



Check for updates

Изменение численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры верхового Усть-Бакчарского болота в процессе постпирогенного восстановления

© 2025 О. М. Минаева , Т. И. Зюбанова , Е. Е. Акимова , А. А. Синюткина 

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина, 3, г. Томск, 634050, Россия.

E-mail: t.i.zyubanova@yandex.ru

Цель исследования. Изучить динамику численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры торфяных олиготрофных почв верхового Усть-Бакчарского болота в условиях постпирогенного восстановления.

Место и время проведения. Работы проведены на территории Усть-Бакчарского болота, расположенного в южно-таежной подзоне Западной Сибири в пределах Томской области в 2022–2024 гг.

Методы. На основе анализа архивных спутниковых данных выделены три контура пожаров 1999, 2003 и 2014 гг. Отбор образцов торфа провели на двух площадках – постпирогенной UBF1 (подвергшейся пожарам 1999 и 2014 гг.) и условно фоновой UB (пожар 1999 г.) из слоев 0–15 и 15–30 см, включая участки понижений и повышений. Численность микроорганизмов определяли методами разведения и высева на плотные питательные среды с дальнейшим подсчетом количества колониеобразующих единиц (КОЕ). Для анализа функциональной эколого-трофической структуры микробного сообщества болотных почв рассчитаны коэффициенты олиготрофности и минерализации.

Основные результаты. Установлено, что численность копиотрофной и олиготрофной микрофлоры в почвах Усть-Бакчарского болота была на сравнительно невысоком уровне, не превышая $1,7 \times 10^7$ и $6,8 \times 10^7$ КОЕ/г почвы, соответственно. На выбранном участке исследования (понижение или повышение) не обнаружено значительного повторяющегося в годовой динамике повышения или понижения численности копиотрофов и олиготрофов, а ее вариация в большей степени зависела от глубины отбора и года исследования. Действие пожара на изучаемых участках, на протяжении всего периода исследований приводило, в основном, к значительному снижению числа как копиотрофов, так и олиготрофов (до 44 раз) по сравнению с фоновыми участками, что связано с выгоранием растительного покрова в верхних слоях торфа. Число микромицетов также находилось на достаточно невысоком уровне (до $2,6 \times 10^5$ КОЕ/г почвы). Влияние пожаров на обилие микромицетов неоднозначно: в 2022–2023 гг. отмечено их увеличение до 70 раз по сравнению с фоновыми участками, однако к 2024 г. произошло снижение до 2,6 раз на постпирогенных участках. Отмечено, что микромицеты в почвах верхового Усть-Бакчарского болота занимают, преимущественно, олиготрофные эколого-трофические ниши. На постпирогенных участках на протяжении исследований коэффициент олиготрофности был ниже (до 8 раз), что свидетельствует о снижении устойчивости функционирования болотной экосистемы и увеличении ее зависимости от поступления свежего органического вещества. Коэффициент минерализации был значительно повышен (до 28 раз), что отражает интенсификацию процессов разложения органического вещества на данном этапе.

Заключение. Полученные результаты демонстрируют, что пожары приводят к обеднению состава микробного сообщества и уменьшению численности основных эколого-трофических групп. Перестановка в структуре почвенной микрофлоры Усть-Бакчарского болота на постпирогенных участках приводит к уменьшению коэффициента олиготрофности и увеличению коэффициента минерализации. Учитывая сравнительно невысокую численность микрофлоры на исследуемых участках Усть-Бакчарского болота по сравнению с числом почвенных микроорганизмов в других болотных экосистемах, можно предположить, что исследуемая экосистема характеризуется замедленными циклами основных биогенных элементов.

Ключевые слова: болотная экосистема; коэффициент минерализации; коэффициент олиготрофности; микромицеты; микробное сообщество; пожары; постпирогенное восстановление.

Цитирование: Минаева О.М., Зюбанова Т.И., Акимова Е.Е., Синюткина А.А. Изменение численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры верхового Усть-Бакчарского болота в процессе постпирогенного восстановления // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e333. DOI: [10.31251/pos.v8i4.333](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.333)

ВВЕДЕНИЕ

Природная особенность Западной Сибири – высокая заболоченность, достигающая 30%, и широкое развитие сфагновых болот (Синюткина и др., 2024). Западно-Сибирские болота,

охватывающие обширные территории от Урала до Енисея, представляют собой один из крупнейших на планете комплексов заболоченных экосистем. Болота Западной Сибири – мощные биогеохимические «фабрики», которые участвуют в регуляции гидрологического режима обширных территорий, циклах углерода, азота и других элементов, а также служат средой обитания для множества редких и эндемичных видов флоры и фауны (Синюткина, 2024). Особенное значение они имеют для накопления и долгосрочного хранения органического углерода в форме торфа, что играет ключевую роль в глобальном балансе парниковых газов и замедлении темпов изменения климата. В условиях растущего антропогенного давления на биосферу Земли и наблюдающихся климатических изменений, изучение и сохранение этих экосистем приобретает особую актуальность.

Особенность болот Томской области – сочетание их различных типов: верховых, низинных (эвтрофных) и переходных, а также уникальный веретьево-топяной сетчато-полигональный тип низинных болот. Болота, в частности объект нашего исследования верховое Усть-Бакчарское болото, играют важную роль в депонировании органического углерода, они эффективные «поглотители» CO_2 ; однако различные антропогенные факторы, негативно влияющие на их функционирование, способны превратить данные экосистемы в источник парниковых газов, что усиливает последствия глобального потепления (Головацкая, Никонова, 2017; Sinyutkina, 2021).

