

УДК 551.312.2+571.16

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>

Трансформация торфяной залежи и накопление углерода на постпирогенных верховых болотах таёжной зоны Западной Сибири

© 2024 А. А. Синюткина , А. В. Оленникова , Л. Ю. Сун-зу-ли , Л. П. Гашкова 

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина 3, г. Томск, 634050, Россия.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Цель исследования. Оценка трансформации водно-физических свойств торфяной залежи и интенсивности торфонакопления на постпирогенных участках осушенных верховых болот таёжной зоны Западной Сибири.

Место и время проведения. Полевые исследования проведены в 2022 году на верховых Бакчарском (участок гидроресомелиорации, 7 площадок) и Усть-Бакчарском (участок, осушенный для добычи торфа, 3 площадки) болотах, расположенных в Томской области.

Методы. Отбор проб торфа проведён из двух скважин на каждой площадке в понижении и повышении микрорельефа. Шаг отбора составлял 5 см, глубина отбора 45–90 см. Методом конверта в девяти точках на каждой площадке выполнен отбор образцов торфа в слое 0–30 см с шагом 10 см для лабораторного определения влажности. Торф охарактеризован по следующим параметрам: влажность (ГОСТ 11306-2013), зольность (ГОСТ 11306-2013), степень разложения и ботанический состав (ГОСТ 28245-89), степень гумификации и насынная кислотности торфа. Расчёт запасов углерода в верхнем слое торфяной залежи проведён с использованием значений зольности и плотности образцов торфа.

Основные результаты. Торфяная залежь верхних горизонтов образована преимущественно сфагновыми торфами с преобладанием в составе растительных остатков *Sphagnum fuscum*. Выявлены различия в свойствах торфа между положительными и отрицательными формами, проявляющиеся до глубины 5–15 см от поверхности понижений. Выгорание понижений привело к трансформации всех свойств торфа до глубины 10–15 см, но в большей степени выражено в увеличении зольности, значения которой в слое 0–5 см в 1,5–9 раз выше в сравнении с фоновым участком. Трансформация свойств торфа на положительных формах рельефа – моховых подушках – в меньшей степени проявляется в верхнем слое 0–5 см, но характеризуется большей глубиной, достигающей 30 см. Трансформация выражена, главным образом, в увеличении зольности, за счёт миграции зольных элементов с поверхности горелых понижений, и плотности, вследствие проседания моховых подушек с погибшим сфагновым мхом. При схожих средних значениях влажности между постпирогенными и фоновыми площадками, составляющими 90–91% в слое 0–30 см, наблюдаются различия в распределении значений по формам микрорельефа. Для постпирогенной площадки на Бакчарском болоте характерно снижение влажности в понижениях и на положительных формах; максимальные значения наблюдаются на высоте около средней поверхности. На Усть-Бакчарском болоте влажность уменьшается от отрицательных форм к положительным. На Бакчарском болоте через 30 лет после пожара аккумуляция торфа происходит только на положительных формах; толщина слоя, сформировавшегося после пожара, достигает 35 см. С учётом неоднородности микрорельефа аккумуляция углерода в период после пожара оценивается в 1,9 кг С/м² или 60 г С/м² в год. На Усть-Бакчарском болоте аккумуляция торфа происходит значительно медленнее и отсутствует на большей части поверхности. Среднее значение оценивается в 7 г С/м² в год.

Заключение. Выгоранию наиболее подвержены отрицательные формы микрорельефа. Через 6–8 лет после пожара его последствия проявляются в обсыхании верхнего слоя торфяной залежи, что препятствует интенсивному зарастанию сфагновыми мхами. На участке лесомелиорации на Бакчарском болоте аккумуляция торфа через 30 лет после пожара на положительных формах сопоставима по интенсивности с невыгоревшими участками.

Ключевые слова: торфяные почвы; микрорельеф; природный пожар; влажность; зольность; степень гумификации; степень разложения; плотность торфа.

Цитирование: Синюткина А.А., Оленникова А.В., Сун-зу-ли Л.Ю., Гашкова Л.П. Трансформация торфяной залежи и накопление углерода на постпирогенных верховых болотах таёжной оны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e246. DOI: [10.31251/pos.v7i1.246](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246).

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех типов почв торфяные болотные почвы характеризуются максимальными запасами углерода (150–330 т/га). Углеродный пул этих почв оценивается в 33 Гт, что составляет около 20% общих запасов углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв всей территории России (Чернова и др., 2021). Мощным внешним фактором воздействия на болотные экосистемы являются пожары, представляющие собой один из наиболее значимых агентов потерь углерода торфяными почвами (Глухова, Сирина, 2018; Ефремова и др., 2021; Lin et al., 2021). В связи с отмеченными климатическими изменениями и увеличением антропогенной нагрузки, частота и интенсивность пожаров на болотах растут во всем мире (Глухова, Сирина, 2018; Moore et al., 2017; Feurdean et al., 2020; Ackley et al., 2021; Lin et al., 2021; Marcotte et al., 2022). Пожары на сфагновых болотах существенно влияют на видовое богатство, структуру фитоценозов, темпы накопления биомассы. Воздействие пожаров может трансформировать экосистемы верховых болот из поглотителей углерода в источник не только за счет прямых его выбросов при сгорании биомассы, но и в результате долгосрочных изменений структуры растительного сообщества и функционирования экосистемы (Копотева, Купцова, 2016; Цыганов и др., 2018; Малащук, Филиппов, 2021). Одним из важных последствий пожара на болоте является формирование водоотталкивающего слоя в приповерхностных горизонтах торфа в результате их высыхания под воздействием испарения при экстремальных температурах (Kettridge et al., 2015). Содержание воды в верхних горизонтах торфяной залежи является одним из факторов, определяющих способность восстановления болотной растительности (Moore et al., 2017). Другим немаловажным фактором является увеличение зольности в верхнем слое торфа, которое может препятствовать росту сфагновых мхов из-за увеличения pH и минерализации субстрата (Marcotte et al., 2022). Пул органического углерода в торфяной залежи опосредованно проявляется в ряде показателей – степень разложения, зольность, плотность (Ефремова и др., 2016).

Вопрос постпирогенной динамики болот является наиболее изученным для сфагновых болот Канады (Benscoter et al., 2005; 2015; Benscoter, Vitt, 2008; Wieder et al., 2009; Thompson, Waddington, 2013). В России исследования пирогенно нарушенных торфяных почв сосредоточены в европейской части страны и, в основном, касаются оценок сильно нарушенных торфяных болот, используемых для добычи торфа или сельского хозяйства с низким уровнем болотных вод (Зайдельман, Романов, 2007; Вомперский и др., 2007). На болотах Западной Сибири исследования по оценке последствий пожара немногочисленны и касаются динамики растительности на осушенном участке Иксинского болота, выгоревшего в 1998 году (Базанов и др., 2002). В настоящее время на том же болоте проводится изучение процессов разложения остатков основных растений-торфообразователей в торфяной залежи (Головацкая и др., 2023).

Одним из основных вопросов в рамках исследований по оценке последствий природных пожаров на болотах является способность накопления углерода в результате постпирогенного восстановления компенсировать большие потери в ходе горения (Lukenbach et al., 2017). Необходима количественная оценка времени проявления реакции болотной экосистемы на пожар и траектории постпирогенной динамики пожаров (Ackley et al., 2021). Особенностью пожаров на болотах является высокая мозаичность выгорания, связанная с неоднородностью исходного микрорельефа поверхности. Поэтому оценка взаимодействий гидрологических условий, торфа и растительного покрова на выгоревших болотах с учетом неоднородности поверхности является одним из важных направлений в изучении постпирогенной динамики болотных экосистем.

Целью исследования является оценка трансформации водно-физических свойств торфяной залежи и интенсивности торфонакопления на постпирогенных участках осушенных верховых болот таёжной зоны Западной Сибири.

В рамках выполнения исследования поставлены следующие вопросы:

- 1) Насколько интенсивно происходит трансформация водно-физических свойств торфяной залежи после пожара и какова глубина ее трансформации на разных формах микрорельефа?
- 2) Каковы закономерности трансформации влажности верхних горизонтов торфяной залежи в зависимости от высоты микрорельефа, наличия горелого слоя, возраста гари и интенсивности осушения?
- 3) Возможно ли восстановление процесса торфонакопления до уровня невыгоревших болот на постпирогенных участках разного возраста?

