

И.Д. Гродницкая, В.А. Сенашова, О.Э. Пашкеева, Г.И. Антонов

**ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МИКРОБИОМОВ ПОЧВ
ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ
В СТЕПНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ**

Введение. Современные проблемы рационального лесопользования во всем мире связаны с воспроизводством высокопродуктивных лесов. Лесные пожары, вспышки массового размножения насекомых, инвазии, неконтролируемая вырубка лесов приводят к снижению лесопродукционного потенциала, увеличению площадей безлесных территорий. В конечном итоге леса перестают выполнять свои биосферные функции, как на локальном, так и на глобальном уровнях [Воздействие..., 2014].

Лесные пожары наносят значительный ущерб биологическому потенциалу почв. Степень пирогенного воздействия на почву зависит от интенсивности и продолжительности пожара, теплопроводности, пористости и влажности почвы. Во время лесных пожаров температура на поверхности составляет около 200–300 °С, а при наличии большого количества детрита и валежника может достигать 500 °С и выше [Масягина и др., 2014; Neary et al., 1999]. Но уже при температуре 200 °С происходит потеря до 40% органического вещества почвы, снижение его содержания с разной скоростью отмечено для всех основных групп органических соединений [Fernandez et al., 1997]. В результате на поверхности почвы, пройденной пожаром, формируется новый маломощный (не более 1 см) органогенный пирогенный горизонт (Pyr), который по физико-химическим и биологическим свойствам значительно отличается от изначального, характерного для лесных почв [Шапченкова и др., 2011; Dymov et al., 2022].

Вследствие пожаров происходит накопление пирогенного углерода, существенно изменяются физико-химические свойства почвы, их водно-воздушный и гидротермический режимы, происходит изменение количества и стабильности органического вещества, что оказывает непосредственное влияние на биологические свойства почв [Dyrness et al., 1989; Fritze et al., 1994]. Почвенные микроорганизмы играют фундаментальную роль в регуляции биогеохимических циклов в почвах наземных экоси-

стем. Пирогенное воздействие на почву вызывает термическую деструкцию всей биоты [Certini, 2005; Barreiro, Díaz-Raviña, 2021; Certini et al., 2021]. В первую очередь пожары негативно сказываются на структуре и функциональной активности почвенных микробных комплексов: изменяются такие показатели, как соотношение физиологических и таксономических групп микроорганизмов (аммонификаторов, целлюлозолитиков, грибов, актиномицетов), содержание микробной биомассы и интенсивность дыхания, снижается скорость процессов минерализации [Масягина и др., 2014; Huffman et al., 2001]. Усиливается олиготрофность почв в отношении азота и других питательных элементов вследствие их потерь в газообразной и водорастворимой формах [Pietikainen et al., 2000; Dymov et al., 2022]. Тепловое воздействие уменьшает биомассу микроорганизмов, в основном за счет грибов, т.к. они наиболее уязвимы и восстанавливаются после пожаров гораздо медленнее, чем бактерии. При этом изменяется композиция микробиома: в почве становится меньше грибов, которые менее устойчивы к нагреванию, чем бактерии [Certini, 2005; Maïtaix-Solera et al., 2009; Perez-Valera et al., 2019].

Комплексная оценка биологических свойств почв с использованием показателей микробиологической активности позволяет своевременно распознавать проблемы и получать адекватные результаты в диагностике почв после пожаров. Кроме того, с помощью микробных индикаторов можно проводить экспресс-оценку их состояния и прогнозировать периоды восстановления почв после их нарушений [Ананьева, 2003; Антонов и др., 2014].

В качестве таких индикаторов (показателей) могут быть использованы интенсивность трансформации соединений углерода и азота в почве (дыхание/эмиссия CO_2 почвы, динамика содержания аммонийного и нитратного азота), содержание микробной биомассы, общее количество и таксономический состав бактерий и грибов, соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов, активность ферментов и нитрификации, динамика кислотности и окислительно-восстановительного потенциала. В целом эти показатели характеризуют состояние почв как в естественном (неповрежденном) виде, так и после их деградации, а также позволяют оценивать скорость их восстановления после нарушений [Ананьева, 2003; Сорокин, 2009; Гродницкая и др., 2022].

Цель исследований: с помощью микробиологических показателей дать оценку биологического состояния и скорости восстановления почв после пожаров под искусственными посадками лесных культур в аридной

зоне Ширинской степи и в сосняке Погорельского бора в Красноярской лесостепи.

Материалы и методы исследования. Состояние микробных сообществ почв в искусственных и естественных фитоценозах исследовали в сухостепной зоне Республики Хакасия (Ширинская степь) и в лесостепной зоне Красноярского края (Погорельский бор). Объекты исследований отличались между собой климатическими и почвенными условиями, давностью пожара, возрастом древостоев. В Ширинской степи почвы под посадками лесных культур – агроземы аккумулятивно-карбонатные темные легко- и среднесуглинистые, в Погорельском бору – темно-серая тяжелосуглинистая почва [Классификация..., 2004; Гродницкая и др., 2023; Сенашова и др., 2024]. Общим на вышеперечисленных объектах было: значительное повреждение напочвенного покрова, сгорела вся подстилка вплоть до прогорания почвы на 0,5–1,5 см в зависимости от участка, большое количество продуктов пирогазения, гибель некоторых микробных группировок, снижение ферментативной активности. Все это повлекло за собой увеличение олиготрофности исследуемых почв и снижение их биологической активности по сравнению с допожарным периодом.

В Ширинской степи (Республика Хакасия) в 2015 г. в прибрежной зоне оз. Ши́ра прошел сильный низовой пожар, переходящий в верховой, в котором погибли или были значительно повреждены 40-летние насаждения лесных культур: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.), вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.) (рис. 1). На момент пожара средняя высота деревьев лиственницы и сосны составляла 7–12 м, вяза – 4 м [Сорокин и др., 2017].



Рис. 1. Внешний вид лесных культур на горевших участках: А – гарь, сосна (ГС); Б – гарь (а) и пожарище (б), лиственница (ГЛ и ПЛ); С – пожарище, вяз (ПВ). Республика Хакасия, 2017–2018 гг.

Fig. 1. External appearance of forest cultures in burnt areas: А – burnt pine (BP); (ГС); Б – burnt (a) and fire-affected (b) larch (BL and FL (ГЛ, ПЛ)); С – fire-affected elm (FE (ПВ)). Republic of Khakassia, 2017–2018

Спустя 3 года после пожара с 2018 по 2023 гг. исследовали состояние микробных сообществ почв в прикорневой зоне этих насаждений. Согласно терминологии Н.П. Курбатского [1972] были выбраны и охарактеризованы участки в зависимости от степени повреждения огнем – Гари (полностью сгоревшие, Г) и Пожарища (поврежденные огнем, но продолжающие вегетировать, П). С учетом вышеприведенных особенностей исследуемых участков для удобства обозначений использовали следующие аббревиатуры: ГЛ – гарь, лиственница; ГС – гарь, сосна; КГС – контроль, гарь, сосна; ПЛ – пожарище, лиственница; ПВ – пожарище, вяз; КЛВ – контроль для лиственницы и вязов. Образцы целинной почвы (старая залежь), граничащей с этими посадками и менее всего затронутой пожаром, были взяты в качестве относительного контроля: КЛВ – для участков лиственницы и вязов, КС – для участков сосны.