До настоящего момента пожары в Томской области остаются одной из острых экологических проблем (Харанжевская, Синюткина, 2023; Синюткина и др., 2024; Feurdean et al., 2020). Данные статистики показывают, что с 2000-х годов число пожаров и площади выгоревших территорий сохраняются на значительном уровне, а пик приходится на засушливые периоды и плотно заселенные районы (Игнатьева и др., 2020). Пожары уничтожают растительный покров и верхний слой торфа, резко изменяют химический состав почвы и воды, способствуют выделению парниковых газов, усиливая климатическое воздействие. Известно, что на постпирогенных участках отмечается повышение степени разложения и зольности в верхних слоях почвы по сравнению с участками, не подвергшимися воздействию пожаров (Веретенникова и др., 2021; Харанжевская, Синюткина, 2023).

Биологическая активность почв играет ключевую роль в стабильном функционировании болотных экосистем (Гродницкая и др., 2022). Она обусловлена функционированием микробных сообществ и фауны, которые играют главную роль в процессах гумификации, минерализации, нитрификации и иных почвенных процессах, изменяя химический состав торфа по мере его разложения, а также обеспечивая биохимический гомеостаз и стабильный кругооборот основных элементов (Волкова и др., 2020). Учитывая изменения условий среды обитания (влажность, аэрация, температура) и ускоренную деградацию органического вещества на постпирогенных участках болот, большинство исследователей отмечают трансформацию структуры микробного сообщества почв (Гродницкая и др., 2022). Однако данных о путях восстановления микробного сообщества после пожаров в настоящее время недостаточно.

Цель работы – изучить динамику численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры торфяных олиготрофных почв верхового Усть-Бакчарского болота в условиях постпирогенного восстановления.

В задачи исследования входило:

1. Оценить влияние пожаров верхового Усть-Бакчарского болота на численность наиболее значимых трофических групп микроорганизмов.
2. Рассчитать и проанализировать изменение коэффициентов олиготрофности и минерализации почв верхового Усть-Бакчарского болота при постпирогенном восстановлении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Усть-Бакчарское болото расположено в южно-таежной подзоне Западной Сибири в пределах Томской области на террасе р. Бакчар (рисунок). Площадь болота составляет $3,5 \text{ км}^2$, из которых $1,6 \text{ км}^2$ осушено в 1980 гг. для добычи торфа, расстояние между каналами 40 м. В разные годы после осушения болото подвергалось выгоранию. На основе анализа архивных спутниковых данных Landsat и базы данных FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) на территории болота выделено три контура пожаров 1999 г., 2003 г. и 2014 г. Наибольшая площадь распространения пожара составила $0,9 \text{ км}^2$ в 1999 г., пожары 2003 г. и 2014 г. менее обширны, площади горения составляли $0,7$ и $0,4 \text{ км}^2$ соответственно. Растительный покров до осушения и пожаров был представлен сосново-кустарниковым сфагновым фитоценозом. Мощность торфяной залежи около 3 м, образована, преимущественно, сфагновым торфом (Синюткина и др., 2024).

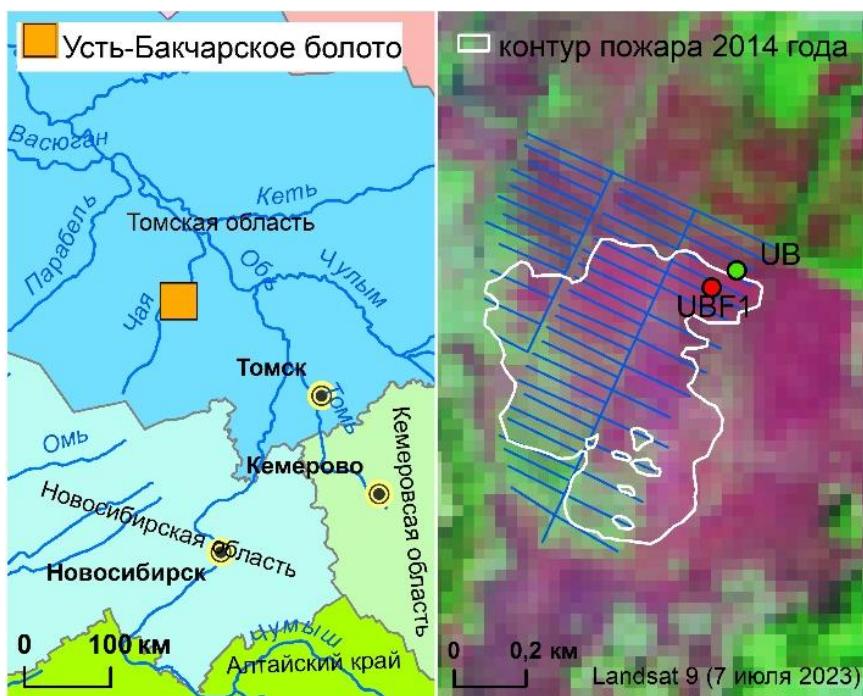


Рисунок. Схема расположения ключевых участков исследования Усть-Бакчарского болота.

Отбор образцов торфа проводился на двух площадках – постпирогенной (UBF1) и условно фоновой (UB) (рисунок, табл. 1) в 2022–24 гг. В связи с отсутствием невыгоревших участков в пределах осушенной части болота, в качестве фоновой выбрана площадка в пределах контура наиболее раннего пожара.

Таблица 1
Характеристика объектов исследования

Площадка	Координаты	Годы пожаров	Фитоценоз
UBF1	57°34'39'' с.ш. 82°16'22'' в.д.	1999, 2014	кустарничково-моховой
UB	57°34'41'' с.ш. 82°16'25'' в.д.	1999	березово-сосновый кустарничково-моховой

На площадке UBF1 в результате пожара 2014 г. произошло полное выгорание растительного покрова и верхнего слоя торфяной залежи. В первые годы после пожара толщина горелого слоя составляла несколько см, к 2022–24 гг. она сократилась до 1 см и менее. Через 8–10 лет после пожара здесь продолжает сохраняться высокая доля открытых поверхностей (20–30%), отмечено зарастание *Polytrichum strictum* (**проективное покрытие (ПП) 10–15%**), ПП сфагновыми мхами не более 10%, ПП ярусом подроста из сосны и березы менее 10%. Наблюдается полное восстановление кустарничкового яруса (ПП 80%).