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются два ключевых участка, расположенные в пределах осушенных и выгоревших частей Бакчарского (56°52' с.ш., 82°41' в.д.) и Усть-Бакчарского (57°34' с.ш., 82°16' в.д.) болот. Бакчарское болото является северо-восточным отрогом Большого Васюганского болота; расположено в бассейне р. Чая (левый приток р. Обь) на междуречной равнине рек Бакчар и Икса. Болото было осушено в 1980 г. с целью лесомелиорации сетью открытых каналов. Несмотря на низкий эффект лесомелиорации, осушение болота стало причиной возникновения пожаров, наиболее значительные из которых произошли в начале 1990-х гг. и в 2016 г. Площадь распространения пожара в 2016 г. составила около 5 км². Полевые исследования проведены на 6 постпирогенных площадках и одной невыгоревшей (табл. 1, рис. 1).

Усть-Бакчарское болото расположено на террасе р. Бакчар. Болото было осушено для добычи торфа в 1980-х гг., но было брошено, и добыча в пределах ключевого участка не проводилась. Низкий уровень болотных вод стал причиной возникновения серии пожаров в разные годы, в результате которых выгорела практически вся осушенная часть болота. Последний крупный пожар произошел в 2014 г. на площади 0,5 км². Исследования проведены на 3 площадках, все из которых в разные годы были подвержены выгоранию и в настоящее время находятся на разных стадиях восстановления. Растительный покров обоих ключевых участков до пожара был представлен сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Мощность торфяной залежи изменяется в пределах 2,5–3,3 м. Более подробное описание объектов исследования представлено в работах (Синюткина и др., 2018; 2024; Sinyutkina, 2021).

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Площадки	Год пожара	Доля выгорания поверхности, %	Амплитуда колебаний высот, см	Уровень болотных вод, см
Бакчарское болото				
BF1	2016	93	32,8	-24
BF2	2016	67	42,5	-20
BF3	2016	71	38,0	-16
BF4	2016	97	33,8	-26
BF5	2016	74	34,7	-26
BF6	1990	нет данных	44,2	-28
Вфон	-	-	51,0	-15
Усть-Бакчарское болото				
UBF1	2014	99	28,5	-28
UBF2	2014	100	32,9	-29
UB	2000	нет данных	31,9	-40

Полевые исследования проведены в июле 2022 года. Для высотной привязки точек отбора проб к средней поверхности и сопоставления слоев торфяной залежи по глубине проведена тахеометрическая съемка на 9 площадках площадью 25 м² с шагом 50 см (121 точка на каждой площадке). На каждой точке определялось присутствие видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, присутствие и толщина горелого слоя. Отбор проб торфа проведен из двух скважин в понижении и повышении микрорельефа. Точки отбора выбирались визуально в местах с типичным для участка растительным покровом. Высоты скважин относительно средней поверхности изменялись в пределах -23 – -4 см в понижениях и 2–13 см на положительных формах. Шаг отбора составлял 5 см, глубина отбора 45–90 см. Таким образом, общее количество проб составило 297. Кроме того, на 4 площадках проведен отбор образцов торфа методом конверта в 9 точках в слое 0–30 см с шагом 10 см для лабораторного определения влажности. Оценка трансформации свойств торфа постпирогенных площадок пожара 2016 г. на Бакчарском болоте проведена в сравнении с невыгоревшей фоновой площадкой Вфон. На Усть-Бакчарском болоте, в связи с отсутствием негоревших участков в пределах осушенной части болота, сравнение свойств торфа постпирогенных площадок пожара 2014 г. проводилось с площадкой UB, принятой за условно фоновую.

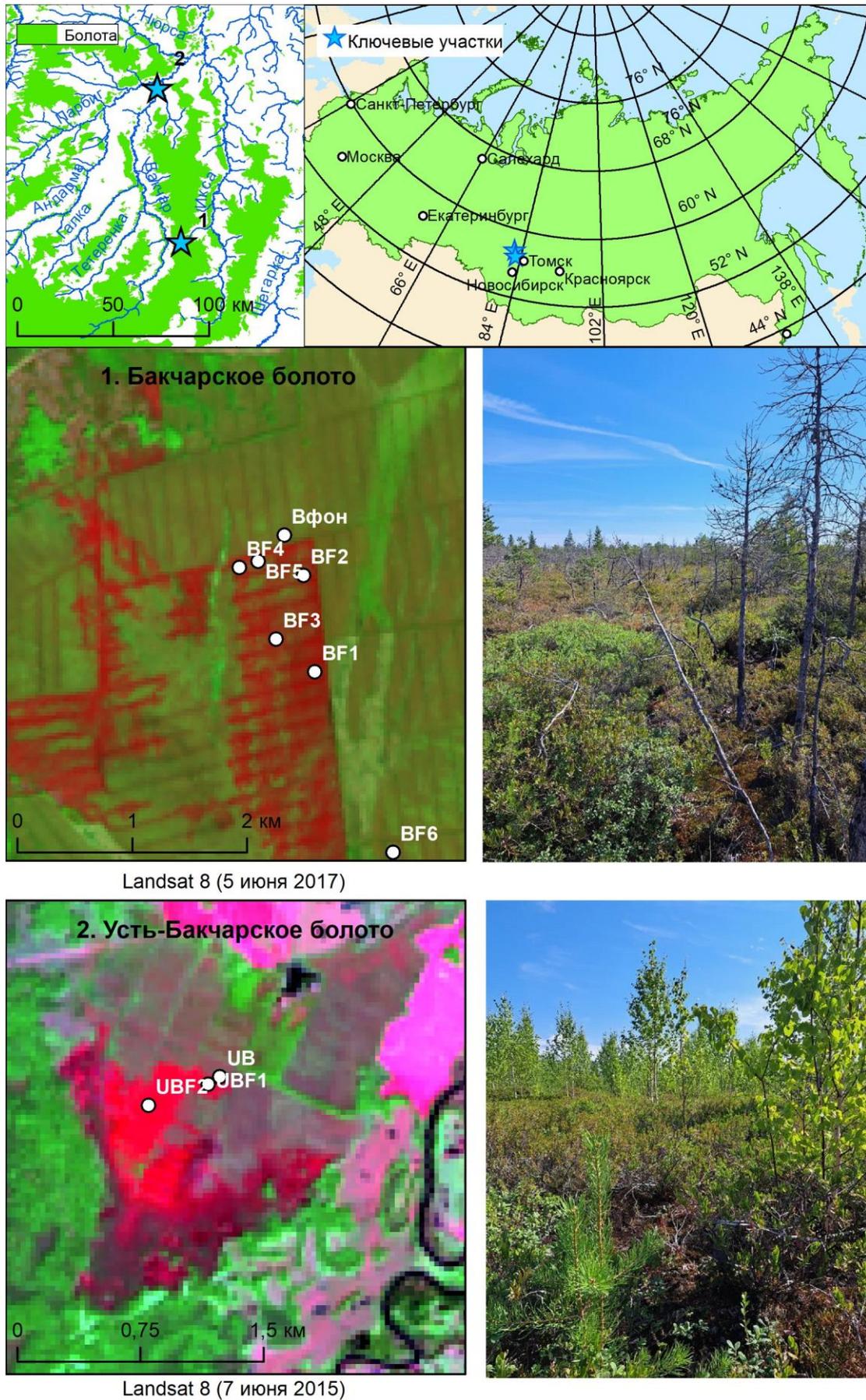


Рисунок 1. Схема расположения ключевых участков.

Лабораторное определение характеристик торфа проведено с использованием общепринятых методик: влажность (ГОСТ 11306-2013), зольность (ГОСТ 11306-2013), степень разложения и ботанический состав (ГОСТ 28245-89), степень гумификации и насыпная плотность торфа (Chambers et al., 2011).

Для расчета запасов углерода в торфяной залежи использовалась формула, предложенная О.В. Черновой и др. (2021) для определения углерода в подстилке, модифицированная для торфяной залежи:

$$C = \frac{100 - A}{100} * \frac{Kc}{100} * D * L * 10$$

где С – запас углерода, кг/м²;

А – зольность, %;

100–А – содержание органического вещества, %;

Кс – содержание углерода в органическом веществе, %;

D – насыпная плотность торфа, г/см³;

L – толщина слоя, см.

Содержание углерода в органическом веществе верхового торфа изменяется в пределах 53,4–61,3% между видами торфа, в частности, в сфагновых торфах оно составляет 53,4–54,2% (Тюрёмнов, 1976). Нами было принято усредненное значение для сфагновых торфов, составляющее 53,9%, что практически соответствует среднему значению (54,0%) содержания углерода в сфагновом торфе болота Московской области (Сирин и др., 2019) и чуть ниже усредненного значения для верхового торфа 55,5%, используемого в работе (Чернова и др., 2021) для расчета запасов углерода в торфяных болотных почвах в слое 30 см.