В лесостепной зоне Красноярского края в сосняке разнотравно-зеленомошном Погорельского бора в 2020 г. были заложены пробные площади на технологических участках после несплошных рубок (в 2017 г.) (Пасека, Волок), а также в нетронутом рубкой сосняке (Фон). В мае 2022 г. на исследуемых участках прошел сильный низовой пожар, разной интенсивности, вследствие чего выгорел весь напочвенный покров и стволы деревьев обгорели на высоту до 1,5–2 м (рис. 2). Однако древостой не погиб и в течение 3 лет продолжал вегетировать.

Образцы почвы со всех исследованных участков для микробиологических и биохимических анализов отбирали в начале, середине и конце вегетационного периода с глубины 5–10 см с 2018 по 2023 гг. в посадках лесных культур, и с 2020 по 2024 гг. – в сосняке Погорельского бора. При отборе образцов измеряли температуру почвы портативным термометром Hanna Checktemp1. В лабораторных условиях с помощью портативного потенциометра Аквилон-410 (Россия) измеряли pH (H_2O) (в соотношении почва : дистиллированная вода 1 : 10) и влажность почвы (по ГОСТ 28268-89).

В почвенных образцах определяли общую численность микроорганизмов (ОЧМ), соотношение долей эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭТГМ), содержание микробной биомассы ($C_{\text{мик}}=MB$), интенсивность базального дыхания (БД) и удельного дыхания (qCO_2) микробной биомассы, а также ферментативную активность (ФА) и таксономический состав доминантных популяций бактерий и грибов.



Рис. 2. Внешний вид экспериментальных участков Фон, Волок, Пасека: сверху – после пожара в мае 2022 г., внизу – в июне 2024 г. в сосняке Погорельского бора. Красноярский край

Fig. 2. External appearance of the experimental plots Background, Trail, Strip: top – after the fire in May 2022, bottom – in June 2024 in the pine forest of Pogorelsky pine forest. Krasnoyarsk region

Общую численность культивируемых микроорганизмов и соотношение долей эколого-трофических групп изучали чашечным методом Коха: на мясо-пептонном и сусло агарях (МПА и СА) учитывали гидролитиков, на крахмало-аммиачном агаре – копитрофов, олиготрофов – на почвенном агаре (ПА) [Методы..., 1991; Практикум..., 2005].

Таксономическую принадлежность бактерий и грибов, выросших на питательных средах, проводили по культуральным и морфологическим характеристикам [Методы..., 1991; Gregersen, 1978; Barnet, Hunter, 1999; Watanabe, 2002] с помощью микроскопа Olympus BX43 (Япония).

Ферментативную активность почв определяли методами Галстяна и Щербаковой [Хазиев, 2005]. С помощью фотоэлектроколориметра КФК-3-01 определяли активность ферментов: инвертазы, уреазы, фосфатазы – с предварительным компостированием от 1 до 24 ч при температуре 30–38 °С; активность пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО) – с предварительным компостированием в течение 30 мин в термостате при температуре 30 °С. Активность инвертазы выражали в мг глюкозы/г почвы, уреазы – в мг N–NH₄/г почвы, фосфатазы – в мг P₂O₅/г почвы, пероксидазы и полифенолоксидазы – мг 1,4-бензохинона/г почвы. По соотноше-

нию ПФО/ПО рассчитывали коэффициент гумификации (K_g), позволяющий судить об интенсивности процесса минерализации гумуса.

Дыхательную (респирометрическую) активность микроорганизмов определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) с использованием газового хроматографа Agilent 6890 N Network GC (США). СИД почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после добавления в почву глюкозо-минеральной смеси [Методы..., 1991]. Во флаконы (250 мл) помещали 2 г почвы (60% полной влагоемкости) и добавляли 0,1 мл глюкозо-минеральной смеси, затем герметично закрывали пробками (фиксируют время) и инкубировали 3 ч при 25°C. После инкубации пробу воздуха из флакона (2 мл) отбирали шприцем и вводили в газовый хроматограф. Базальное (фоновое) дыхание (БД) измеряли по скорости выделения CO_2 почвой за 24 ч инкубации при 25°C, вместо внесения раствора глюкозо-минеральной смеси вносили 0,1 мл воды. Скорость СИД и БД выражали в $\text{мкг С-CO}_2/(\text{г почвы ч})$ [Anderson, Domsch, 1978]. Микробную биомассу ($\text{МБ} = \text{С}_{\text{мик}}$) почвенного образца определяли согласно [Sparling, 1995], путем пересчета скорости СИД по формуле:

$$\text{С}_{\text{мик}} = \text{МБ} (\text{мкг С/г}) = 50,4 \text{ СИД} (\text{мкг С-CO}_2/(\text{г ч})). \quad (1)$$

Микробный метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$) рассчитывали как отношение БД к МБ ($\text{БД/МБ} = q\text{CO}_2 \text{ мкг С-CO}_2/\text{мг С ч}$) [Ананьева, 2003; Anderson, Domsch, 1990].

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Excel 2003, 2013. Для подтверждения различий между микробиологическими параметрами исследуемых почв использовали метод главных компонент, при обработке полученных данных – программы Statistica 12, Past 3.0.

Результаты исследований и обсуждение. В посадках лесных культур в Ширинской степи почвенные микробиомы восстанавливаются с разной интенсивностью в зависимости от степени прогорания почвы, количества обгоревших растительных остатков и вида древостоя. Максимальные значения общей численности микроорганизмов отмечены в 2021 и 2023 гг. на участке ГС (19,44 и 20,72 млн КОЕ /г почвы соответственно). Минимальные значения общей численности микроорганизмов приходятся на 2022 г. на всех участках (в среднем 7,5 млн КОЕ / г почвы) (рис. 3). Следует отметить, что данный год характеризовался наименьшими значениями температуры и содержания влаги в почве [Сенашова и др., 2024]. В течение всего периода исследования на участках преобладал олиготрофно-копиотрофный комплекс микроорганизмов, доля олиготрофов в разные годы варьировала от 50 до 60–70%, копиотрофов – от 20 до 29%. Все эколого-трофические микробные группы активно участвовали в разложении полусгоревших растительных остатков.