На площадке UB отмечено восстановление древесного яруса из сосны и березы (ПП до 20%), кустарников (ПП 80%), частичное восстановление сфагновых мхов (ПП 25%), доля открытых поверхностей сократилась до 30%.

Микрорельеф участков мелко-кочковатый и отличается сглаженностью форм в сравнении с естественными сосново-кустарничково-сфагновыми болотами; амплитуда колебаний высот на обеих площадках составляет около 30 см. Указанная особенность микрорельефа связана с отсутствием интенсивного разрастания сфагновых мхов, образующих положительные формы – моховые подушки на естественных болотах, даже через 25 лет после пожара на площадке UB. Выровненность поверхности обуславливает однородность водно-физических свойств торфяной залежи между положительными и отрицательными формами микрорельефа.

Верхние горизонты торфяной залежи обеих площадок сложены фускум торфом с низкой зольностью (1–3%), кислой реакцией среды (рН 3,3–3,8), низкой степенью разложения (10–15%). Средняя влажность за период 2022–24 гг. изменялась в пределах 89,7–92,0% с минимальными

значениями в 2023 г. и максимальными в 2022 г. Зольность понижений на обеих площадках и повышения на площадке UBF1 в слое 0–15 см выше в сравнении с нижележащим 15–30 см (4–7 и 2%, соответственно). На положительной форме площадки UB, наоборот, зольность оказалась выше в слое 15–30 см (1,5 и 6%, соответственно) в связи с наличием на этой глубине трансформированной горелой прослойки пожара 1999 г. Наблюдаются некоторые различия в температурном режиме торфяной залежи, как между площадками, так и между повышениями и понижениями в пределах одной площадки. По данным автоматического мониторинга, полученным на высоте около средней поверхности, с интервалом измерений 1 час за период май–сентябрь 2024 года, средняя температура на площадке UBF1 составила 12,2 °C на глубине 10 см и 10,7 °C на глубине 20 см, на площадке UB ниже на 0,7–0,9 °C. Площадка UBF1 характеризуется большей амплитудой суточных (на глубине 10 см 2,9 и 1,9 °C, соответственно) и сезонных (21,7 и 19,4 °C) колебаний температуры (Синюткина, 2025). По данным измерений в дату отбора, температура в слоях 10 и 20 см оказалась на 2–3 °C выше на повышениях в сравнении с понижениями на площадке UBF1 и на 3–5 °C выше на площадке UB.

Комплекс полевых исследований численности микроорганизмов проведен в июле–августе 2022, 2023 и 2024 гг. Численности микроорганизмов на участках понижения и повышения анализировали на глубинах 0–15 и 15–30 см, которые на протяжении вегетационного периода в находятся, в основном, выше и ниже уровня залегания болотных вод, соответственно. Микробиологический анализ проведен из смешанного образца торфа, полученного из не менее трех повторностей, взятых из отобранных монолитов, размером 20×20 см.

Численность микроорганизмов в субстрате определяли методами высея на плотные питательные среды: копиотрофов – на гидролизате рыбной муки (ГРМ-агаре); олиготрофов – на голодном агаре (агар-агар 2% и дистиллированная вода); микроскопических грибов – на среде Чапека (50 г/л, pH 5,0–5,5) (Практикум по микробиологии, 2005). Температура инкубирования 26–28 °C. Спустя трое суток проводили учет копиотрофов, семь суток – грибов и олиготрофов (Терещенко и др., 2017). Для определения численности микроорганизмов использовали высея образцов в трех биологических и шести аналитических повторностях каждый. Численность микроорганизмов рассчитывали и выражали в **колониеобразующих единицах (КОЕ)** на грамм абсолютно-сухой почвы (Головченко и др., 2022).

Для анализа структуры микробного сообщества вычисляли коэффициент олиготрофности и коэффициент минерализации. **Коэффициент олиготрофности (Ко)** – отношение численности микроорганизмов, выросших на голодном агаре, к численности микроорганизмов, выросших на ГРМ-агаре. **Коэффициент минерализации (Км)** рассчитывали как отношение численности микроорганизмов, усваивающих, преимущественно, неорганические источники азота и не содержащее азот органическое вещество, к численности аммонификаторов, ориентированных, в основном, на усвоение органического азота.

Статистическая обработка полученных результатов проведена с помощью методов статистического анализа и представлена в виде средней арифметической величины с доверительным интервалом с учетом дискретного распределения Пуассона данных о численностях в выборках. Оценка значимости различий численности микроорганизмов на различных участках проведена с помощью неравенства Чебышева.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существование болотных систем и почв невозможно без микроорганизмов, которые участвуют как в процессах почвообразования, так и развития болот (Артамонова, 2002). Почвообитающие микроорганизмы являются фундаментальными участниками почвообразовательных процессов и устойчивого функционирования болотных экосистем (Филиппова, 2008; Волкова и др., 2020). Значительная доля представителей микробного сообщества участвует в активном разложении органических остатков сфагновых мхов, кустарников и других болотных растений, преобразуя их в гумусовые вещества. Их участие в данном процессе составляет основу формирования торфа. Благодаря ферментативной активности микрофлоры почв осуществляются процессы гумификации, минерализации, денитрификации и другие биохимические превращения, определяющие химические и физические свойства болотных почв. Микроорганизмы обеспечивают круговорот углерода, азота, фосфора, серы и других элементов в экосистемах. Благодаря быстрой перестройке микробного сообщества под изменяющиеся условия окружающей среды (влажность, аэрация, температура), поддерживается устойчивость болот к внешним воздействиям.