Кластерный анализ площадок проведен с использованием значений влажности, зольности, плотности, степени разложения и степени гумификации верхнего слоя и средних значений для слоя 0–45 см отдельно для положительных и отрицательных форм микрорельефа (20 показателей для каждой площадки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика торфяной залежи. Торфяная залежь верхних горизонтов до глубины 90 см образована преимущественно сфагновыми торфами (282 из 297 образцов). В составе растительных остатков преобладает *Sphagnum fuscum* (139 образцов с долей *S. fuscum* более 90%, 68 образцов с примесью других сфагновых мхов, пушицы и древесных остатков); менее часто встречаются горизонты с преобладанием остатков *S. divinum* (46 образцов) и *S. balticum* (29 образцов). Редко встречаются горизонты с преобладанием древесных, травяных остатков и остатков зеленых мхов (15 образцов). Сравнение характеристик разных видов торфа (Kruskal-Wallis test, $p < 0,05$) не выявило значимых различий по всем рассматриваемым показателям, за исключением степени разложения, которая отличается между фускум и дивинум торфами и составляет 9 и 14% соответственно. Средняя толщина горелой прослойки через 6–8 лет после пожара не превышает 1 см.

Классификация площадок по свойствам торфяной залежи. По результатам кластерного анализа выделено два кластера, разделенных на 5 подкластеров (рис. 2). Первый кластер включает фоновую площадку Бакчарского болота, площадку пожара 2000 года на Усть-Бакчарском болоте (первый подкластер), практически полностью восстановившуюся площадку пожара 1990 г. ВФ6 и две постпирогенные площадки Бакчарского болота (ВФ2 и ВФ3 – второй подкластер), характеризующиеся частичным выгоранием поверхности (около 70%) и присутствием сохранившихся моховых подушек. Доля выгорания положительных форм составила 30% на обеих площадках, доля выгорания отрицательных форм и высот около средней поверхности составила 64–87%. Средняя толщина горелой прослойки через 6 лет после пожара составила 0,6 см. Площадки имеют одинаковую суммарную встречаемость сфагновых мхов – 0,37 с доминированием *S. fuscum* (встречаемость 0,27–0,32). Выгоревшие поверхности зарастают *Polytrichum strictum* со встречаемостью 0,32–0,66.

Второй кластер объединяет три подкластера. Первый из них включает всего одну площадку на Усть-Бакчарском болоте UBF1. Доля выгорания поверхности здесь составила 99%, толщина прослойки горелого торфа через 8 лет после пожара – 0,65 см. Площадка характеризуется полной деградацией моховой растительности, суммарная встречаемость сфагновых мхов составила всего 0,05 с доминированием *S. fuscum*, и интенсивным зарастанием *P. strictum*, встречаемость которого достигает 0,69.

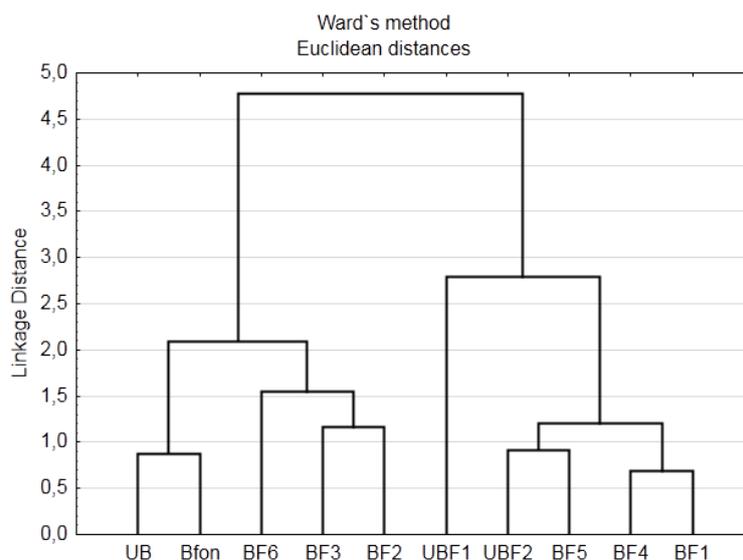


Рисунок 2. Дендрограмма кластерного анализа постпирогенных и невыгоревших площадок.

Второй подкластер включает площадки UBF2 и BF5. Площадки различаются по доле выгорания поверхности: полное выгорание на UBF2 и всего 76% на BF5, а также высокой долей выгорания понижений (87%) и широким распространением моховых подушек с погибшим сфагновым мхом. Суммарная встречаемость сфагновых мхов с доминированием *S. fuscum* составила 0,31, встречаемость *P. strictum* – 0,66. На площадке UBF2 сфагновые мхи практически полностью отсутствуют (встречаемость 0,01), кроме типичного зарастания *P. strictum* (0,69), здесь широкое распространение получили лишайники (0,54). Несмотря на различия в составе мохово-лишайникового яруса, общим для двух площадок являются высокие средние значения зольности в слое 0–45 см (около 4%), большая глубина трансформации торфяной залежи в понижениях и высокая степень гумификации верхнего слоя торфяной залежи на положительных формах (57–61%).

Третий подкластер включает две площадки Бакчарского болота – BF1 и BF4 с высокой долей выгорания поверхности (93–97%), толщиной горелого слоя 0,4–0,6 см, практически полным выгоранием понижений и высот около средней поверхности (95–100%). Общим для участков являются низкие значения глубины трансформации свойств торфа понижений, несмотря на высокую долю выгорания, высокую зольность верхнего слоя и большую глубину трансформации на положительных формах (до 30–35 см). Площадки отличаются по видовому составу мохового яруса. Встречаемость сфагновых мхов на BF1 составляет 0,41 с доминированием *S. fuscum* (0,33), площадка характеризуется высокой встречаемостью *P. strictum* – 0,83. На площадке BF4 встречаемость сфагновых мхов ниже – 0,14, встречаемость *P. strictum* – 0,64.

Различия свойств торфа между положительными и отрицательными формами на постпирогенных болотах. Наблюдаются различия в свойствах торфа между повышениями микрорельефа (моховыми подушками) и отрицательными формами. В слое 0–45 см на площадках Бакчарского болота средние значения плотности выше в понижениях в 1,10–1,17 раз в сравнении с обгоревшими моховыми подушками и в 1,23–1,45 раз выше в сравнении с сохранившимися моховыми подушками; значимые различия отмечены только на площадке BF2 (U-test, $p < 0,05$). На Усть-Бакчарском болоте различия не обнаружены. По степени разложения значимые различия не выявлены ни на одной из площадок, за исключением площадки BF6, где степень разложения на 7% выше в понижениях, в сравнении с моховыми подушками. Различия в степени разложения на участке пожара 1990 г. связаны с отсутствием аккумуляции торфа в понижениях на протяжении более, чем 30 лет после пожара, и, наоборот, на положительных формах интенсивным ростом сфагновых мхов с доминированием *S. fuscum* и аккумуляцией сфагнового торфа с низкой степенью разложения. Значимые различия степени гумификации отмечены на площадках BF3 и BF5, где значения оказались выше в 1,14–1,32 раза на положительных формах в сравнении с отрицательными; не существенное превышение в 1,1 раза отмечено на BF4. На остальных площадках различия не выявлены, за исключением UBF2, где степень гумификации в понижениях оказалась выше в 1,1 раза. Значимые различия в зольности выявлены только на фоновой площадке Бакчарского болота, где зольность понижений превышает повышения в 1,6 раз.

Наблюдаются различия в закономерностях изменения зольности по глубине между положительными и отрицательными формами. Например, на площадках BF2 и BF5 зольность в понижениях выше в 1,21–1,46 раз в сравнении с моховыми подушками за счет высоких значений зольности верхнего слоя 0–5 см (14,2–14,8%), а на площадках BF1, BF3 и BF4 она равна или даже выше на положительных формах за счет повышения зольности на глубине 15–30 см моховых подушек. На Усть-Бакчарском болоте зольность отрицательных форм в 1,52–1,57 раз выше в сравнении с положительными, за счет более интенсивного выгорания понижений и отсутствия миграции зольных элементов при низком уровне болотных вод. Значимые различия влажности между формами микрорельефа отмечены только на площадке UBF1, где влажность понижений оказалась на 2% выше в сравнении с повышениями. На всех остальных площадках влажность отрицательных форм на 0,5–1,5% выше в сравнении с моховыми подушками. Различия в характеристиках торфа между положительными и отрицательными формами прослеживаются до глубины 5–15 см ниже поверхности понижений и в большей степени проявляются во влажности и зольности (рис. 3, табл. 2).