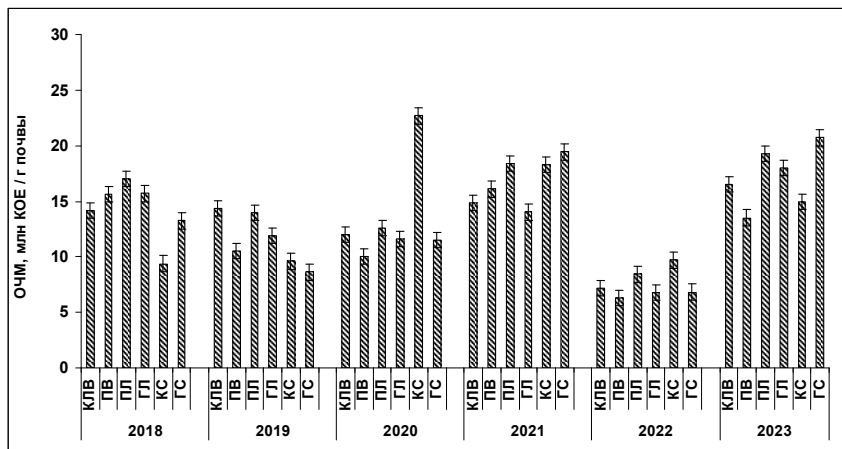


Рис. 3. Динамика общей численности микроорганизмов (ОЧМ) после пожара 2015 г. на участках лесных культур Гари и Пожарища в Ширинской степи, Республика Хакасия (2018–2023 гг.) (n=3); КЛВ – контроль для лиственницы и вязов; ПВ – пожарище, вяз; ПЛ – пожарище, лиственница; ГЛ – гарь, лиственница; ГС – гарь, сосна; КГС – контроль, гарь, сосна

Fig. 3. Dynamics of the total number of microorganisms (TNM) after the 2015 fire in the forest plantations of the burnt-out areas and fire-affected plots in the Shirinskaya Steppe (2018–2023), Republic of Khakassia (n=3); CLE (КЛВ) – control for fire-affected plots with larch and elm; FE (ПВ) – fire-affected elm; FL (ПЛ) – fire-affected larch; BL (ГЛ) – burnt larch; BP (ГС) – burnt pine; CBP (КГС) – control for the burnt pine

Ферментативная активность почвы в гарях и пожарищах увеличивалась в течение периода вегетации, что может отражать как сезонные климатические изменения, так и повышение интенсивности почвенных биологических процессов, связанных с восстановлением лесорастительной способности горевшей почвы.

Содержание микробной биомассы спустя 3 года после пожара (2018 г.) снизилось от первоначальных значений в среднем в 6–15 раз в зависимости от участка [Сенашова и др., 2024], поскольку к этому времени произошло частичное срабатывание углей почвенной микробиотой и растениями. Кроме того, содержание МБ и интенсивность БД на протяжении всего периода исследований, по мере минерализации продуктов пиролиза, менялись в зависимости, как правило, от влажности почвы ($r = 0,5–0,7$ (МБ) и $r = 0,5$ (БД)), pH ($r = 0,78–0,86$ (МБ)) и вида древостоя. В 2018 г. на поверхности почвы участ-

ков оставалось еще достаточно много неразложившихся обгорелых растительных остатков, что отражалось на содержании микробной биомассы и интенсивности микробного дыхания. В засушливом 2022 г. отмечали самые низкие значения почвенной влажности, а содержание МБ снизилось (в среднем 240 мкг С/г почвы) по сравнению с таковым в 2021 и 2023 гг. Наибольшие значения микробной биомассы в послепожарный период исследований отмечали в 2020 и 2023 гг. (в среднем 840 и 862 мкг С/г почвы) (рис. 4).

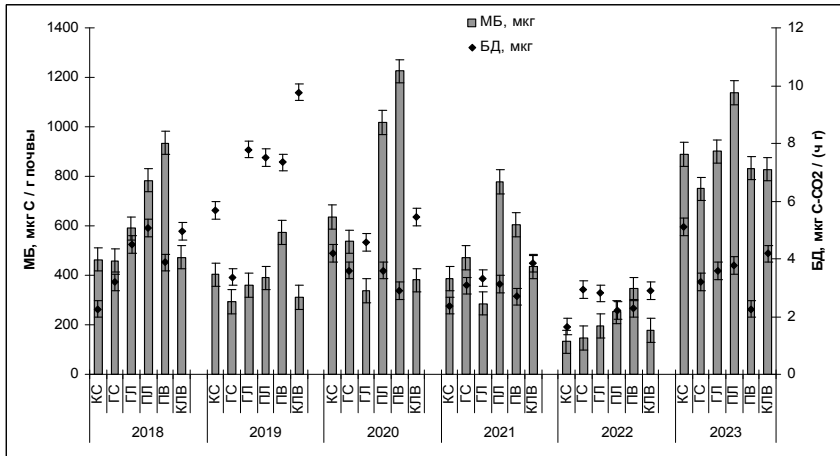


Рис. 4. Содержание микробной биомассы (МБ) и интенсивность базального дыхания (БД) после пожара на участках лесных культур Гари и Пожарища в Ширинской степи, Республика Хакасия (2018–2023 гг.) (n=3): КС – контроль, гарь, сосна; ГС – гарь, сосна; ГЛ – гарь, лиственница; ПЛ – пожарище, лиственница; ПВ – пожарище, вяз; КЛВ – контроль для лиственницы и вяза

Fig. 4. The content of microbial biomass (MB) and the intensity of basal respiration (BR) after a fire in the forest plantations of burnt-out areas and fire-affected sites in the Shirinskaya steppe, Republic of Khakassia (2018–2023) (n=3): CBP (KC) – control for the burnt pine; BP (GC) – burnt pine; BL (GL) – burnt larch; FL (PL) – fire-affected larch; FE (PB) – fire-affected elm; CLE (CLB) – control for fire-affected plots with larch and elm

Микробное дыхание (БД) и удельное дыхание микробной биомассы ($q\text{CO}_2$) изменялось в зависимости от сезона и давности пожара. В разные годы значения $q\text{CO}_2$ варьировали в широких пределах (7–18 $\text{C-CO}_2/\text{C (г ч)}$), а в 2023 г. отмечали наименьшие их значения (3–5 $\text{мкг C-CO}_2/\text{C (г ч)}$). Судя по резким колебаниям микробного метаболического коэффи-

циента из сезона в сезон, микробные сообщества еще не восстановились до своей эколого-физиологической нормы. Однако можно сказать, что к 2023 г. в функционировании почвенных микробных сообществ под лесными насаждениями наметилась тенденция к восстановлению.

Состояние почвенных микробоценозов под лесными культурами в первые годы после пожара (2015–2017 гг.) было описано нами ранее [Гродницкая и др. 2022; Сенашова и др., 2024]. В период с 2018 по 2023 гг. в структуре микробных сообществ произошли значительные изменения. Так, в бактериобиоме почвы обнаружено значительное количество споровых бактерий, представленных родами *Bacillus* Cohn. (*Bacillus mesentericus* Trevisan, *B. mycoides* Flugge, *B. subtilis* Ehrenberg Cohn.) и *Streptomyces* Waksman and Henrici. По данным В.А. Сенашовой с соавторами [2024], в первый год после пожара (2015 г.) было отмечено безусловное доминирование представителей порядка Actinomycetales под лесными культурами на протяжении всех месяцев вегетации, что подтверждается работами других исследователей [Гладков и др., 2020; Abbasian et al., 2015; Song et al., 2018]. Доля актиномицетов в 2015 г. доходила до 84% от общей микробной численности. Их преобладание в почве исследуемых участков (кроме КЛВ) отмечено также в 2017–2018 гг. (до 36–48%), к 2023 г. их количество снизилось до 21–37%. Доля других споровых бактерий к 2023 г. увеличилась в 4–12 раз по сравнению с 2015 г. Среди неспоровых бактерий доминировали представители родов *Pseudomonas* Migula, *Serratia* Bizio и *Micrococcus* Cohn. Самой малочисленной группой микроорганизмов были грибы, которые составляли 0,5–15,7% от общего числа выделенных микроорганизмов, они встречались преимущественно в гифальной форме. Видовое разнообразие грибов в почве участков гарей и пожарищ было относительно невелико, только на восьмой год после пожара (2023 г.) оно несколько увеличилось. При этом в почве контрольных участков (КЛВ и КС) отмечали меньшее их разнообразие, чем в почве под древесными насаждениями. На всех участках доминировали зигомицеты, среди них представители родов *Mortierella* Coem и *Mucor* Fresen. В значительном количестве встречались грибы родов *Penicillium* Link (до 20–25%) и *Trichoderma* Pers. (до 18%). В минорный компонент входили гифомицеты родов *Alternaria* sp., *Paecilomyces* sp., *Hyalodendron* sp. и *Verticillium* sp. Отмечено, что к 2023 г. доли доминантных представителей грибов увеличились по сравнению с 2018 г.: *Penicillium* sp. – в 1,62, *Mortierella* sp. – в 1,47, *Oidiodendron* sp. – в 1,12, *Cladosporium* sp. –