Высокая численность микробов в торфяных болотах обеспечивает интенсивные процессы разложения органического вещества и круговорота элементов (Головченко и др., 2018; Волкова и др.,

2020). Общее микробное число, как правило, связывают с наличием копиотрофов, которые предпочитают или способны быстро развиваться в средах, богатых органическим веществом и питательными соединениями. В болотных почвах такие условия создаются, например, при поступлении свежих растительных остатков и во влажных верхних горизонтах, где высоко содержание растворимых мономеров (сахаров, аминокислот). Копиотрофные микроорганизмы являются основными участниками интенсивного разложения органических субстратов, быстро используя доступные для трансформации органические соединения и запуская цепочку минерализации. Напротив, олиготрофные микроорганизмы приспособлены к жизни в условиях ограниченного содержания доступных питательных веществ. Данные представители почвенной микрофлоры доминируют в зрелых, относительно бедных слоях болот, где легкоразлагаемая органика уже практически отсутствует, и вызывают дальнейшую деградацию и минерализацию торфа на поздних этапах сукцессии. Олиготрофы растут медленно, потребляют минимальные количества субстрата и особенно важны для устойчивой поддержки процессов разложения в старых слоях торфа, где скапливаются сложнодеградируемые органические соединения и снижается приток новой органики. Деятельность копиотрофных и олиготрофных микроорганизмов регулирует скорость и глубину разложения органических веществ, сохраняя баланс между накоплением (консервацией) и минерализацией органического вещества (Добровольская и др., 2014).

Исходя из сказанного, численность копиотрофных микроорганизмов свидетельствует о большой концентрации легкоразлагаемого органического вещества в почвах болот или о наличии постоянного пополнения их запаса из вне (растительные и животные остатки). В проведенных исследованиях показано, что на Усть-Бакчарском болоте численность копиотрофной микрофлоры находится на достаточно невысоком уровне (табл. 2).

Таблица 2
Число КОЕ копиотрофных микроорганизмов, млн/г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	1,3 \pm 0,2	5,1 \pm 0,9	4,7 \pm 0,8
	UBF1	0,9 \pm 0,1*	3,4 \pm 0,5*	2,9 \pm 0,6*
повышение, 0–15 см	UB	11 \pm 1,3	3,5 \pm 0,6	3,5 \pm 0,7
	UBF1	1,4 \pm 0,1*	6,7 \pm 0,9*	3,9 \pm 0,7*
понижение, 15–30 см	UB	5,3 \pm 0,1	0,4 \pm 0,3	1,0 \pm 0,4
	UBF1	11 \pm 1,6*	17 \pm 1,7*	0,4 \pm 0,2*
повышение, 15–30 см	UB	13 \pm 1,3	1,1 \pm 0,5	1,8 \pm 0,4
	UBF1	0,3 \pm 0,1*	1,4 \pm 0,5*	0,4 \pm 0,3*

Примечание (здесь и далее в табл. 3–4).

* – установлена статистическая значимость отличий результатов между условно фоновым (UB) и постпирогенным (UBF1) участками.

Известно, что численность микроорганизмов в верхних слоях торфа может достигать десятков млрд. КОЕ/г (Головченко и др., 2021). В наших исследованиях на всем его протяжении число копиотрофных микроорганизмов варьировало от $2,9 \times 10^5$ до $1,7 \times 10^7$ КОЕ/г почвы. Выбранный участок обследований (понижение или повышение), как правило, не оказывал значительного закономерного влияния на численность копиотрофов: вариация числа жизнеспособных микроорганизмов происходила по глубине отбора и по годам независимого от данного фактора.

Наличие пожара на изучаемых участках на протяжении всего периода исследований приводило, в основном, к значительному понижению численности данной трофической группы микроорганизмов – до 44 раз. Исключение составляли участки понижения на глубине залегания 15–30 см, в которых периодически наблюдалась более высокая численность копиотрофных микроорганизмов после пожара. Это, возможно, связано с режимом увлажнения; как правило, копиотрофные организмы являются аэробами, чья численность в болотных водах всегда ниже, чем верхних, более сухих торфяных горизонтах. В случае подсыхания нижних слоев, в связи с невысокой микробной активностью происходит накопление доступной органики, которая в более благоприятных условиях дает возможность для кратковременного увеличения численности микроорганизмов данной трофической группы.

Уменьшение пула микроорганизмов на участках, подвергшихся пожару, неоднократно описано и связано с выгоранием растений и верхних слоев торфа, которые являются основными путями пополнения доступных легкоразлагаемых органических соединений (Богородская и др., 2005; Филиппова, 2008; Гродницкая и др., 2022).

Несмотря на то, что на постпирогенных участках происходит увеличение зольности и уменьшение концентрации органического вещества (Головацкая, Никонова, 2017; Синюткина и др., 2024), а значит, следовало бы ожидать увеличения концентрации олиготрофных микроорганизмов, на исследуемых участках Усть-Бакчарского болота наблюдается обратная ситуация (табл. 3).