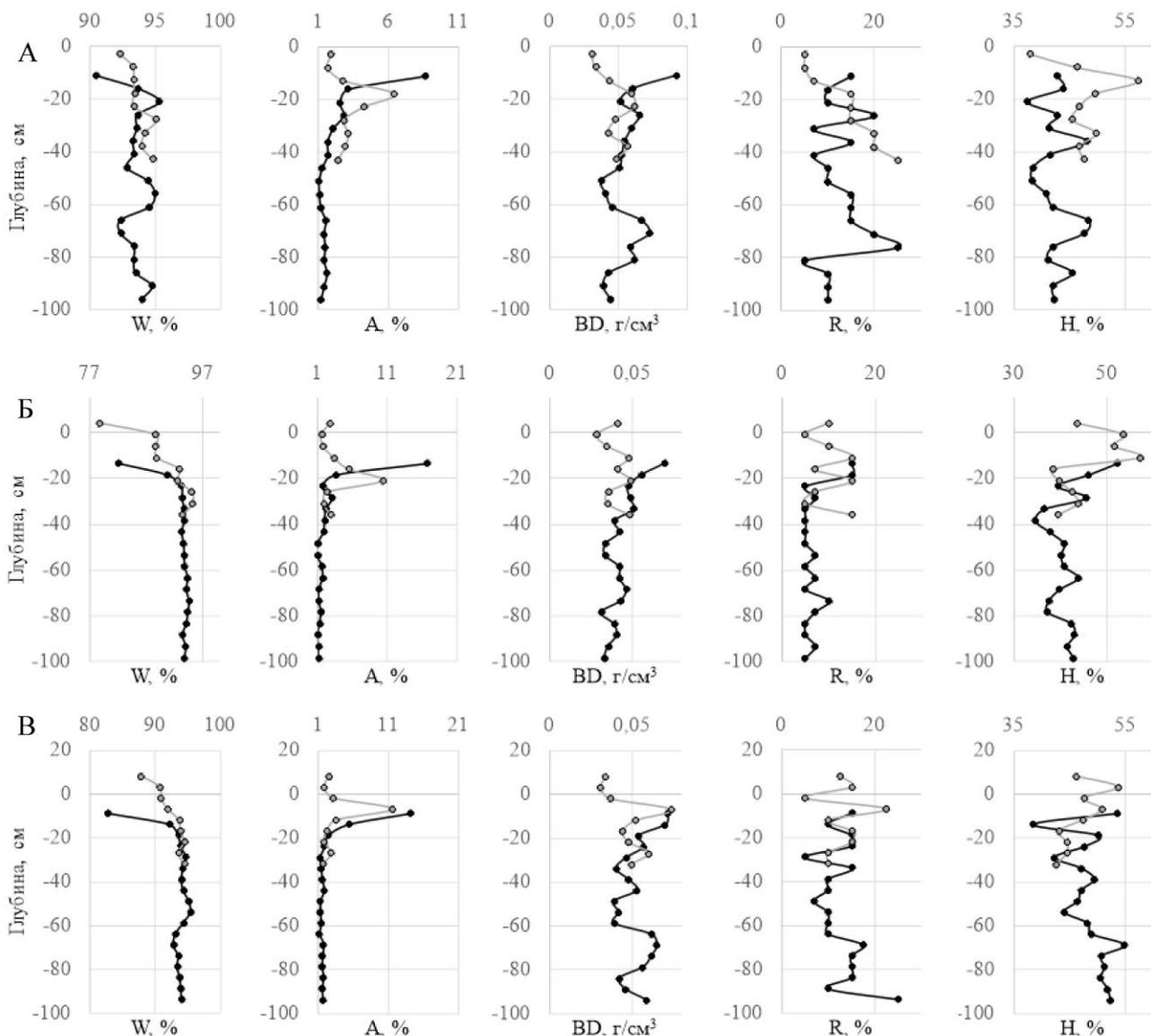


Рисунок 3. Свойства торфяной залежи площадок: А – BF3 с сохранившимся мхом на моховой подушке и горелым понижением; Б – BF4 с погибшим мхом на моховой подушке и горелым понижением; В – BF1 с горелыми моховой подушкой и понижением (W – влажность; А – зольность, BD – насыпная плотность; R – степень разложения; H – степень гумификации). Серая линия – положительные формы микрорельефа; черная линия – отрицательные формы микрорельефа. За 0 по оси Y принята средняя поверхность площадки.

Таблица 2

Средние значения свойств торфа по формам микрорельефа

Форма микрорельефа	Влажность, %		Зольность, %		Плотность, г/см ³		Степень разложения, %		Степень гумификации, %	
	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45
Глубина, см	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45	0–5	0–45
Сохранившиеся моховые подушки (BF2, BF3)	91,7	93,8	1,8	3,1	0,021	0,043	5	12	32,9	40,8
Моховые подушки с погибшим мхом (BF4, BF5)	81,7	90,5	2,9	3,2	0,047	0,042	10	10	52,2	49,4
Моховые подушки с горелым слоем (BF1, UBF1, UBF2)	84,8	91,3	3,5	2,6	0,054	0,048	14	11	53,1	43,5
Моховая подушка Вфон	90,7	91,1	1,7	1,8	0,015	0,025	5	11	25	42
Горелые понижения (все площадки)	85,3	92,4	12,0	3,5	0,075	0,053	14	11	48,1	42,3
Понижение Вфон	91,2	93,5	1,5	2,5	0,04	0,04	5	10	50	43

Пирогенная трансформация торфяной залежи. Наиболее сильные изменения свойств торфа в результате пожара характерны для поверхностного слоя 0–5 см. Среднее значение влажности верхнего слоя торфа выгоревших понижений составляет 85,3%, что на 6% ниже, в сравнении с фоновыми значениями. Более значимые различия характерны для зольности, значения которой увеличились с 1,5 до 8,6–14,8%. Отмечено уплотнение верхнего слоя, плотность увеличилась с 0,04 до 0,05–0,11 г/см³. Степень гумификации отличается между площадками, прослеживается прямая зависимость степени гумификации с долей выгоревшей поверхности. В сравнении с фоновыми площадками, в отдельных случаях степень гумификации была ниже фонового значения (33–43%) на участках с меньшей долей выгорания (BF2, BF3), на остальных выше на 2–7%. Таким образом, выгорание понижений привело к изменению всех рассматриваемых характеристик торфа; их изменчивость между площадками определяется долей выгорания (влажность, зольность, степень гумификации) и толщиной горелого слоя (плотность). Выгорание в наибольшей степени отразилось на зольности, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками (см. табл. 2).

В понижениях трансформация свойств торфа наиболее выражена в верхнем слое, непосредственно подвергнутому горению, но различия значений между фоновыми и пирогенными участками достигают глубины 10–15 см (табл. 3). Наибольшая глубина проявления различий характерна для зольности, что может происходить за счет просачивания зольных элементов вглубь торфяной залежи и частичной трансформации органического вещества под воздействием высоких температур вне зоны горения. На Бакчарском болоте увеличение зольности прослеживается до глубины 15 см. В слое 5–10 см зольность постпирогенных площадок в 2–3 раза выше в сравнении с фоновой. На Усть-Бакчарском болоте повышение зольности ограничивается глубиной 10 см, а превышение значений в слое 5–10 см в сравнении с условно фоновой площадкой составляет 1,1–1,7 раз. На отдельных площадках Бакчарского болота (BF1, BF4, BF5) уплотнение торфяной залежи прослеживается до глубины 15 см, где значения плотности превышают фоновые в 1,4–1,6 раз в слое 5–15 см. На Усть-Бакчарском болоте увеличение плотности не выявлено. Увеличение степени гумификации отмечено на площадке UBF2 на 7% в сравнении с UB. Закономерности изменения влажности не выявлены между постпирогенными и фоновыми площадками в связи с высокой динамичностью значений в зависимости от количества осадков в разные дни отбора. Таким образом, максимальная глубина трансформации торфяной залежи в понижениях составила 15 см, а наибольшие различия в сравнении с фоном оказались характерными для зольности.

Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) в слое 0–45 см между отрицательными формами постпирогенных, фоновой и условно фоновой площадками наиболее часто проявляются для степени гумификации и плотности на обоих болотах, а по степени разложения – на Усть-Бакчарском болоте.