в 4,07 раза, в то время как популяция грибов рода *Trichoderma* уменьшилась в 1,83 раза. Ранее нами и другими авторами сообщалось, что вышеперечисленные грибы, а также актиномицеты являются активными деструкторами пирогенных растительных остатков и отмирающего травяного покрова [Гродницкая и др., 2023; Petrovič et al., 1993; Chigineva et al., 2011, Ghani et al., 2015].

В сосняке Погорельского бора в течение пяти лет (2020–2024 гг.) исследовали микробные сообщества на участках Фон, Волок, Пасека до и после пожара, который произошел в мае 2022 г. До пожара в 2020 г. (начальная точка, НТ) общая численность микроорганизмов (ОЧМ) на всех участках была практически одинаковой (3,2–3,4 млн КОЕ / г почвы). Основными деструкторами органического вещества в почве были неспоровые бактерии, доля которых достигала 56–61%, меньше наблюдалось актиномицетов и других споровых бактерий – 30–40%, а также грибов – от 10 до 13% в зависимости от участка. Во время пожара 2022 г. на участках Волок и Пасека сгорела вся подстилка и верхний слой почвы. Участок Фон пострадал меньше всего. Поскольку пожар прошел неравномерно (с разной интенсивностью), то на поверхности почвы участков осталось различное количество несгоревших растительных остатков, золы и угля. Через неделю после пожара наблюдали всплеск численности микроорганизмов-карботрофов за счет увеличения неспоровых бактерий, в среднем численность микроорганизмов увеличилась в 2,5 раза по сравнению с допожарными годами (2020–2021 гг.), чего нельзя сказать о содержании микробной биомассы. Так, на участке Фон значения МБ увеличились в 2 раза, а на Волоке – снизились от начальных (НТ) в 4,4 раза, в то время как значения БД и $q\text{CO}_2$ увеличились в 4,4 раза, поскольку этот участок прогорел больше других, и на нем была только зола (рис. 5). Также увеличилась активность уреазы (в 1,7–1,9 раза) и инвертазы (1,5–1,8 раза), в то время как оксидоредуктазная активность была снижена (в 1,2 раза). В то же время на всех участках увеличилась доля карботрофных грибов родов *Trichoderma*, *Mortierella*, *Penicillium*, бактерий *Serratia plymuthica* и *Bacillus mycoides*, способных утилизировать пирогенный углерод и продукты пиролиза. Однако с середины и до конца вегетационного периода 2022 г. значения ОЧМ в среднем снизились от майских в 1,8 раза, а МБ – в 2 раза. Кроме того, отмечали снижение инвертазной активности (в 2–3 раза) и видового разнообразия микроорганизмов-карботрофов, особенно грибов, что указывало на постпирогенную депрессию почвенного микробиоценоза.

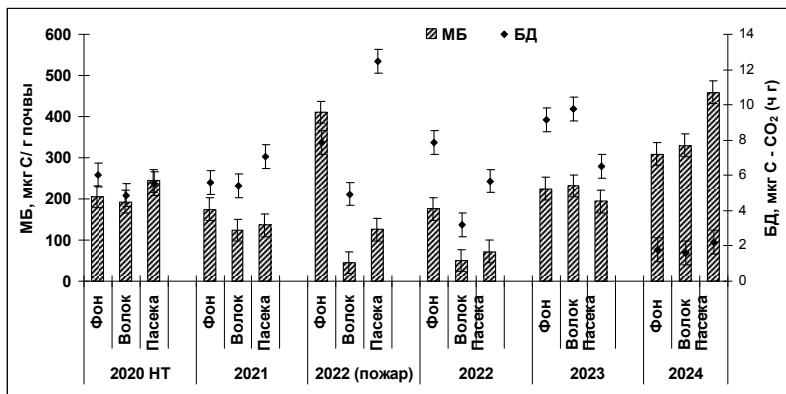


Рис. 5. Содержание микробной биомассы (МБ) и интенсивность базального дыхания (БД) до и после пожара на участках Фон, Волок и Пасека в сосняке Погорельского бора, Красноярский край (2020–2023 гг.) (n=3)

Fig. 5. The content of microbial biomass (MB) and the intensity of basal respiration (BR) before and after the fire in the exsperimental plots Background (Фон), Trail (Волок) and Strip (Пасека) in the Pogorelsky pine forest, Krasnoyarsk region (2020–2023) (n=3)

К концу 2023 г. состояние микробоценозов на участках начало постепенно меняться, т.к. продукты пирогазения были частично утилизированы, что привело к перегруппировке микроорганизмов за счет снижения численности карботрофов. Если в 2022 г. безусловно доминировали неспоровые бактерии, то к 2023 г. численность их снизилась в 10 раз, существенно прибавилось споровых форм, в т.ч. актиномицетов. В 2024 г. общая численность микроорганизмов приблизилась к допожарным значениям (2020 г) и составила 3,04–4,69 млн КОЕ / г почвы, а содержание МБ увеличилось в 1,7 раза (рис. 5). При этом значения микробного дыхания (БД) в среднем по участкам снизились в 3 раза по сравнению с 2020 г. и в 4,5 раза по сравнению с 2022 г. Значения микробного метаболического коэффициента оставались довольно высокими на протяжении всего периода исследований, особенно после пожара в 2022 г. (в среднем 76,82 мкгС-СО₂/ мг С ч), однако к концу сезона 2024 г. они снизились в 10 раз, оставаясь при этом достаточно высокими (6,4–9,1 мкгС-СО₂/мг С ч), что свидетельствует о нестабильности микробоценозов после стрессовых термических воздействий.

Пожар 2022 г. привел к увеличению доли микроорганизмов-олиготрофов с последующим ростом доли гидролитиков и копиотрофов в 2023 г., в 2024 г. доля гидролитиков стремится к значениям 2020 г. (НТ). В целом соотношение долей ЭТГМ колебалось в течение исследуемого периода и характеризовалось преобладанием олиготрофно-гидролитического микробного комплекса.