Таблица 3

Число КОЕ олиготрофных микроорганизмов, млн/г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	3,4 \pm 0,3	28 \pm 2,0	68 \pm 9,1
	UBF1	1,6 \pm 0,2*	6,4 \pm 0,7*	6,2 \pm 0,9*
повышение, 0–15 см	UB	19 \pm 1,7	14 \pm 1,3	9,7 \pm 1,1
	UBF1	13 \pm 1,1*	8,8 \pm 1,0*	13 \pm 1,3*
понижение, 15–30 см	UB	0,6 \pm 0,1	0,2 \pm 0,1	2,6 \pm 0,7
	UBF1	0,5 \pm 0,1*	2,9 \pm 0,2*	0,2 \pm 0,2*
повышение, 15–30 см	UB	11 \pm 1,2	0,3 \pm 0,2	4,0 \pm 0,7
	UBF1	0,8 \pm 0,0*	1,4 \pm 0,5*	1,0 \pm 0,4*

На протяжении всего периода исследований постпирогенные участки характеризовались снижением пула олиготрофных микроорганизмов по сравнению с фоновыми – до 44 раз. Данное наблюдение можно связать с тем, что уменьшение количества копиотрофной микрофлоры на постпирогенных участках приводит к сокращению потока сложноразлагаемых соединений, служащих основным субстратом для размножения олиготрофной микрофлоры.

Микромицеты играют ключевую роль в почвообразовательных процессах в болотных почвах, особенно в условиях кислой среды и низкой теплообеспеченности, характерных для торфяных горизонтов. Они доминируют среди микроорганизмов, разлагающих целлюлозу, могут достигать 60–90% всей микрофлоры, участвующей в деструкции органического вещества. Благодаря своей адаптации к кислым и прохладным условиям, микромицеты обеспечивают разложение трудно минерализуемых органических субстратов в болотах, где бактериальная активность подавлена, что делает их ключевым звеном в процессах гумификации, минерализации и преобразования органического вещества, поддерживая формирование и устойчивость торфяной почвы как экосистемы (Хабибуллина и др., 2014). Численность микромицетов в торфяных почвах болот часто достигает высоких значений (сотни тысяч – десятки миллионов КОЕ/г) (Филиппова, 2008; Головченко и др., 2018) и широко варьирует в зависимости от типа болота, глубины слоя и условий среды.

Для Усть-Бакчарского болота численность микромицетов, как и общая микробная, находилась на достаточно невысоком уровне. В проведенный период исследований она варьировала от $1,2 \times 10^2$ до $2,6 \times 10^5$ КОЕ/г почвы (табл. 4).

Таблица 4

Число грибных КОЕ на плотных питательных средах, тыс./г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	120 \pm 15	120 \pm 40	28 \pm 19
	UBF1	78 \pm 10	61 \pm 21*	11 \pm 11*
повышение, 0–15 см	UB	54 \pm 9	90 \pm 10	100 \pm 39
	UBF1	56 \pm 8	140 \pm 39*	260 \pm 58*
понижение, 15–30 см	UB	1,5 \pm 1,5	0,1 \pm 0,1	43 \pm 27
	UBF1	9 \pm 4*	9 \pm 1*	3 \pm 3*
повышение, 15–30 см	UB	30 \pm 6	5 \pm 8	140 \pm 38
	UBF1	33 \pm 8*	86 \pm 12*	55 \pm 19*

Постпирогенные участки на протяжении 2022–2023 гг. исследований характеризовались либо отсутствием значимых изменений численности микромицетов, либо ее увеличением до 70 раз по сравнению с численностью данных микроорганизмов в почвах фона. В 2024 г. практически во всех образцах почв постпирогенных участков отмечена меньшая численность микроскопических плесневых грибов (до 2,6 раз).

По трофической принадлежности почвенные плесневые грибы могут быть как копиотрофами, так и олиготрофами. При этом, в связи с большей бактериальной численностью аэробных быстроразмножающихся бактерий на участках с оптимальными для их развития условиями, часто микромицеты вынуждены занимать олиготрофные ниши, что и наблюдалось на изучаемом болоте. Фактически значительная доля олиготрофов представлена плесневыми грибами, принадлежащими в основной массе к родам *Mucor*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium* и *Chaetomium*. По преимущественному родовому составу микромицетов изучаемые участки не отличались от других сфагновых болот (Филиппова, 2008; Хабибуллина и др., 2014).

Соотношение копиотрофных и олиготрофных микроорганизмов является одним из индикаторов, определяющих динамику и устойчивость болотных почв, их способность аккумулировать углерод, очищать воду, регулировать климатические процессы и поддерживать функции всей болотной экосистемы. На основании данных о численности копиотрофных и олиготрофных представителей, а также количестве микроорганизмов, способных утилизировать минеральные формы азота, высчитывались коэффициенты олиготрофности и минерализации, определяющие соотношение этих групп (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты олиготрофности (K_o) и минерализации (K_m)

Участок	Год исследования					
	2022		2023		2024	
	K_o	K_m	K_o	K_m	K_o	K_m
понижение, 0–15 см	UB	2,69	0,93	5,46	0,02	14,30
	UBF1	1,71	0,88	1,91	0,55	2,15
повышение, 0–15 см	UB	1,75	0,05	4,02	0,04	2,76
	UBF1	8,91	0,50	1,31	0,28	2,51
понижение, 15–30 см	UB	0,11	0,54	0,35	0,28	3,43
	UBF1	0,05	0,05	0,17	0,22	0,57
повышение, 15–30 см	UB	0,82	0,03	0,24	0,02	2,26
	UBF1	2,64	0,31	1,00	0,10	2,43
						0,72

Данные коэффициенты отражают степень активности и адаптацию микробных процессов разложения органического вещества в почвах, что напрямую связано с устойчивостью экосистем и балансом углерода в болотах.

Коэффициент олиготрофности (K_o) демонстрирует адаптацию микробных сообществ к условиям бедного субстрата, с низким содержанием органики, или с органикой, более сложной для деградации. Высокий коэффициент олиготрофности, как правило, свидетельствует о доминировании микроорганизмов, способных выживать в субстратах с низкими концентрациями питательных веществ и осуществлять деградацию малодоступных простых органических соединений, что важно для устойчивого функционирования болотных экосистем.