Таблица 3

Глубина проявления трансформации свойств торфяной залежи отрицательных (-) и положительных (+) форм микрорельефа в сравнении с фоновыми участками, см

Площадка	Влажность		Зольность		Плотность		Степень гумификации	
	-	+	-	+	-	+	-	+
BF1	5	-	15	25	15	35	5	25
BF2	-	-	10	25	5	-	-	-
BF3	-	40	15	35	5	30	5	30
BF4	5	20	10	30	15	30	10	20
BF5	15	20	15	30	15	35	5	25
UBF1	-	5	10	10	-	10	-	10
UBF2	-	10	10	10	5	10	10	10

На положительных формах микрорельефа интенсивность трансформации свойств торфяной залежи верхнего слоя (0–5 см) изменяется в ряду: фоновая площадка – сохранившиеся моховые подушки на пирогенных площадках – моховые подушки с погибшим сфагновым мхом – моховые подушки с горелым верхним слоем. В данном ряду происходит увеличение зольности верхнего слоя с 1,5 до 3,5%, степени гумификации с 30 до 53%, степени разложения с 4 до 15% и уменьшение влажности с 92 до 82%. Показатели сохранившихся моховых подушек постпирогенных площадок не отличаются по степени разложения, степени гумификации и влажности относительно фоновых, однако отмечено увеличение зольности с 1,5 до 1,8–2,0% и плотности с 0,015 до 0,021–0,025 г/см³. Более значимыми различиями характеризуются положительные формы с погибшим сфагновым мхом и горелым слоем. Здесь наблюдаются некоторые различия с фоновыми значениями, проявляющиеся в увеличении зольности в 1,2 раза, плотности в 1,15 раз, степени разложения в 1,4 раза. Таким образом, влияние пожара практически не распространяется на верхний слой сохранившихся моховых подушек; трансформация свойств обгоревших моховых подушек незначительна и проявляется не по всем показателям.

Глубина трансформации свойств торфяной залежи положительных форм на площадках Бакчарского болота оказалась больше в сравнении с понижениями (см. табл. 3). Трансформация свойств отмечена даже на невыгоревших моховых подушках пирогенных участков и проявляется в увеличении зольности в слое 25–35 см в сравнении с выше- и нижележащими слоями. На нарушенных моховых подушках отмечены изменения по всем рассматриваемым показателям. Наблюдается увеличение степени гумификации на 6–16%, плотности в 1,6–2 раза, зольности в 2,2–3,2 раза, степени разложения на 5–10% и уменьшение влажности на 3–4% в сравнении с фоновыми значениями. Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) в слое 0–45 см между положительными формами постпирогенных и фоновой площадками наиболее часто проявляются для зольности (3 из 5 площадок), а ниже – по всем остальным показателям (2 из 5 площадок).

На всех постпирогенных площадках Бакчарского болота в торфяной залежи положительных форм выделяется слой с повышением зольности в 1,8–2,6 раза относительно выше- и нижележащих слоев, не связанный со сменой ботанического состава. Глубина расположения слоя меняется между площадками в пределах 15–30 см и соответствует высоте поверхности понижений, отличающихся большей степенью выгорания и высокой зольностью верхнего горелого горизонта. Повышение зольности, вероятно, связано с миграцией зольных элементов из горелых понижений по всей поверхности болота, захватывая, в том числе, и моховые подушки, не подверженные выгоранию. На Усть-Бакчарском болоте данная закономерность не наблюдается, что вероятно связано с более низким многолетним уровнем болотных вод и, поэтому, отсутствием горизонтальной миграции зольных элементов в приповерхностных слоях торфяной залежи.

Положительные формы постпирогенных площадок на Усть-Бакчарском болоте отличаются меньшей глубиной трансформации свойств торфа, которая составляет всего 5–10 см (см. табл. 3). Наблюдается увеличение зольности в 1,6–2,5 раза, плотности в 2,3–2,4 раза, степени гумификации на 17%, степени разложения на 5–10% и уменьшение влажности на 4–7% в сравнении с условно фоновой площадкой. Значимые различия (U-test, $p < 0,05$) на Усть-Бакчарском болоте в слое 0–45 см не выявлены ни по одному из показателей, что объясняется исходной большей трансформацией Усть-Бакчарского болота – повышенным осушением и периодически возникающими пожарами.

Пространственная неоднородность влажности торфа в слое 0–30 см. На Бакчарском болоте средние значения влажности по 9 точкам отбора в слое 0–30 см не различаются между постпирогенной и фоновой площадками и составляют 91,2%. При этом наблюдаются различия в распределении значений влажности по формам микрорельефа и по глубине. Площадка BF5 характеризуется низкой влажностью в понижениях, ростом значений у средней поверхности и снижением влажности на положительных формах (рис. 4). Снижение влажности в понижениях объясняется отсутствием капиллярного поднятия влаги на участках с разреженным моховым покровом или полным его отсутствием и наблюдается также на осушенных невыгоревших участках Бакчарского болота. Но здесь, в отличие от постпирогенных болот, положительные формы характеризуются высокими значениями влажности, снижение которой происходит только на самых высоких моховых подушках (Sinyutkina, 2021). Распределение значений влажности на площадке BF6 является схожим с невыгоревшими участками Бакчарского болота, что объясняется практически полным восстановлением исходной растительности.

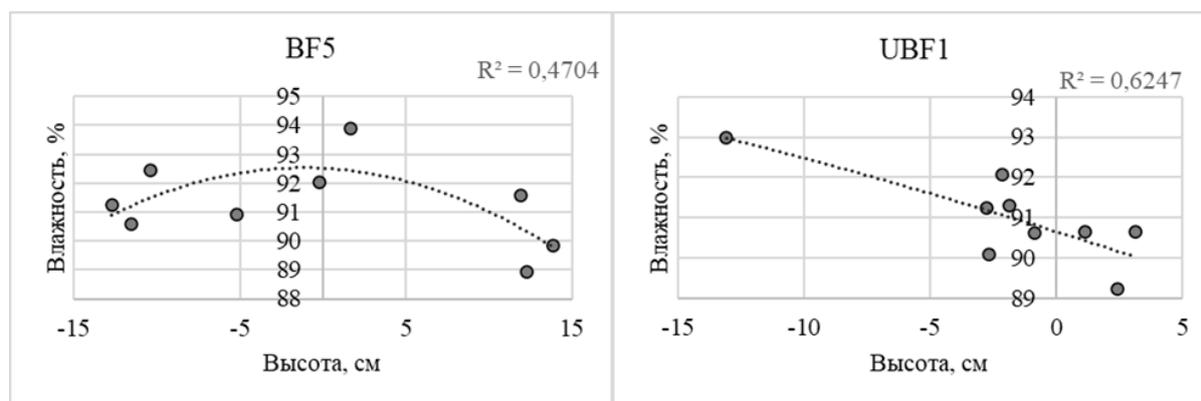


Рисунок 4. Средняя влажность в слое 0–30 на постпирогенных площадках в зависимости от высоты поверхности.

В пределах площадки BF5 наблюдаются различия между выгоревшими и сохранившимися точками. На невыгоревших точках отбора в слое 0–30 см отмечена однородность влажности по глубине, различия не превышают 2%. На аналогичных высотах микрорельефа влажность выше на невыгоревших точках в сравнении с выгоревшими на 1% на повышениях и на 2% на высотах около средней поверхности. Выгоревшие точки характеризуются обсыханием слоя 0–10 см до 85–87% и увеличением влажности в слое 20–30 см в среднем на 5%.

На Усть-Бакчарском болоте средняя влажность торфа в слое 0–30 см составляет 90% на площадке UB и 91% на площадке UBF1. Более высокая средняя влажность на площадке UBF1 объясняется отсутствием моховых подушек, которые единично присутствуют на площадке UB и отличаются низкой влажностью (87%). Влажность верхнего слоя 0–10 см на высотах около средней поверхности составляет 87,2% на постпирогенной площадке и 88,6% на условно фоновой. На площадке UBF1 происходит снижение влажности от отрицательных форм к положительным в среднем от 91,1 до 89,2%. На всех точках отбора в пределах площадок отмечены более низкие значения влажности в слое 0–10 см в сравнении со слоем 20–30 см в среднем на 5,7% на площадке UBF1 и 3,9% на площадке UB. Схожие значения влажности и закономерности их распределения между площадками объясняются выровненным микрорельефом и практически полным отсутствием сфагновых мхов, даже более чем через 20 лет после пожара (Синюткина, Гашкова, 2023).

