей в условиях длительного модельного эксперимента // Почвы и окружающая среда. 2018. Том 1. № 4. С. 256–266. <https://doi.org/10.31251/pos.v1i4.42>

- Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1092–1103. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065>
- Почикалов А.В., Карелин Д.В. Окологодичные наблюдения за разложением опада тундровых растений через потерю массы и эмиссию CO₂: роль биотических и абиотических факторов, сезонов года, биотопа и пространственно-временного масштаба // Журнал общей биологии. 2014. Том 75. № 3. С. 163–181.
- Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Хромычкина Д.П., Соколов Д.А., Лопес де Гереню В.О., Кравченко И.К., Ли Х., Семенов М.В. Зависимость разложения органического вещества почвы и растительных остатков от температуры и влажности в длительных инкубационных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 860–875. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070085>
- Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения. Под ред. А.С. Оленина. Москва: Недра, 1976. 488 с.
- Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes // Journal of Ecology. 2006. Vol. 94. No. 4. P. 713–724. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01142.x>
- Bärlocher E. Pitfalls of traditional techniques when studying decomposition of vascular plant remains in aquatic habitats // Limnetica. 1997. Vol. 13. No. 2. P. 1–11.
- Clymo R.S. The limits to peat bog growth // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences. 1984. Vol. 303. No. 1117. P. 605–654. <https://doi.org/10.1098/rstb.1984.0002>
- Cornwell W.K., Weedon J.T. Decomposition trajectories of diverse litter types: a model selection analysis // Methods in Ecology and Evolution. 2014. Vol. 5. No. 2. P. 173–182. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12138>
- Del Guidice R., Lindo Z. Short-term leaching dynamics of three peatland plant species reveals how shifts in plant communities may affect decomposition processes // Geoderma. 2017. Vol. 285. P. 110–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.028>
- Frolking S., Roulet N.T., Moore T.R., Richard P.J.H., Lavoie M., Muller S.D. Modelling northern peatland decomposition and peat accumulation // Ecosystems. 2001. Vol. 4. P. 479–498. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0105-1>
- Gessner M., Schwoerbel J. Leaching kinetics of fresh leaf litter with implications for the current concept of leaf-processing in streams // Archiv für Hydrobiologie, 1989. Vol. 115. No. 1. P. 81–90.
- Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon decomposition processes in a peat from the Australian Alps // European Journal of Soil Science. 2010. Vol. 61. No. 2. P. 217–230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01220.x>
- Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon chemistry and mineralization of peat soils from the Australian Alps // European Journal of Soil Science. 2012. Vol. 63. No. 2. P. 129–140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01424.x>
- Limpens J., Berendse F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum* // Oikos. 2003. Vol. 103. No. 3. P. 537–547. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12707.x>
- Lind L., Harbicht A., Bergman E., Edwartz J., Eckstein R.L. Effects of initial leaching for estimates of mass loss and microbial decomposition — Call for an increased nuance // Ecology and Evolution. 2022. Vol. 12. No. 8. e9118. <https://doi.org/10.1002/ece3.9118>
- Louis V.L.St., Partridge A.D., Kelly C.A., Rudd J.W.M. Mineralisation rates of peat from eroding peat islands in reservoirs // Biogeochemistry. 2003. Vol. 64. P. 97–110. <https://doi.org/10.1023/A:1024982915493>
- Manzoni S., Piñeiro G., Jackson R.B., Jobbágy E.G., Kim J.H., Porporato A. Analytical models of soil and litter decomposition: Solutions for mass loss and time-dependent decay rates // Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 50. P. 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.029>
- Müller R., Zahorka A., Holawe F., Inselsbacher E., Glatzel S. Incubation of ombrotrophic bog litter and mixtures of *Sphagnum*, *Betula* and *Calluna*: results in the formation of single litter-specific decomposition patterns // Geoderma. 2023. Vol. 440. 116702. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116702>
- 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>
- Teickner H., Pebesma E., Knorr K.-H. A synthesis of *Sphagnum* litterbag experiments: initial leaching losses bias decomposition rate estimates // Biogeosciences. 2025. Vol. 22. No. 2. P. 417–433. <https://doi.org/10.5194/bg-22-417-2025>

Turetsky M.R., Crow S.E., Evans R.J., Vitt D.H., Weider R.K. Trade-offs in resource allocation among moss species control decomposition in boreal peatlands // Journal of Ecology. 2008. Vol. 96. No. 6. P. 1297–1305. <https://www.jstor.org/stable/20143576>

Поступила в редакцию 15.03.2026

Принята 21.06.2026

Опубликована 28.07.2026

Сведения об авторе:

Коронатова Наталья Геннадьевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); coronat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0557-0083>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

Peat mass losses as depending on habitat and latitude during experimental decomposition in the mires of West Siberia

© 2026 N. G. Koronatova 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: coronat@mail.ru

The aim of the study was to reveal patterns of changes in peat mass during experimental decomposition, accounting for initial leaching and depending on substrate quality, habitat and latitude.