Для постпирогенных участков Усть-Бакчарского болота в годы исследований, как правило, наблюдалось уменьшение коэффициента олиготрофности (до 8 раз), что может свидетельствовать об уменьшении устойчивости болотной экосистемы и большей зависимости от поступления новых источников углерода. На участке пожара 1999 г. низкие значения коэффициента олиготрофности характерны для слоя, в котором проявляются следы старого пожара (UB повышение), но следует отметить, что в вышележащем слое наблюдается увеличение данного коэффициента. Это может свидетельствовать о восстановлении состава микробного сообщества и создании благоприятных условий для продолжения современной аккумуляции торфа. Можно предположить, что на участке пожара 2014 г. в процессе постпирогенного восстановления также произойдет увеличение коэффициента олиготрофности.

Коэффициент минерализации (K_m) отражает интенсивность разложения органического вещества. Значение $K_m > 1$ свидетельствует об активных процессах высвобождения минеральных соединений из органических соединений, а значения $K_m < 1$ – о преобладании иммобилизации и консервации органического вещества в виде торфа или в самой микрофлоре (Зинченко и др., 2014).

Для болотных систем, в отличии от окультуренных пахотных почв, характерно небольшое значение данного коэффициента. На протяжении исследований для постпирогенных и фоновых участков Усть-Бакчарского болота значения коэффициента минерализации варьировали в пределах 0,02–0,93. Влияние пожаров на данный параметр, как правило, характеризовалось его увеличением (до 28 раз); реже отмечалось отсутствие влияния или небольшое его понижение. Наблюдается тенденция к постепенному снижению коэффициента минерализации на площадке UBF1 в слое 0–15 см, что, вероятно, отражает создание благоприятных условий для аккумуляции торфа; можно предположить, что при дальнейшем разрастании сфагновых мхов, процесс торфонакопления продолжится

Увеличение коэффициента минерализации обычно связывают с разрушением растительного покрова и нарушением гидрологического режима, что способствует доступу кислорода и ускоренному разложению органики в верхних слоях торфа. В начальные годы после пожара повышение коэффициента минерализации может сопровождаться усилением выделения углекислого газа (CO_2) и других продуктов разложения, что свидетельствует об активном распаде торфа. С течением времени (через 6–10 лет после пожара) коэффициент минерализации постепенно снижается по мере восстановления растительного покрова, изменения микробной активности и восстановления влажностного режима болота (Харанжевская, Синюткина, 2023). Таким образом, в начальные годы после пожара активность микроорганизмов, способных минерализовать органику, возрастает, но вместе с этим микробное сообщество становится менее разнообразным и смещается в сторону увеличения присутствия олиготрофных групп, адаптированных к условиям с ограниченными органическими субстратами (Богородская и др., 2005; Богородская, Иванова, 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние пожаров на численность микроорганизмов разных эколого-трофических групп не вызывает сомнений. В основном, на постпирогенных участках наблюдается обеднение видового состава микрофлоры и уменьшение общего количества микроорганизмов, разлагающих как легкодоступную органику, так и сложно минерализуемые субстраты, что связано, прежде всего, со снижением потока органического вещества из вне. Микромицеты в почвах Усть-Бакчарского болота, как и в целом бактериальное сообщество, на постпирогенных участках имеют тенденцию к снижению численности по сравнению с фоновыми. Отмечено уменьшение коэффициента олиготрофности и увеличение коэффициента минерализации для постпирогенных участков. Учитывая небольшую выявленную численность микрофлоры изученных трофических групп, характерную для исследуемых участков Усть-Бакчарского болота по сравнению с данными о количестве почвенных микроорганизмов в других болотных экосистемах, по нашему мнению, можно заключить, что почвы данного болота характеризуются замедленными циклами основных биогенных элементов, необходимыми для поддержания баланса экосистемы. Полученные значения коэффициентов минерализации и олиготрофности могут свидетельствовать о том, что на протяжении всего периода восстановления болота после пожаров (более 10 лет) изучаемая экосистема все еще находится в стадии активизации минерализационных процессов. Кроме того, на основе анализа коэффициентов олиготрофности и минерализации выдвинуто предположение о направленности постпирогенной динамики болотной экосистемы, а именно – прекращении или замедлении процесса деградации и возобновлении процесса аккумуляции торфяной залежи.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

- Артамонова В.С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. 225 с.
- Богородская А.В., Иванова Г.А. Оценка состояния микробных комплексов почв после пожаров и рубок в сосновых лесах Нижнего Приангарья // Сибирский лесной журнал. 2020. № 3. С. 37–50. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200304>
- Богородская А.В., Сорокин Н.Д., Иванова Г.А. Влияние пирогенного фактора на микробные комплексы почв сосновых лесов Средней Сибири // Лесоведение. 2005. № 2. С. 25–31.
- Веретенникова Е.Э., Курьина И.В., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Смирнов С.В. Геохимические особенности торфяных залежей олиготрофных болот южно-таежной зоны Западной Сибири // Геохимия. 2021. Том 66. № 6. С. 562–576. <https://doi.org/10.31857/S0016752521050095>

Волкова Е.М., Акатова Е.В., Дубинина Н.С. Микробиологическая активность торфов разного генезиса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 65–79.