Аккумуляция торфа на постпирогенных болотах. На площадках, выгоревших в 2016 г. на Бакчарском болоте и в 2014 г. на Усть-Бакчарском болоте, через 6–8 лет после пожара отмечено только частичное зарастание сфагновыми мхами, аккумуляция торфа еще не началась. Поэтому оценка накопления углерода после пожара проведена только для площадок старых пожаров 1990 и 2000 гг. На Бакчарском болоте (BF6) отмечены существенные различия в интенсивности накопления торфа между формами микрорельефа. Вероятно, во время пожара здесь также большей трансформации залежи оказались подвержены понижения микрорельефа. В настоящее время в понижениях сфагновые мхи продолжают отсутствовать и, как следствие, накопление сфагнового торфа здесь не происходит. Верхние слои торфа образованы древесными остатками (слой 5–10 см), выпавшими сюда на нижележащий слой фускум торфа во время пожара, и остатками *P. strictum* и

печеных мхов (слой 0–5 см). На моховых подушках, напротив, идет интенсивная аккумуляция сфагнового торфа. Глубина залегания горелого слоя на моховой подушке составляет 35 см. Несмотря на некоторую трансформацию горелой прослойки, слой хорошо выделяется по смене ботанического состава (*S. fuscum* на *P. strictum*), увеличению зольности до 3,8% и плотности до 0,064 г/см³ (рис. 5). Выше расположен слой сфагнового торфа с низкой степенью разложения (3–5%) и плотностью (0,023 г/см³). Скорость аккумуляции торфа на положительных формах в период после пожара 1990 г. составила около 1 см/год, а запас углерода в 35 см слое оценивается в 4,64 кг С/м². С учетом неоднородности поверхности, среднее накопление углерода после пожара за период 1990–2022 гг. составляет 1,9 кг С/м² или около 0,06 кг С/м² в год.

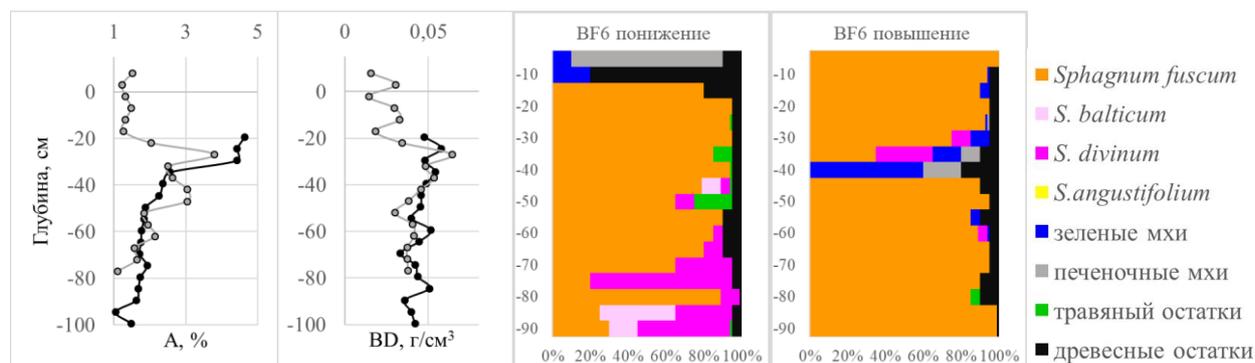


Рисунок 5. Ботанический состав, зольность и плотность торфяной залежи на площадке BF6 (пожар 1990 г. на Бакчарском болоте). Условные обозначения см. рис. 3.

На Усть-Бакчарском болоте зарастание сфагновыми мхами и накопление торфа идет медленней в сравнении с Бакчарским болотом. В понижениях здесь также отсутствуют сфагновые мхи, а накопление торфа происходит только отдельными пятнами на положительных формах. Горелый слой выявлен на глубине 10–15 см, для него характерно увеличение зольности до 5,3% и плотности до 0,07 г/см³, увеличение доли древесных остатков (рис. 6). Над этим слоем расположен слой сфагнового торфа с низкой зольностью (1,7%) и плотностью (0,025 г/см³). Скорость накопления торфа на положительной форме составила около 0,6 см/год, а запас углерода в данной точке отбора оценивается в 1,3 кг С/м². В связи с низкой встречаемостью сфагновых мхов (15%) и отсутствием аккумуляции торфа на большей части поверхности, среднее накопление углерода на данной площадке оценивается примерно в 0,10–0,20 кг С/м² в период 2000–2022 гг. или около 0,007 кг С/м² в год.

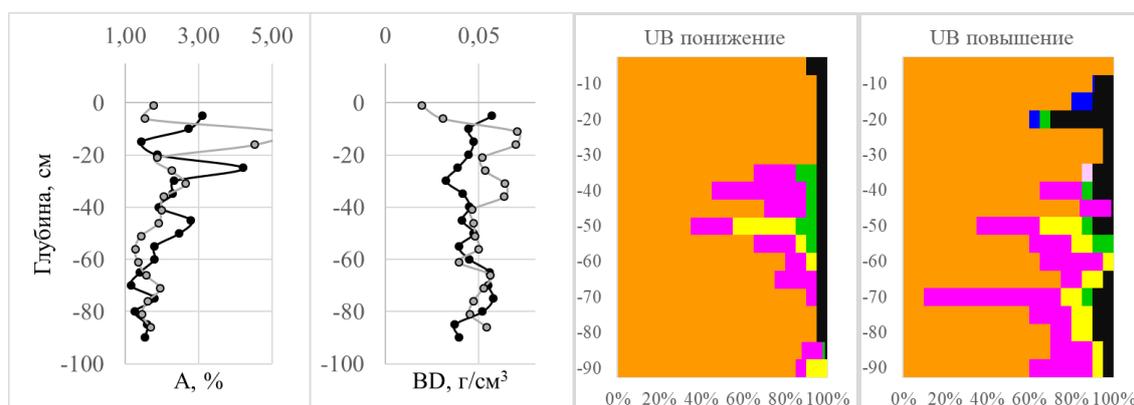


Рисунок 6. Ботанический состав, зольность и плотность торфяной залежи на площадке UB (пожар 2000 г. на Усть-Бакчарском болоте). Условные обозначения см. рис. 3, ботанический состав см. рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Неоднородность поверхности болот влияет на степень выгорания, интенсивность трансформации торфяной залежи и, как следствие, на скорость аккумуляции органического вещества после пожара. Неоднородность выгорания по-разному проявляется на разных болотах в зависимости

от степени осушения, уровня болотных вод, генезиса положительных форм микрорельефа. Например, в результате исследования С.Э. Вомперского (2007) на верховом осушенном болоте в Тверской области показано, что выгоранию были больше подвержены положительные формы микрорельефа – пушицевые кочки и приствольные повышения, вследствие низкой влажности и наличия воздушных полостей, создающих дополнительную тягу во время горения. Сфагновые понижения, характеризующиеся большей влажностью, поражались огнем значительно реже, либо с меньшей силой. В условиях относительно высокого обводнения болота, интенсивность горения больше в понижениях микрорельефа, в то время как положительные формы менее подвержены выгоранию и часто остаются нетронутыми огнем, как это было отмечено на сфагновых болотах в Канаде (Thompson, Waddington, 2013; Benschoter et al., 2015). По результатам нашего исследования, эта закономерность была отмечена на верховом Бакчарском болоте (Синюткина и др., 2024).

Невысокая теплотворная способность торфа, большая влажность и капиллярный подток влаги ограничивают распространения огня вглубь (Вомперский и др., 2007). На объектах нашего исследования непосредственному горению были подвержены только верхние сантиметры торфяной залежи, тем не менее, косвенное влияние пожара прослеживается и в нижележащих слоях залежи до глубины 35 см. Это влияние проявляется в увеличении зольности за счет просачивания и растекания зольных элементов из горелого слоя, некотором уплотнении торфа из-за просадки залежи в связи со снижением влажности при деградации покрова из сфагновых мхов.