В освоении углей и несгоревших растительных остатков принимали активное участие микроорганизмы-карботрофы – неспоровые (р. *Serratia*) и споровые (р. *Bacillus*) бактерии, а также микромицеты родов *Trichoderma*, *Mortierella*, *Umbelopsis* Amos & H.L. Barnett. Изначально наибольшим видовым разнообразием почвенных грибов характеризовался вариант Фон, а наименьшим – Волок, при этом в первом случае преобладали микромицеты рода *Penicillium* (28% от общей численности грибов), а во втором – *Trichoderma* (75%). На участке Пасека также доминировали грибы *Trichoderma* sp. Пожар 2022 г. привел к некоторому повышению разнообразия грибов, в первую очередь, за счет зигомицетов. Например, доля представителей рода *Umbelopsis* на Пасеке составила 14,9%. В послепожарные годы среди зигомицетов преобладали грибы родов *Mortierella* sp., *Penicillium* sp. и *Trichoderma* sp., которые являются активными деструкторами горевших растительных остатков.

Статистический анализ методом главных компонент, показал наличие разницы между участками исследуемых почв и существенного влияния на них пирогенного фактора (рис. 6). На первую компоненту приходилось 98,6% общей дисперсии, на вторую – 0,3%. Первая компонента определялась в большей степени содержанием МБ и активностью уреазы, наибольший вклад во вторую компоненту вносили активность инвертазы и интенсивность qCO_2 . В плоскости двух первых компонент сформировались пять облаков. В плоскости первой компоненты располагались два облака, первое образовано ПЛ и ПВ (1), второе – КЛВ, ГЛ, ГС и КС (2), разница между вариантами почв этих облаков обусловлена в большей степени активностью уреазы и содержанием МБ. В плоскости второй компоненты располагались три облака: в первой четверти облако, образованное почвой участков сосняков Погорельского бора в год пожара (3), второе облако на пересечении осей образовано вариантами почвы после пожара (4), в третье облако вошли варианты почвы до пожара 2022 года (5). Разница между этими тремя облаками обусловлена различиями в активности инвертазы и интенсивностью удельного дыхания (qCO_2). Почва фонового участка в год пожара выбивалась из всех пяти облаков, что показано в тексте выше.

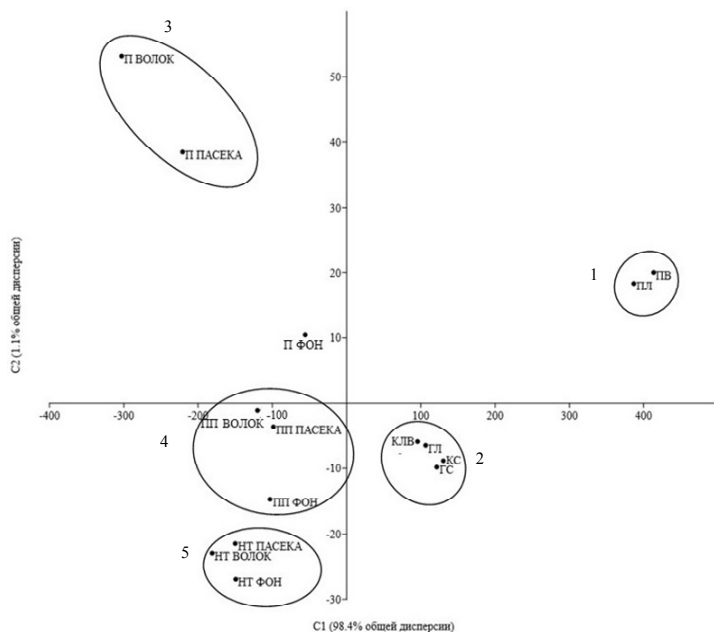


Рис. 6. Распределение параметров почвы исследуемых участков в плоскости двух главных компонент, полученных по основным химическим и микробиологическим характеристикам. Каждая точка характеризуется следующими почвенными параметрами: pH, влажность и температура почвы, МБ, БД, $q\text{CO}_2$, активность уреазы, протеазы, инвертазы, пероксидазы, полифенолоксидазы коэффициента гумификации (K_r)

Примечание: ПЛ – пожарище, лиственница; ПВ – пожарище, вяз; КЛВ – контроль для лиственницы и вяза; ГЛ – гарь, лиственница; КС – контроль для сосны; ГС – гарь, сосны; НТ ПАСЕКА – начальная точка Пасека (2020 г.); НТ ВОЛОК – начальная точка Волок (2020 г.); НТ ФОН – начальная точка Фон (2020 г.); П ПАСЕКА – пожар Пасека (2022 г.); П ВОЛОК – пожар Волок (2022 г.); П ФОН – пожар Фон (2022 г.); ПП ПАСЕКА – после пожара Пасека (2022–2024 гг.); ПП ВОЛОК – после пожара Волок (2022–2024 гг.); ПП ФОН – после пожара Фон (2022–2024 гг.)

Fig. 6. Distribution of the studied plots properties in the plane of two principal components. Each point is characterized by the following set of properties: pH; soil moisture and temperature; MB; BR; $q\text{CO}_2$; urease, protease, invertase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities; humification coefficient (K_h)

Note: FL (ПЛ) – fire-affected larch; FE (ПВ) – fire-affected elm; CLE (КЛВ) – control for fire-affected plots with larch and elm; BL (ГЛ) – burnt larch; CBP (КС) – control for the burnt pine; BP (ГС) – burnt pine; ST STRIP (НТ ПАСЕКА) – starting BACKGROUND (НТ ФОН) – starting point Background (2020); F STRIP (П ПАСЕКА) – Paseka fire-affected (2022); F TRAIL (П ВОЛОК) – Trail fire-affected (2022); F BACKGROUND (П ФОН) – BACKGROUND fire-affected (2022); AF STRIP (ПП ПАСЕКА) – after the fire Strip (2022–2024); AF TRAIL (ПП ВОЛОК) – after the fire Trail (2022–2024); AF BACKGROUND (ПП ФОН) – after the fire Background (2022–2024)

Заключение. Проведенная оценка восстановления почвенных микробиомов в двух различных фитоценозах (по составу лесных пород и типов почв) показала, что основными индикаторами, отражающими биологическое состояние этих почв, являлись микробная биомасса и ее удельное дыхание, а также ферментативная активность. Они вносят наибольший вклад при анализе всех параметров. Общим в исследуемых почвах было то, что численность микроорганизмов, содержание микробной биомассы и интенсивность дыхания изменялись в зависимости от влажности и температуры почвы, а также от давности пожара и качества древостоя. В сухостепной зоне Ширинского района на пожарищах лиственницы и вязов восстановление микробоценозов идет значительно быстрее, чем в гарях сосны и лиственницы, о чем свидетельствуют более высокие значения общей численности микроорганизмов, микробной биомассы и ферментативной активности почвы, которые приближаются к контрольным либо превышают их. В сосняке Погорельского бора наиболее активно идет восстановление микробных сообществ на участках Волок и Пасека, по сравнению с Фоном, который при пожаре пострадал меньше всего. Отмечено, что период восстановления микробиомов почв под посадками лесных культур и в сосняке еще не завершился, о чем свидетельствуют резкие ежегодные колебания значений микробиологических параметров почвы. Особенно наглядно это демонстрируют значения коэффициента удельного дыхания микробной биомассы (qCO_2), указывающие на нестабильное состояние микробных сообществ, которые еще не могут функционировать в режиме экологической нормы.