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

Головченко А.В., Харлак А.Л., Глухова Т.В. Оценка микробного пула растений верховых болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 25–43. <https://doi.org/10.17223/19988591/43/2>

Головченко А.В., Дмитриенко Ю.Д., Морозов А.А., Поздняков Л.А., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Микробная биомасса в низинных торфяниках: запасы, структура, активность // Почвоведение. 2021. № 7. С. 838–848. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050099>

Головченко А.В., Семенова Т.А., Морозов А.А., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Микробиота низинных торфяников // Почвоведение. 2022. № 3. С. 337–346. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22030054>

Гродницкая И.Д., Карпенко Л.В., Пашкеева О.Э., Гончарова Н.Н., Старцев В.В., Батурина О.А., Дымов А.А. Влияние лесных пожаров на микробиологические свойства торфяных олиготрофных почв и торфяно-подзолов глеевых в болотах северной части Сым-Дубчесского междуречья (Красноярский край) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 454–468. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22040098>

Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. Анализ экологических факторов, ограничивающих деструкцию верхового торфа // Почвоведение. 2014. № 3. С. 304–316. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14030046>

Зинченко М.К., Бибик Т.С., Стоянова Л.Г. Влияние систем удобрений на структуру и изменение отдельных физиологических групп микроорганизмов в серой лесной почве Владимирского Ополья // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–3. С. 552–557.

Игнатьева А.В., Кнауб Р.В., Чупина Е.А. Оценка влияния лесных пожаров на экологическую обстановку и меры по мониторингу за чрезвычайными ситуациями в лесах Томской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 85–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/use.37367>

Практикум по микробиологии: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук и др.; Под ред. А.И. Нетруса. Москва: Академия, 2005. 608 с.

Синюткина А.А. Использование вегетационных и водных индексов для оценки состояния постпирогенных верховых болот Западной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2024. Том 48. С. 90–109. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>

Синюткина А.А. Трансформация температурного режима торфяной залежи на постпирогенных болотах (Западная Сибирь) // Отражение био-, гео-, антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сборник материалов VIII Международной научной конференции, посвященной 95-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (Томск, 16–19 сентября 2025 г.) / отв. ред. С.П. Кулижский. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2025. С. 109–113.

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. Том 79. № 1. С. 78–88. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>

Синюткина А.А., Оленникова А.В., Сун-зу-лии 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. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>

Терещенко Н.Н., Акимова Е.Е., Минаева О.М. Современные методы оценки микробиологических свойств и экологического статуса почвы: Практикум. Томск: Издательский дом ТГУ, 2017. 152 с.

Филиппова Н.В. К изучению микоценоза болот: некоторые данные о болотных микро- и макромицетах // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2008. Том 1. № S1. С. 141–155.

Хабибуллина Ф.М., Кузнецова Е.Г., Васенева И.З. Микромицеты подзолистых и болотно-подзолистых почв в подзоне средней тайги на северо-востоке европейской части России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1228–1234. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14100049>

Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Том 334. № 6. С. 193–203. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4042>

Feurdean A., Floreescu 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. Vol. 244. P. 106495. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>

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. Vol. 205. P. 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Поступила в редакцию 05.09.2025

Принята 28.11.2025

Опубликована 12.12.2025

Сведения об авторах:

Минаева Оксана Модестовна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); mom05@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5925-6022>

Зюбанова Татьяна Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); t.i.zyubanova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9429-9706>

Акимова Елена Евгеньевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); akimovanell@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3279-8200>

Синюткина Анна Алексеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Changes in the abundance of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration

© 2025 O. M. Minaeva , T. I. Zyubanova , E. E. Akimova , A. A. Sinyutkina 

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Gagarina st., 3, Tomsk, Russia. E-mail: t.i.zyubanova@yandex.ru

The aim of the study was to investigate the population dynamics of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the peat oligotrophic soils of the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration.

Location and time of the study. The research was conducted in the Ust-Bakchar bog located in the southern taiga subzone of West Siberia in Tomsk region over the period 2022–2024.

Methods. Based on the analysis of archival satellite data, three fire perimeters from 1999, 2003, and 2014 were delineated. Peat samples were collected at two sites: the post-fire UBF1 site, which had experienced fires in both 1999 and 2014, and the conditionally background UB site, affected by the 1999 fire, at depths of 0–15 and 15–30 cm, under microtopographic depressions and elevations. Microbial abundance was determined using dilution of soil suspension and plating it on solid nutrient media with subsequent counting of colony-forming units (CFU). To analyse the functional ecological-trophic structure of the soil microbial community, oligotrophic and mineralisation coefficients were calculated.

Results. The abundance of copiotrophic and oligotrophic microflora in soils of the Ust-Bakchar bog was relatively low, not exceeding 1.7×10^7 and 6.8×10^7 CFU g⁻¹ soil, respectively. The study sites, both depressions or elevations, did not exert significant systematic influence on the copiotrophs and oligotrophs abundance, the latter varied primarily due to sampling depth and year of investigation. The presence of fire at the study sites throughout the entire research period predominantly resulted in significant reductions in the abundance of both copiotrophs and oligotrophs (up to 44-fold) compared with the background site, where vegetation cover and upper peat layers were burnt. The abundance of micromycetes was also relatively low ($< 2.6 \times 10^5$ CFU g⁻¹ soil). The influence of fires on microbial abundance was ambiguous: in 2022–2023, increases of up to 70 times were observed compared with the background site; however, by 2024, this had declined by 2.6 times at post-fire sites. Micromycetes in the soils of the Ust-Bakchar raised bog primarily occupied oligotrophic ecological-trophic niches. At the post-fire sites, a decrease in the oligotrophic coefficient (up to 8 times) was typically observed, indicating reduced stability of the

bog ecosystem functioning and its increased dependence on fresh organic matter inputs. The mineralization coefficient increased 28 times, indicating intensification of organic matter decomposition processes.

Conclusions. The results demonstrate that fires lead to impoverishment of microbial community composition and reduction in abundance of the main ecological trophic groups. Structural shifts in the soil microflora of the Ust-Bakchar bog at post-fire sites resulted in decreased oligotrophic coefficients and increased mineralization coefficients. Taking into account the relatively low number of microorganisms in the studied area of the Ust-Bacharsky bog in comparison with the number of soil microorganisms in other ecosystems, it is possible to assume that the studied ecosystem is characterized by slow cycling of the main biogenic elements.