Средняя скорость накопления торфа в голоцене в Западной Сибири колеблется от $0,35 \pm 0,03$ до $1,13 \pm 0,02$ мм/год (Vorren et al., 2004). В поверхностном слое на невыгоревших естественных болотах скорость накопления торфа значительно выше и может достигать нескольких см в год (Holden, Burt, 2003; Taminskas et al., 2018). Пожары приводят к утрате части торфяной залежи во время горения, а трансформация структуры растительного покрова становится причиной прекращения процесса торфообразования на некоторый срок после пожара, что снижает среднюю скорость торфонакопления за длительный период (Цыганов и др., 2018). Например, потери углерода в результате пожара на осушенном верховом болоте в Тверской области оцениваются в $0,43\text{--}2,87$ кг С/м², в частности, при расстоянии между каналами 160 м (наиболее схожие условия с ключевым участком на Бакчарском болоте) – $0,83 \pm 0,62$ кг С/м². В исследовании (Wieder et al., 2009) отмечено, что примерно через 13 лет после пожара возможен переход болота от источника углерода к его поглотителю. В результате нашего исследования выявлены существенные различия срока восстановления функции накопления углерода как между болотами с разной интенсивностью осушения, так и между формами микрорельефа в пределах одного болота. Скорость аккумуляции торфа на положительных формах постпирогенного участка, составляющая около 1 см/год, оказалась выше или равна значениям, характерным для других болот таежной зоны Западной Сибири: например, $0,1\text{--}2,0$ см/год на осушенных верховых сосново-кустарничково-сфагновых болотах Томской области в период после осушения (Sinyutkina, 2021); $0,35$ см/год в слое 0–50 см на грядово-мочажинном участке Бакчарского болота (Веретенникова, 2015); $0,24\text{--}1,1$ см/год на осушенных и естественных болотах за период 40–45 лет (Прейс и др., 2010). Скорость накопления органического вещества на положительных формах постпирогенного участка на Бакчарском болоте в период с 1990 по 2022 гг. оказалась сопоставима с данными, полученными для невыгоревшего осушенного участка с сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом в период после осушения, проведенного в 1980-х гг. (Sinyutkina, 2021). Тем не менее, средняя скорость накопления углерода ($0,06$ кг С/м²×год) оказалась ниже за счет отсутствия аккумуляции торфа в выгоревших понижениях в сравнении с невыгоревшими участками Бакчарского болота, где она составляет около $0,1$ кг С/м²×год. Скорость аккумуляции торфа и накопления органического вещества на постпирогенном участке на Усть-Бакчарском болоте оказалась ниже в сравнении с осушенными невыгоревшими участками сосново-кустарничково-сфагновых болот южно-таежной подзоны Западной Сибири, представленных в исследовании (Sinyutkina, 2021). Таким образом, предполагаемое время восстановления углеродного баланса на Бакчарском болоте составило около 15 лет; для восстановления запасов углерода на допожарный уровень на Усть-Бакчарском болоте потребуются сотни лет с учетом больших потерь углерода при пожаре и низкой скорости аккумуляции органического вещества даже при условии отсутствия пожаров в будущем.

ВЫВОДЫ

1. Большая трансформация свойств торфяной залежи характерна для понижений микрорельефа, где выгорание привело к изменению всех рассматриваемых характеристик поверхностного слоя торфа – влажности, зольности, плотности, степени разложения и степени гумификации. Выгорание в наибольшей степени отразилось на зольности, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками. Трансформация свойств торфа наиболее выражена в верхнем слое (0–5 см), но различия значений между фоновыми и пирогенными участками в понижениях достигает глубины 10–15 см. На положительных формах микрорельефа интенсивность трансформации свойств верхнего слоя торфа оказалась менее значима в сравнении с понижениями, но здесь наблюдается большая глубина трансформации, достигающая 15–30 см.

2. Через 6–8 лет после пожара его последствия проявляются в обсыхании верхнего слоя торфяной залежи, что препятствует интенсивному зарастанию сфагновыми мхами. На участке лесомелиорации в пределах Бакчарского болота, более чем через 30 лет после пожара, отмечено восстановление растительного покрова, а влажность на разных формах микрорельефа имеет близкие значения к фоновым участкам. На Усть-Бакчарском болоте, в условиях постоянно низкого уровня болотных вод, восстановления растительного покрова из сфагновых мхов не происходит и влажность практически не отличается между площадками, выгоревшими 8 и более чем 20 лет назад.

3. Интенсивность торфообразования на постпирогенных участках имеет большие различия как на уровне микрорельефа в пределах одной площадки, так и между болотными массивами. Восстановление процесса аккумуляции органического вещества, по скорости сопоставимого с невыгоревшими участками верховых болот таежной зоны, отмечено на положительных формах участка Бакчарского болота, выгоревшего в 1990 г., в то время как в понижениях аккумуляция торфа отсутствует. На участке Усть-Бакчарского болота, более чем через 20 лет после пожара, скорость накопления органического вещества ниже в 8,5 раз в сравнении с Бакчарским болотом, что связано с практически полной деградацией сфагновых мхов в результате постоянного низкого уровня болотных вод.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 22-77-10024).

ЛИТЕРАТУРА

Базанов В.А., Егоров Б.А., Льготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Под редакцией М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 190–196.

Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Изменение изотопного состава азота в процессе трансформации опада растений-торфообразователей на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 4. e238. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.238>.

ГОСТ 28245-89. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. Москва: Издательство стандартов, 1989. 6 с.

ГОСТ 11306-2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Москва: Стандартинформ, 2014. 5 с.

Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160607>.

Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Лесные пирогенные торфяные почвы и глееземы заболоченных горных долин юга Енисейской Сибири // Почвоведение. 2021. № 7. С. 771–782. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21070030>.

- Зайдельман Ф.Р., Романов С.В. Эколого-гидротермическая оценка пирогенно-измененных и дерново-пирогенных почв выработанных торфяных месторождений // Почвоведение. 2007. № 1. С. 93–105.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеаурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.7868/S03670959715060086>.
- Малашук А.А., Филиппов Д.А. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2021. Том 4. № 1. С. 104–121. DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-200512>.
- Прейс Ю.И., Сороковенко О.Р., Бобров В.А. Современная аккумуляция торфа в рямах олиготрофных болот юга лесной зоны Западной Сибири как отклик на изменения климата // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 333. С. 187–194.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Пространственная неоднородность влажности торфа осушенных и выгоревших верховых болот в пределах подзоны южной тайги Западной Сибири // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 482–485. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 196–223. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10>.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. № 1. С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>.
- Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.
- Тюрменов С.Н. Торфяные месторождения. Москва: Недра, 1976. 488 с.
- Цыганов А.Н., Новенко Е.Ю., Бабешко К.В., Мазей Н.Г., Борисова Т.В., Мазей Ю.А. Послепожарная сукцессия болотных экосистем по данным палеоэкологического анализа на примере болота Новоалександровское (Мещерская низменность, Рязанская область) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2018. № 5. С. 573–580. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002332918050156>.
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K. M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintona W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // Science of the Total Environment. 2021. No. 782. 146841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146841>.
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Canadian Journal of Forest Research. 2015. No. 45. P. 1133–1137. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // Ecosystems. 2008. No. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs // Canadian Journal of Forest Research. 2005. No. 35. P. 2188–2193.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia // Quaternary Research. 2004. No. 61. P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002>.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu. Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeoecological studies of climate and peatland carbon dynamic // Mires and Peat. 2011. Vol. 7. Article 07. P. 1–10.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // Quaternary Science Reviews. 2020. No. 244. 106495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>.
- Holden J., Burt T.P. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model // Journal of Ecology. 2003. No. 91. P. 86–102. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>.

Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J., Thompson D.K., Moller C.A., Benscoter B.W., Flannigan M.D., Wotton B.M., Waddington J.M. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift // Scientific Reports. 2015. No. 5. 8063. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep08063>.

Lin S., Liu Ya., Huang X. Climate-induced Arctic-boreal peatland fire and carbon loss in the 21st century // Science of the Total Environment. 2021. No. 796. 148924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148924>.

Lukenbach M.C., Hokanson K.J., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Granath G., Waddington J.M. Post-fire ecohydrological conditions at peatland margins in different hydrogeological settings of the Boreal Plain // Journal of Hydrology. 2017. No. 548. P. 741–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.034>.

Marcotte A.L., Limpens J., Stoof C.R., Stoorvogel J.J. Can ash from smoldering fires increase peatland soil pH? // International Journal of Wildland Fire. 2022. No. 31. P. 607–620. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF21150>.

Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity // Journal of Hydrology. 2017. No. 554. P. 656–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.036>.

Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // Catena. 2021. No. 205. 105464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>.

Taminskas J., Linkeviciene R., Simanaukiene R., Jukna L., Kibirskis G., Tamkeviciute M. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability // Geomorphology. 2018. No. 304. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.026>.

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // Journal of Hydrology. 2013. No. 486. P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.014>.

Wieder R.K., Scott K., Kamminga K., Vile M.A., Vitt D.H., Bone T., Xu B., Benscoter B.W., Bhatti J.A. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01756.x>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Принята 13.03.2024

Опубликована 18.03.2024

Сведения об авторах:

Синюткина Анна Алексеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); ankalaeva@yandex.ru

Оленникова Арина Владимировна – младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); olennikovaarin@yandex.ru

Сун-зу-ли Людмила Юрьевна – младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); lyuda.sunzuli@mail.ru

Гашкова Людмила Павловна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); gashkova-lp@rambler.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Transformation of peat deposits and carbon accumulation in post-pyrogenic fens in the taiga zone of West Siberia

© 2024 A. A. Sinyutkina, , O. V. Olennikova,  L. Yu. Sun-zu-li,  L. P. Gashkova 

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Gagarina st. 3, Tomsk, Russia. E-mail: ankalaeva@yandex.ru

The aim of the study was to assess of the transformation of the hydrologic and physical properties of peat deposits and peat accumulation rates in the post-pyrogenic sites of drained fens in the taiga zone of West Siberia.

Location and time of the study. Field studies were conducted in 2022 on the Bakchar fen (drained for forestry, seven plots) and Ust-Bakchar fen (drained for peat extraction, three plots) located in the Tomsk region.