Отмечены различия в направленности минерализационных процессов в исследуемых почвах, которые заключались в динамике общей численности и в соотношении эколого-трофических групп микроорганизмов, доминантном составе бактерий и грибов – первичных и последующих деструкторов продуктов пирогенеза (уголь, зола, растительные остатки). Специфическими микробными индикаторами после пожара в почве Ширинской степи следует считать доминирование в микробоценозах популяций бактерий порядка Actinomycetales и грибов родов *Mortierella* и *Penicillium*, а в сосняке Погорельского бора – бактерий *Serratia plymuthica* и *Bacillus mycoides*, а также грибов родов *Trichoderma* и *Umbelopsis*.

Сведения о финансировании исследования. Работы выполнены в рамках базового проекта ФИЦ КНЦ РАН ИЛ СО РАН № FWES 2024-0029.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства согласно международным критериям ICMJE. И.Д. Гродницкая – научное руководство исследованием, разработка методологии исследования, подготовка тек-

ста и редактирование рукописи; В.А. Сенашова – отбор образцов и проведение исследований, курирование данных, работа с программным обеспечением, подготовка текста рукописи; О.Э. Пашкеева – проведение исследований, работа с программным обеспечением, анализ полученных данных; Г.И. Антонов – проведение исследований, анализ полученных данных, валидация данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Библиографический список

Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.

Антонов Г.И., Евграфова С.Ю., Иванов В.В. Биоиндикация лесорастительного состояния почв сосняков Красноярской лесостепи после несплошных рубок разной интенсивности // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. 2014. № 3. С. 18–28.

Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2014. 232 с.

Гладков Г.В., Чебыкина Е.Ю., Евдокимова Е.В., Иванова Е.А., Кимеклис А.К., Зверев А.О., Кичко А.А., Андронов Е.Е., Абакумов Е.В. Восстановление почвенного микробиома в различных почвенных горизонтах после верхового и низового лесных пожаров // Экологическая генетика. 2020. Т. 18, № 3. С. 343–356.

Гродницкая И.Д., Сенашова В.А., Антонов Г.И., Пашкеева О.Э. Микробиологическая индикация почв лесных посадок в Ширинской степи // Лесоведение. 2022. № 3. С. 270–284. DOI: 10.31857/S002411482203007X.

Гродницкая И.Д., Сенашова В.А., Антонов Г.И., Полякова Г.Г., Пашкеева О.Э., Пашенова Н.В. Биоиндикация состояния темно-серой почвы в сосняках Красноярской лесостепи при антропогенном воздействии // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1173–1189.

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии // Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1972. С. 171–231.

Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.

Масягина О.В., Токарева И.В., Прокушкин А.С. Моделирование термического воздействия пожаров на физико-химические свойства и микробную активность подстилки криогенных почв // Почвоведение, 2014. № 8. С. 971–981.

Практикум по микробиологии / под ред. А.И. Нетрусова М.: Academia, 2005. 603 с.

Сенашова В.А., Сорокина О.А., Антонов Г.И., Пашкеева О.Э., Гродницкая И.Д. Постпирогенное восстановление биологической активности почвы искусственных лесных насаждений в аридной зоне Ширинской степи Республики Хакасия // Почвоведение. 2024. № 11. С. 1569–1588.

Сорокин Н.Д. Микробиологическая диагностика лесорастительного состояния почв Средней Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 219 с.

Сорокин Н.Д., Сенашова В.А., Сорокина О.А. Биогенность почв как показатель устойчивости искусственных лесных насаждений в сухостепных условиях Хакасии // Известия РАН. Серия биологическая. 2017. № 3. С. 329–336. DOI: 10.7868/S0002332917030092.

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

Шапченко О.А., Краснощеков Ю.Н., Лоскутов С.Р. Использование методов термического анализа для оценки органического вещества почв, пройденных пожаром // Почвоведение. 2011. № 6. С. 738–747.

Abbasian F., Lockington R., Mallavarapu M., Naidu R.A. Comprehensive review of aliphatic hydrocarbon biodegradation by bacteria // Appl. Biochem. Biotechnol. 2015. Vol. 176. P. 670–699.

Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. Vol. 10. P. 314–322.

Anderson T.H., Domsch K.H. Application of ecophysiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories // Soil Biol. Biochem. 1990. Vol. 22. P. 251–255.

Barnet H.L., Hunter B.B. Illustrated Genera of Imperfect Fungi. Minnesota: American Phytopathological Society, 1999. 218 p.

Barreiro A., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2021. Vol. 22. Art. no. 100264. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100264.

Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia. 2005. Vol. 143. P. 1–10. DOI: 10.1007/s00442-004-188-8.

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 488. Art. no. 118989. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118989.

Chigineva N.I., Aleksandrova A.V., Marhan S., Kandeler E., Tiunov A.V. The importance of mycelial connection at the soil–litter interface for nutrient translocation, enzyme activity and litter decomposition // Applied Soil Ecology. 2011. Vol. 51. P. 35–41.

Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutuyavin I.N., Startsev V.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia // Catena 2022. Vol. 117. Art. no. 106449. DOI: 10.1016/j.catena.2022.

Dyrness C.T., Van Cleve K., Levison J.D. The effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska // Can. J. For. Res. 1989. Vol. 19. P. 1389–1396.

Fernandez I., Cabaneiro A., Carballas T. Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating // Soil Biol. Biochem. 1997. Vol. 29, № 1. P. 1–11.

Fritze H., Smolander A., Levula T., Kitunen V., Malkonen E. Wood ash and fire treatments in a Scots pine forest stand: effects on organic layer, microbial biomass, and microbial activity // *Biol. Fertil. Soils*. 1994. Vol. 17. P. 57–63.

Ghani M.J., Rajoka M.I., Kalsoon Akhtar. Investigations in fungal solubilization of coal: mechanisms and significance // *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2015. Vol. 20. P. 634–642. DOI: 10.1007/s12257-015-0162-5.

Gregersen T. Rapid method for distinction of gram-negative from gram-positive bacteria // *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1978. Vol. 5. P. 123–127.

Huffman E.L., McDonald L.H., Stednick J.D. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine Colorado Front Range // *Hydrol. Process*. 2001. № 15. P. 2877–2892.

Khaziev F.H. *Methods of soil enzymology*. Moscow: Nauka, 2005. 252 p. (In Russ.)

Mataix-Solera J., Guerrero C., García-Orenes F., Bárcenas G.M., Torres M.P. Forest fire effects on soil microbiology // *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Enfield, 2009. P. 133–175.

Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Efolliott P.F. Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis // *For. Ecol. Manage.* 1999. Vol. 122. P. 51–71.

Petrovič M., Briški F., Kaštelan-Macan M. Biosorption and biodegradation of humic substances by *Trichoderma viride* // *Food Technol. Biotech.* 1993. Vol. 31. P. 145–149.

Pietikainen J., Huikka R., Fritze H. Does short-term heating of forest humus change its properties as a substrate for microbes? // *Soil Biol. Biochem.* 2000. Vol. 32. P. 277–288.