Location and time of the study. The field experiments were carried out in bogs and poor fens across various zones and subzones of West Siberia, from forest-steppe to forest-tundra. In all mire complexes, experiments were set up simultaneously in elevated habitats (pine - dwarf shrub - *Sphagnum* microlandscapes, ridges of ridge-hollow complexes, permafrost palsas) and lower habitats (waterlogged hollows and poor fens). Experiments began between 2006 and 2012 lasted from three to six years in different mires.

Methods. Peat mass losses were assessed using the traditional litterbag technique. Bags were placed in peat at the depths of 5–10 and 25–30 cm, and in some cases at the depth of 45–50 cm. Peat sampled from elevated and depressed habitats was returned to the same or similar locations in other biogeocenoses. Sampling occurred at certain intervals with 4–8 replicates. Fuscum-peat was used in elevated habitats, whereas hollow peat with varying degrees of decomposition was used in depressed habitats. Peat from Bakchar Bog served to compare decomposition rates across bioclimatic zones. The decomposition rate was calculated from mass loss percentage and the decomposition rate constant. Statistical analyzes included descriptive statistics and nonparametric tests for comparison between experimental treatments.

Results. Initial median leaching ranged from 0 to 19,5% of the initial mass. For the same peat type in identical locations, leaching varied significantly across years. Decomposition constants without leaching were one and half times higher than those corrected for leaching. Maximum mass losses occurred in surface layers of elevated habitats in forest-steppe, southern, and middle taiga zones (40–55%), with smaller losses (31–33%) at both depths in waterlogged southern taiga habitats. Beyond this point, mass loss plateaued. In deep layers of elevated habitats in the south of West Siberia and in mire in the Siberian north, losses remained at initial leaching levels. A key feature of peat mass loss was an initial lag phase, lengthening from southern to northern bogs (up to 5 years). Within habitats, more decomposed peat lost more mass than less decomposed peat and often remained within the initial leaching values. Losses of the same peat type significantly varied between similar habitats within a single mire: pine - dwarf shrub - *Sphagnum* bog vs. ridge of ridge-hollow complexes and poor fen vs. hollow in ombrotrophic mire, and *Sphagnum* hummock vs. lichen depression in palsas.

Conclusions. Studying peat decomposition remains underexplored yet crucial for predicting wetland ecosystem responses to natural and anthropogenic factors (climate change, fires, drainage) that lower water table and promote aerobic conditions in catotelm. This experiment studying peat decomposition along a latitudinal gradient showed that in mires in the south of West Siberia peat is more rapidly involved in biological decomposition. Future research should include long-term, multi-year experiments, chemical substrate analyses prior and at different stages of decomposition, as well as decomposers' community composition: all these will help a better insight of the mechanisms driving peat decomposition rate and trajectory.

Keywords: fibrist histisol; cryic histisol; initial leaching losses; initial lag phase; raised bog; palsa; litter-bag technique.

How to cite: Koronatova N.G. Peat mass losses depending on habitat and latitude during experimental decomposition in the mires of West Siberia. 2026. 9(3). e359. DOI: [10.31251/pos.v9i3.359](https://doi.org/10.31251/pos.v9i3.359) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

- Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P. Decomposition dynamics of plants of bogs (data: Vasyugan bog). Tomsk State Pedagogical University Bulletin. 2012. No. 7(122). P. 87–93. (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. No. 5. P. 580–588. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Golovchenko A.V., Sannikova Yu.V., Dobroval'skaya T.G., Zvyagintsev D.G. The saprotrophic bacterial complex in the raised peat bogs of Western Siberia. Microbiology. 2005. Vol. 74. No. 4. P. 471–476. <https://doi.org/10.1007/s11021-005-0091-y>
- Dobroval'skaya T.G., Golovchenko A.V., Kukharensky O.S., Yakushev A.V., Semenova T.A., and Inisheva L.A. The structure of the microbial communities in low-moor and high-moor peat bogs of Tomsk Oblast. Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45. No. 3. P. 273–281. <https://doi.org/10.1134/S1064229312030039>
- Durygina E.P., Egorov V.S. Agrochemical analysis of soil, plants, and fertilizers. Moscow: Moscow State University Press, 1998. 113 p. (in Russian).
- Koronatova N.G. Investigation of peat decomposition in bogs by method of dry and wet samples incubation. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 77–84. (in Russian). <https://doi.org/10.17816/edgcc1177-84>
- Koronatova N.G. Changes in the elemental composition and content of low molecular organic compounds during experimental peat destruction in the southern taiga bogs (West Siberia). The Journal of Soils and Environment. 2025. Vol. 8 No. 1. e308. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.308>
- Koronatova N.G., Shibareva S.V. Change of peat mass during decomposition in mires of Poland and West Siberia. Contemporary Problems of Ecology. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 312–317. <https://doi.org/10.1134/S1995425510030094>
- Nikonova L.G., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu Vol.O., Zhmurin Vol.A., Golovatskaya E.A. Estimate of temperature effect on the decomposition rate of peat-forming plants in a long-term laboratory experiment. The Journal of Soils and Environment. 2018. Vol. 1. No. 4. P. 256–266 (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v1i4.42>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1134/S1064229319090060>
- Pochikalov A.V., Karelin D.V. A field study of tundra plant litter decomposition rate via mass loss and carbon dioxide emission: the role of biotic and abiotic controls, biotope, season of year, and spatial-temporal scale. Journal of General Biology. 2014. Vol. 75. No. 3. P. 163–181.
- Semenov V.M., Lebedeva T.N., Zinyakova N.B., Khromyckina D.P., Sokolov D.A., Lopes de Gerenyu Vol.O., Kravchenko I.K., Li H., Semenov M.V. Dependence of soil organic matter and plant residues decomposition on temperature and moisture in the long-term incubation experiments. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No 7. C. 926–939. <https://doi.org/10.1134/s1064229322070080>
- Tyuremnov S.N. Peat deposits. A.S. Olenin (ed.). Moscow: Nedra, 1976. 488 p. (in Russian).
- Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. Journal of Ecology. 2006. Vol. 94. No. 4. P. 713–724. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01142.x>
- Bärlocher E. Pitfalls of traditional techniques when studying decomposition of vascular plant remains in aquatic habitats. Limnetica. 1997. Vol. 13. No. 2. P. 1–11.
- Clymo R.S. The limits to peat bog growth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences. 1984. Vol. 303. No. 1117. P. 605–654.
- Cornwell W.K., Weedon J.T. Decomposition trajectories of diverse litter types: a model selection analysis. Methods in Ecology and Evolution. 2014. Vol. 5. No. 2. P. 173–182. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12138>
- Del Guidice R., Lindo Z. Short-term leaching dynamics of three peatland plant species reveals how shifts in plant communities may affect decomposition processes. Geoderma. 2017. Vol. 285. P. 110–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.028>

- Frolking S., Roulet N.T., Moore T.R., Richard P.J.H., Lavoie M., Muller S.D. Modelling northern peatland decomposition and peat accumulation. *Ecosystems*. 2001. Vol. 4. P. 479–498. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0105-1>
- Gessner M., Schwoerbel J. Leaching kinetics of fresh leaf litter with implications for the current concept of leaf-processing in streams. *Archiv für Hydrobiologie*, 1989. Vol. 115. No. 1. P. 81–90.
- Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon decomposition processes in a peat from the Australian Alps. *European Journal of Soil Science*. 2010. Vol. 61. No. 2. P. 217–230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01220.x>
- Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon chemistry and mineralization of peat soils from the Australian Alps. *European Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 63. No. 2. P. 129–140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01424.x>
- Limpens J., Berendse F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum*. *Oikos*. 2003. Vol. 103. No. 3. P. 537–547. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12707.x>
- Lind L., Harbicht A., Bergman E., Edwartz J., Eckstein R.L. Effects of initial leaching for estimates of mass loss and microbial decomposition — Call for an increased nuance. *Ecology and Evolution*. 2022. Vol. 12. No. 8. e9118. <https://doi.org/10.1002/ece3.9118>
- Louis V.L.St., Partridge A.D., Kelly C.A., Rudd J.W.M. Mineralisation rates of peat from eroding peat islands in reservoirs. *Biogeochemistry*. 2003. Vol. 64. P. 97–110. <https://doi.org/10.1023/A:1024982915493>
- Manzoni S., Piñeiro G., Jackson R.B., Jobbágy E.G., Kim J.H., Porporato A. Analytical models of soil and litter decomposition: Solutions for mass loss and time-dependent decay rates. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 50. P. 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.029>
- Müller R., Zahorka A., Holawe F., Inselsbacher E., Glatzel S. Incubation of ombrotrophic bog litter and mixtures of *Sphagnum*, *Betula* and *Calluna*: results in the formation of single litter-specific decomposition patterns. *Geoderma*. 2023. Vol. 440. 116702. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116702>
- 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>
- Teickner H., Pebesma E., Knorr K.-H. A synthesis of *Sphagnum* litterbag experiments: initial leaching losses bias decomposition rate estimates. *Biogeosciences*. 2025. Vol. 22. No. 2. P. 417–433. <https://doi.org/10.5194/bg-22-417-2025>
- Turetsky M.R., Crow S.E., Evans R.J., Vitt D.H., Weider R.K. Trade-offs in resource allocation among moss species control decomposition in boreal peatlands. *Journal of Ecology*. 2008. Vol. 96. No. 6. P. 1297–1305. <https://www.jstor.org/stable/20143576>

Received 15 March 2026

Accepted 21 June 2026

Published 28 July 2026

About the author:

Natalia G. Koronatova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); coronat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0557-0083>

The author read and approved the final manuscript



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