Keywords: bog ecosystem; mineralization coefficient; oligotrophic coefficient; micromycetes; microbial community; fires; post-fire restoration.

How to cite: Minaeva O.M., Akimova E.E., Zyubanova T.I., Sinyutkina A.A. Changes in the abundance of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e333. DOI: [10.31251/pos.v8i4.333](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.333) (in Russian with English abstract).

FUNDING

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

REFERENCES

- Artamonova V.S. Microbial specifical of soil reforming antropogenity in Western Siberia. Novosibirsk: SB RAS Publisher, 2002. 225 p. (in Russian).
- Bogorodskaya A.V., Ivanova G.A. Evaluation of soil microbial complexes after fires and logging in pine forests of the Lower Priangar'e. Siberian Journal Forestry Science. 2020. No. 3. P. 37–50. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20200304>
- Bogorodskaya A.V., Sorokin N.D., Ivanova G.A. The influence of fire on microbocenoses of soils in Central Siberian pine forests. Lesovedenie. 2005. No. 2. P. 25–31. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. Geochemistry International. 2021. Vol. 59. No. 6. P. 618–631. <https://doi.org/10.1134/S0016702921050098>
- Volkova E.M., Akatova E.V., Dubinina N.S. Microbiological activity of peats of different genesis. Izvestiya Tula State University. Earth Sciences. 2020. No. 4. P. 65–79. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikanova L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs. Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50. No. 5. P. 580–588. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Golovchenko A.V., Harlak A.L., Gluhova T.V. Assessment of the microbial pool of raised bog plants. State University Journal of Biology. 2018. No. 43. P. 25–43. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/43/2>
- Golovchenko A.V., Morozov A.A., Pozdnyakov L.A., Dmitrienko Y.D., Glukhova T.V., Inisheva L.I. Microbial biomass in eutrophic peatlands: stock, structure, and activity. Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 1068–1077. <https://doi.org/10.1134/S1064229321050094>
- Golovchenko A.V., Morozov A.A., Semenova T.A., Glukhova T.V., Inisheva L.I. The mycobiota of eutrophic peatlands. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 3. P. 348–356. <https://doi.org/10.1134/S106422932203005X>
- Grodnitskaya I.D., Karpenko L.V., Pashkeeva O.E., Goncharova N.N., Startsev V.V., Dymov A.A., Baturina O.A. Impact of forest fires on the microbiological properties of oligotrophic peat soils and gleyed peat podzols of bogs in the northern part of the Sym-Dubches interflue, Krasnoyarsk region. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 4. P. 460–473. <https://doi.org/10.1134/S1064229322040093>
- Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Zvyagintsev D.G. Analysis of ecological factors limiting the destruction of high-moor peat. Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. No. 3. P. 182–193. <https://doi.org/10.1134/S106422931403003X>
- Zinchenko M.K., Bibik T.S., Stoyanova L.G. Influence of systems of fertilizers on structure and change of separate physiological groups of microorganisms in grey forest pochve Vladimirs'ky Opolya. Fundamental Research. 2014. No. 12–3. P. 552–557. (in Russian).
- Ignateva A.V., Knaub R.V., Chupina E.A. Assessment of the impact of forest fires on the ecological situation and measures for monitoring of emergency situations in the forests of the Tomsk region. Advances in Current Natural Sciences. 2020. No. 4. P. 85–92. (in Russian). <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/use.37367>
- Microbiology Workshop: a textbook for students/ A.I. Netrusov, M.A. Egorova, L.M. Zakharchuk et al.; Edited by A.I. Netrusov. Moscow: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).

Sinyutkina A.A. The application of vegetation and water indices to assess the state of post-pyrogenic raised bogs in Western Siberia. The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. 2024. Vol. 48. P. 90–109. (in Russian). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>

Sinyutkina A.A. Transformation of the temperature regime of peat deposits in post-pyrogenic mires (Western Siberia). In book: Reflection bio-, geo-, antroposferal interactions in soil and soil cover. Collection of materials VIII International Scientific Conference, dedicated to the 95th anniversary of the department of Soil Science and Soil Ecology TSU (Tomsk, 16–19 September, 2025) / S.P. Kulizhskiy (ed.). Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2025. P. 109–113. (in Russian).

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia. Lomonosov Geography Journal. 2024. Vol. 79. No. 1. (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>

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. Vol. 7. No. 1. e246. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>

Tereshchenko N.N., Akimova E.E., Minaeva O.M. Modern methods for assessing soil microbiological properties and ecological status. Handbook. Tomsk: Publishing House of TSU, 2017. 152 p. (in Russian).

Filippova N.V To the bog fungi investigation: some data about micro- and macromycetes. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2008. No. S1. P. 141–155. (in Russian).

Khabibullina F.M., Kuznetsova E.G., Vaseneva I.Z. Micromycetes in podzolic and bog-podzolic soils in the middle taiga subzone of northeastern European Russia. Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. No. 10. P. 1027–1032. <https://doi.org/10.1134/S1064229314100044>

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Wildfire-related changes of mire water chemistry in forest-tundra and taiga zones of Western Siberia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. Vol. 334. No. 6. P. 193–203. (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4042>

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. Vol. 244. P. 106495. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>

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. Vol. 205. P. 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Received 05 September 2025

Accepted 28 November 2025

Published 12 December 2025

About the authors:

Oksana M. Minaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); mom05@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5925-6022>

Tatyana I. Zyubanova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); t.i.zyubanova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9429-9706>

Elena E. Akimova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); akimovanell@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3279-8200>

Anna A. Sinyutkina – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

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/)