Pérez-Valera E., Goberna M., Verdú M. Fire modulates ecosystem functioning through the phylogenetic structure of soil bacterial communities // *Soil Biol. Biochem.* 2019. Vol. 129. P. 80–89. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.11.007.

Song M., Peng W.X., Zeng F.P., Du H., Peng Q., Xu Q.G., Chen L., Zhang F. Spatial patterns and drivers of microbial taxa in a karst broadleaf forest // *Front Microbiol.* 2018. Vol. 9. Art. no. 1691. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01691.

Sparling G.T. The substrate-induced respiration method // *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. L., 1995. P. 397–404.

Watanabe T. *Pictorial atlas of soil and seed fungi: morphologies of cultured fungi and key to species*. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2002. 506 p.

References

Abbasian F., Lockington R., Mallavarapu M., Naidu R.A. Comprehensive review of aliphatic hydrocarbon biodegradation by bacteria. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2015, vol. 176, pp. 670–699.

Ananyeva N.D. *Microbiological aspects of self-purification and soil stability*. Moscow: Nauka, 2003. 222 p. (In Russ.)

Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1978, vol. 10, pp. 314–322.

Anderson T.H., Domsch K.H. Application of ecophysiological quotients ($q\text{CO}_2$ and $q\text{D}$) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.*, 1990, vol. 22, pp. 251–255.

Antonov G.I., Evgrafova S.Yu., Ivanov V.V. Bioindication of forest vegetation condition of soils of pine forests of Krasnoyarsk forest-steppe after non-clear cuttings of different intensity. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2014, no. 3, pp. 18–28. (In Russ.)

Barnet H.L., Hunter B.B. Illustrated Genera of Imperfect Fungi. Minnesota: American Phytopathological Society, 1999. 218 p.

Barreiro A., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, vol. 22, art. no. 100264. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100264.

Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 2005, vol. 143, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s00442-004-188-8.

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 488, art. no. 118989. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118989.

Chigineva N.I., Aleksandrova A.V., Marhan S., Kandeler E., Tiunov A.V. The importance of mycelial connection at the soil–litter interface for nutrient translocation, enzyme activity and litter decomposition. *Applied Soil Ecology*, 2011, vol. 51, pp. 35–41.

Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (In Russ.)

Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutyavin I.N., Startsev V.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia. *Catena*, 2022, vol. 117, art. no. 106449. DOI: 10.1016/j.catena.2022.

Dyrness C.T., Van Cleve K., Levison J.D. The effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 1989, vol. 19, pp. 1389–1396.

Fernandez I., Cabaneiro A., Carballas T. Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, vol. 29, no. 1, pp. 1–11.

Fritze H., Smolander A., Levula T., Kitunen V., Malkonen E. Wood ash and fire treatments in a Scots pine forest stand: effects on organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, vol. 17, pp. 57–63.

Ghani M.J., Rajoka M.I., Kalsoon Akhtar. Investigations in fungal solubilization of coal: mechanisms and significance. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2015, vol. 20, pp. 634–642. DOI: 10.1007/s12257-015-0162-5.

Gladkov G.V., Chebykina E.Y., Evdokimova E.V., Ivanova E.A., Kimeklis A.K., Zverev A.O., Kichko A.A., Andronov E.E., Abakumov E.V. Restoration of soil microbiome in various soil horizons after crown and surface wildfires. *Ecological genetics*, 2020, vol. 18, iss. 3, pp. 343–356. DOI: 10.17816/ecogen17641. (In Russ.)

Gregersen T. Rapid method for distinction of gram-negative from gram-positive bacteria. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1978, vol. 5, pp. 123–127.

Grodnitskaya I.D., Senashova V.A., Antonov G.I., Pashkeeva O.E. Microbiological Indication of Soils in Forest Plantations of the Shirinskaya Steppe. *Lesovedenie*, 2022, no. 3, pp. 270–284. DOI: 10.31857/S002411482203007X. (In Russ.)

Grodnitskaya I.D., Senashova V.A., Antonov G.I., Polyakova G.G., Pashkeeva O.E., Pashenova N.V. Bioindication of the Status of Dark Gray Soil in Pine Forests of Krasnoyarsk Forest-Steppe under Anthropogenic Impact. *Pochvovedenie*, 2023, no. 9, pp. 1173–1189. (In Russ.)

Huffman E.L., McDonald L.H., Stednick J.D. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine Colorado Front Range. *Hydrol. Process.*, 2001, no. 15, pp. 2877–2892.

The impact of fires on the components of the ecosystem of middle taiga pine forests of Siberia. Novosibirsk: Science. Siberian Branch, 2014. 232 p. (In Russ.)

Kurbatsky N.P. Terminology of forest pyrology. *Issues of forest pyrology*. Krasnoyarsk, 1972, pp. 171–231. (In Russ.)

Masyagina O.V., Tokareva I.V., Prokushkin A.S. Modeling of the Thermal Influence of Fires on the Physicochemical Properties and Microbial Activity of Litter in Cryogenic Soils. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 8, pp. 809–818. (In Russ.)

Mataix-Solera J., Guerrero C., García-Orenes F., Bárcenas G.M., Torres M.P. Forest fire effects on soil microbiology. *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Enfield, 2009, pp. 133–175.

Methods of soil microbiology and biochemistry / ed. by D.G. Zvyagintsev. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1991. 303 p. (In Russ.)

Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Efolliott P.F. Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis. *For. Ecol. Manage.*, 1999, vol. 122, pp. 51–71.

Pérez-Valera E., Goberna M., Verdú M. Fire modulates ecosystem functioning through the phylogenetic structure of soil bacterial communities. *Soil Biol. Biochem.*, 2019, vol. 129, pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.11.007.

Petrovič M., Briški F., Kaštelan-Macan M. Biosorption and biodegradation of humic substances by *Trichoderma viride*. *Food. Technol. Biotech.*, 1993, vol. 31, pp. 145–149.

Pietikainen J., Hiukka R., Fritze H. Does short-term heating of forest humus change its properties as a substrate for microbes? *Soil Biol. Biochem.*, 2000, vol. 32, pp. 277–288.

Practical training in microbiology / ed. by A.I. Netrusov. Moscow: Academia, 2005. 603 p. (In Russ.)

Senashova V.A., Sorokina O.A., Antonov G.I., Pashkeeva O.E., Grodnitskaya I.D. Post-Pyrogenic Restoration of the Biological Activity of Soils of Artificial Forest Plantations in the Arid Zone of the Shirinskaya Steppe in the Republic of Khakassia. *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 11, pp. 1889–1905. DOI: 10.1134/S1064229324602075.

Shapchenkova O.A., Krasnoshchekov Y.N., Loskutov S.R. Application of the method of thermal analysis for the assessment of organic matter in postpyrogenic soils. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 6, pp. 677–685. (In Russ.)

Song M., Peng W.X., Zeng F.P., Du H., Peng Q., Xu Q.G., Chen L., Zhang F. Song M., Peng W.X./, Zeng F.P. et al. Spatial patterns and drivers of microbial taxa in a karst broadleaf forest. *Front Microbiol.*, 2018, vol. 9, art. no. 1691. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01691.