Methods. Peat sampling was carried out from two boreholes at each plot in the hollow and the hummock. The sampling increment was 5 cm; the total depth was 45–90 cm. Peat samples were taken at nine subsites by the envelope method on each plot in 0–30 cm layer by 10 cm increment for water content determination in laboratory. Laboratory study of peat characteristics was carried out using the following methods: water and ash content measurements (GOST 11306-2013, GOST 11306-2013), estimation of peat decomposition and humification degree, botanical composition (GOST 28245-89), as well as measuring peat bulk density. Carbon stocks in the upper layer of peat deposits was estimated using the values of peat ash content and density.

Results. The peat deposit of the upper layers was formed mainly by sphagnum peat with *Sphagnum fuscum* plant residues predominating. The differences between hollows and hummocks in their peat properties were manifested to a depth of 5–15 cm from the surface of depressions. The burnout of the hollows led to the changes of all peat properties to a depth of 10–15 cm: the changes were more pronounced in ash content, which was 1.5–9 times higher in the 0–5 cm layer as compared with the unburned site. The changes in peat properties on positive relief forms, i.e. moss hummocks, was less evident in the upper 0–5 cm layer, but reached a greater depth of 30 cm. The change was revealed mainly as an increase in peat ash content due to the migration of ash elements from the surface of burnt hollows and as an increase in bulk density due to subsidence of moss hummocks with the died-off sphagnum moss. Although the average water content in postpyrogenic and unburned sites was the same, amounting to 90–91% in the 0–30 cm layer, some difference was observed between the microrelief forms. The post-pyrogenic site in the Bakchar fen was characterized by water content decrease in hollows and hummocks, the maximum values being observed at an altitude near the average surface. In the Ust-Bakchar fen, water content was found to decrease from hollows to hummocks. In the Bakchar fen, 30 years after the fire peat accumulation occurred only on positive microrelief forms, where the 35 cm thick layer formed after the fire. Taking into account the microrelief heterogeneity, carbon accumulation over the post-fire period was estimated as 1.9 kg C/m² or 60 g C/m² per year. Peat accumulation seemed much slower in the Ust-Bakchar fen and was apparently absent on most of the surface. The average rate was estimated as 7 g C/m² per year.

Conclusions. The study found fen hollows to be most prone to burnout. The consequences of the fire manifest themselves in the drying of the upper layer of the peat deposit, thus preventing intensive overgrowth by sphagnum mosses 6–8 years after the fire. At the drained for forestry site in the Bakchar fen, 30 years after the fire the peat accumulation rate on moss hummocks was comparable to the rate in the unburned areas.

Keywords: peat soil; microtopography; wildfire; water content; ash content, degree of decomposition; degree of humification; peat bulk density.

How to cite: Sinyutkina A.A. Olennikova A.V., Sun-zu-li L.Yu., Gashkova L.P. Transformation of peat deposits and carbon accumulation in post-pyrogenic raised bogs within the taiga zone of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e246 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.246](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246)

FUNDING

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-77-10024.

REFERENCES

- Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (on the example of the interfluvium of the rivers Iksa and Shegarka). In book: Great Vasyugan Mire: Modern state and development processes / M.V. Kabanov (ed.). Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. P. 190–196. (in Russian).
- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovalev A.G. The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs. *Lesovedenie*. 2007. No. 6. P. 35–44. (in Russian).

- Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 5. P. 542–549. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>.
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Changes in the nitrogen isotopic composition during the transformation of peat-forming plant litter at dried and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 4. e238. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.238>. (in Russian).
- GOST 28245-89. Turf. Methods for determination of botanical composition and degree of decomposition. Moscow: Standards Publishing House, 1989. 6 p. (in Russian).
- GOST 11306-2013. Peat and products of its processing. Methods for determination of ash content. Moscow: Standartinform, 2014. 5 p. (in Russian).
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. Calculation method for determination of carbon in the peat and moss litter of forest swamps by ash content of plant substrates. *Siberian Journal of Forest Science*. 2016. No. 6. P. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160607>. (in Russian).
- Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F. Forest pyrogenic peat soils and gleyzems in swampy mountain valleys in the south of Yenisei Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 975–985. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321070036>.
- Zaidel'man F.R., Romanov S.V. Ecological-hydrothermal assessment of pyrogenic soils of cutover peatlands. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 1. P. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229307010127>.
- Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland. *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. No. 1. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1067413615060089>.
- Malashchuk A.A., Philippov D.A. Post-pyrogenic dynamics of the vegetation cover of the Barskoe raised bog (Vologda Region, Russia). *Ecosystem Transformation*. 2021. Vol. 4. No. 1. P. 104–121. DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-200512>. (in Russian).
- Preis Yu.I., Sorokovenko O.R., Bobrov V.A. Actual peat accumulation in bog riams in south forest zone of Western Siberia as a response to climatic changes. *Tomsk State University Journal*. 2010. No. 333. P. 187–194. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Microhabitats differentiation of peat water content of drained and burned out raised bogs within southern taiga of Western Siberia. In book: *Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023)*. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 482–485. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Y.A. Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in Tomsk region. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2018. Vol. 43. P. 196–223. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/43/10>. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes in mire vegetation and peat in Western Siberia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografia*. 2024. No. 1. P. 77–88. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>. (in Russian).
- Sirin A.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Gul'be Y.I., Gummert I. Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol. 13. No. 7. P. 769–779. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520070112>.
- Tyuremnov S.N. *Peatlands*. Moscow: Nedra Publ., 1976. 488 p. (in Russian).
- Tsyganov A.N., Babeshko K.V., Borisova T.V., Mazei Y.A., Novenko E.Y., Mazei N.G. Postfire succession of mire ecosystems reconstructed using paleoecological analysis: a case study of Novoaleksandrovskoe Mire (Meshchera Lowland, Ryazan Oblast). *Biology Bulletin*. 2018. Vol. 45. No. 5. P. 512–518. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359018050151>.
- Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian federation. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 325–336. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K. M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintona W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost. *Science of the Total Environment*. 2021. No. 782. 146841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146841>.
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography. *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. No. 45. P. 1133–1137. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028>.

- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence. *Ecosystems*. 2008. No. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9178-4>.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs. *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. No. 35. P. 2188–2193.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia. *Quaternary Research*. 2004. No. 61. P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002>.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu. Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructural studies of climate and peatland carbon dynamic. *Mires and Peat*. 2011. Vol. 7. Article 07. P. 1–10.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*. 2020. No. 244. 106495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>.
- Holden J., Burt T.P. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model. *Journal of Ecology*. 2003. No. 91. P. 86–102. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>.
- Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J., Thompson D.K., Moller C.A., Benscoter B.W., Flannigan M.D., Wotton B.M., Waddington J.M. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift. *Scientific Reports*. 2015. No. 5. 8063. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep08063>.
- Lin S., Liu Ya., Huang X. Climate-induced Arctic-boreal peatland fire and carbon loss in the 21st century. *Science of the Total Environment*. 2021. No. 796. 148924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148924>.
- Lukenbach M.C., Hokanson K.J., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Granath G., Waddington J.M. Post-fire ecohydrological conditions at peatland margins in different hydrogeological settings of the Boreal Plain. *Journal of Hydrology*. 2017. No. 548. P. 741–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.034>.
- Marcotte A.L., Limpens J., Stoof C.R., Stoorvogel J.J. Can ash from smoldering fires increase peatland soil pH? *International Journal of Wildland Fire*. 2022. No. 31. P. 607–620. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF21150>.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity. *Journal of Hydrology*. 2017. No. 554. P. 656–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.036>.
- Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*. 2021. No. 205. 105464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>.
- Taminskas J., Linkeviciene R., Simanauskiene R., Jukna L., Kibirkstis G., Tamkeviciute M. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability. *Geomorphology*. 2018. No. 304. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.026>.
- Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms. *Journal of Hydrology*. 2013. No. 486. P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.014>.
- Wieder R.K., Scott K., Kamminga K., Vile M.A., Vitt D.H., Bone T., Xu B., Benscoter B.W., Bhatti J.A. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada. *Global Change Biology*. 2009. No. 15. P. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01756.x>.

Received 18 January 2024

Accepted 13 March 2024

Published 18 March 2024

About the authors:

Anna A. Sinyutkina – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); ankalaeva@yandex.ru

Arina V. Olennikova – Junior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); olennikovaarin@yandex.ru

Lyudmila Yu. Sun-zu-li – Junior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); lyuda.sunzuli@mail.ru

Lyudmila P. Gashkova – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher in the Research Department of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (Tomsk, Russia); gashkova-lp@rambler.ru

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/)