Sorokin N.D. Microbiological diagnostics of forest vegetation condition of soils of Central Siberia. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 219 p. (In Russ.)

Sorokin N.D., Senashova V.A., Sorokina O.A. Soil biogenecity as an indicator of sustainability of artificial forest plantations under dry-steppe conditions in Khakassia. *Biology Bulletin*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 337–343. DOI: 10.7868/S0002332917030092.

Sparling G.T. The substrate-induced respiration method. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. London: Acad. Press, 1995. P. 397–404.

Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi: morphologies of cultured fungi and key to species. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2002. 506 p.

Материал поступил в редакцию 18.02.2025

Гродницкая И.Д., Сенашова В.А., Пашкеева О.Э., Антонов Г.И. Особенности восстановления микробиомов почв лесных фитоценозов после пожаров в степной и лесостепной зонах Средней Сибири // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 254. С. 380–402. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.254.380-402

Проведены исследования в нарушенных пожаром лесных фитоценозах степной зоны Ширинского района (Республика Хакасия) и лесостепной зоны Погорельского бора (Красноярский край). С помощью микробиологических индикаторов (количественный и качественный состав микроорганизмов, содержание микробной биомассы, микробное дыхание, ферментативная активность) оценивали скорость восстановления биологической активности почв в искусственных посадках лесных культур сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, вяза приземистого и в сосняке естественного происхождения. После пожаров биологическая активность исследуемых почв быстрее восстанавливается на пожарищах (не до конца сгоревший древостой), чем на гарях (полностью

сгоревший древостой) из-за большого количества пирогенного углерода (Сруг), продуктов пиролиза/пирогенеза и значительного прогорания почвенного покрова. Для разных типов исследуемых почв (агроземы и темно-серая) адекватную оценку их состояния дают универсальные индикаторы: общая численность микроорганизмов, микробная биомасса, удельное дыхание микробной биомассы, ферментативная активность – которые отражают биологическую активность почв и указывают на направленность восстановительных процессов. В агроземах под посадками лесных культур Ширинской степи специфическими индикаторами были доминантные бактерии порядка Actinomycetales и грибы родов *Mortierella* Coem и *Penicillium* Link. В темно-серой почве соснового леса Погорельского бора после пожара доминировали неспоровые бактерии (*Serratia plymuthica*), содоминантами были споровые бациллы (*Bacillus mycoides*), а также грибы родов *Trichoderma* Pers. и *Umbelopsis* Amos & H.L. Barnett.

Ключевые слова: лесные насаждения, сосновый лес, структура микробных сообществ, оценка почв после пожаров, микробиологические индикаторы, биологическая активность почв.

Grodnitskaya I.D., Senashova V.A., Pashkeeva O.E., Antonov G.I. Features of soil microbiomes restoration of forest phytocenoses after fires in the steppe and forest-steppe zones of Central Siberia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 254, pp. 380–402 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.254.380-402

Studies were conducted in forest phytocenoses of the steppe zone of the Shirinsky district (Khakassia Republic) and the forest-steppe zone of the Pogorelsky pine forest (Krasnoyarsk region) damaged by fire. Using microbiological indicators (quantitative and qualitative composition of microorganisms, microbial biomass content, microbial respiration, enzymatic activity), the rate of restoration of biological activity of soils in artificial plantings of forest plantations of Scots pine, Siberian larch, Siberian elm and in a pine forest of a natural forest was assessed. It was found that after fires, the biological activity of the studied soils is restored faster in postfire sites (not completely burnt tree stand) than in burnt areas (completely burnt tree stand) due to the large amount of pyrogenic carbon (С_{pyr}) and pyrolysis/pyrogenesis products and significant combustion of the soil cover. It is noted that for different types of the studied soils (agrozeams and dark gray), an adequate assessment of their condition is provided by universal indicators (total number of microorganisms, content and specific respiration of microbial biomass, enzymatic activity), which reflect the biological activity of soils and indicate the direction of restoration processes. In agrozeams under forest plantations of the Shirinskaya steppe, specific indicators were dominant bacteria of the order Actinomycetales and fungi of the genera *Mortierella* Coem and *Penicillium* Link. In the dark gray soil of the pine forest of the Pogorelsky pine forest after the fire, non-spore bacteria (*Serratia plymuthica*)

dominated, spore bacilli (*Bacillus mycoides*) were sodominants, as well as fungi of the genera *Trichoderma* Pers. and *Umbelopsis* Amos & H.L. Barnett.

Key words: forest plantations, pine forest, structure of microbial communities, assessment of soils after fires, microbiological indicators, biological activity of soils.

ГРОДНИЦКАЯ Ирина Дмитриевна – заведующий лабораторией микробиологии и экологической биотехнологии Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, доктор биологических наук. SPIN-код: 3591-5881. Author ID: 93922. ORCID: 0000-0002-2689-3711. Scopus AuthorID: 8044237000. WoS ResearcherID: K-1631-2018.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: igrod@ksc.krasn.ru

GRODNITSKAYA Irina D. – DSc (Biological), Head of the Laboratory of microbiology and ecological biotechnology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. SPIN-code: 3591-5881. Author ID: 93922. ORCID: 0000-0002-2689-3711. Scopus AuthorID: 8044237000. WoS ResearcherID: K-1631-2018.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: igrod@ksc.krasn.ru

СЕНАШОВА Вера Александровна – старший научный сотрудник лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 4432-7425. Author ID: 610621. ORCID: 0000-0002-7083-6757. Scopus AuthorID: 57039097200. WoS ResearcherID: KAM-7287-2024.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: vera0612@mail.ru

SENASHOVA Vera A. – PhD (Biological), Senior Researcher, Laboratory of microbiology and ecological biotechnology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. SPIN-code: 4432-7425. Author ID: 610621. ORCID: 0000-0002-7083-6757. Scopus AuthorID: 57039097200. WoS ResearcherID: KAM-7287-2024.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: vera0612@mail.ru

ПАШКЕЕВА Оксана Эриковна – старший научный сотрудник лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1718-5709. Author ID: 787998. ORCID: 0000-0002-1741-1055. Scopus AuthorID: 57200366395. WoS ResearcherID: ACW-3629-2022.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: koeandkoe@mail.ru

PASHKEEVA Oksana E. – PhD (Biological), Senior Researcher, Laboratory of microbiology and ecological biotechnology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. SPIN-code: 4432-7425. Author ID: 610621. ORCID: 0000-0002-7083-6757. Scopus AuthorID: 57039097200. WoS ResearcherID: ACW-3629-2022.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: koeandkoe@mail.ru

АНТОНОВ Георгий Иванович – старший научный сотрудник лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, кандидат биологических наук. SPIN-код: 6231-3432. AuthorID: 707286. ORCID: 0009-0001-6200-7190. Scopus AuthorID: 57200367419.

660036, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия. E-mail: egoan@yandex.ru

ANTONOV Georgy I. – PhD (Biological), Senior Researcher, Laboratory of microbiology and ecological biotechnology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. SPIN-code: 6231-3432. AuthorID: 707286. ORCID: 0009-0001-6200-7190. Scopus AuthorID: 57200367419.

660036. Akademgorodok 50/28. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: egoan@yandex.ru