

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 630.43+630.221+630*114.6 (571.51)

ВЛИЯНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ БИОУДОБРЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЫ И ПОДРОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОСЛЕ РУБОК И ПОЖАРА

Г. И. Антонов, В. А. Сенашова, Г. Г. Полякова, Н. В. Пашенова,
С. В. Жила, И. Д. Гродницкая

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: egoan@yandex.ru, vera0612@mail.ru, ggpolyakova@mail.ru, pasnat@ksc.krasn.ru,
getgain@mail.ru, igrod@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

Сохранение целостности лесов после рубок и пожаров предполагает разработку различных методов содействия естественному лесовосстановлению, к которым относится создание экологически чистых и безопасных биоудобрений на основе отходов лесопромышленного комплекса. Использование инновационного биоудобрения в Погорельском бору Красноярской лесостепи положительным образом повлияло на биопотенциал почвы и количество подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после выборочных рубок. В первые 2 года во всех опытных вариантах отмечено увеличение активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов почвы в 1.5–2 раза по сравнению с контролем. Сразу после внесения биоудобрения в почвенном микробном комплексе возросло количество целлюлозолитиков до 62 тыс. КОЕ/г почвы на участках Пасеки. К концу вегетационного периода как в первый, так и во второй год применения биоудобрения в опытном варианте Пасеки всходов сосны обыкновенной было зарегистрировано в 2–3 раза больше, чем в контрольном. Пожар в мае 2022 г. привел к увеличению общей численности микроорганизмов до 38 млн КОЕ/г почвы и повышению активности ряда гидролитических ферментов в течение вегетационного периода на опытных участках с применением биоудобрения. В конце вегетационного периода 2022 г. наблюдалось отсутствие отклика микроорганизмов на внесение биоудобрения, а в почвенном микробном комплексе преобладали актиномицеты. Также к сентябрю этого года снизились целлюлозоразлагающий потенциал, гумификация и активность гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов (более чем в 2 раза). Биоудобрение существенно стимулировало образование всходов и подроста сосны на послепожарных территориях технологических участков рубки (Пасеке и Волоке) в 2 раза.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., лесовозобновление, опилочно-почвенный субстрат, микопродукт, ферментативная активность, дереворазрушающие базидиомицеты.

DOI: 10.15372/SJFS20230402

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы переработки отходов лесного хозяйства и лесовосстановления после вырубок разного типа в Красноярском крае стоят довольно остро. В рамках государственной программы «Развитие лесного хозяйства» им уделяется осо-

бое внимание. Согласно Постановлению Правительства Красноярского края от 30.09.2013 № 513-п (2013), площади лесовосстановления путем проведения работ по созданию лесных культур сократились на 50 %, а путем проведения мер содействия естественному возобновлению леса – увеличились на 13 %. Смещение

в сторону естественного возобновления вызвано проведением рубок лесных насаждений на территориях с преобладающим типом лесов, для которых характерно естественное восстановление. В настоящее время сохранность лесных культур в целом по Красноярскому краю составляет 91.1 %, приживаемость культур в первый год учета – 87.3 %, в третий – 81.6 %, в пятый – 78.6 %. При этом площадь списания за последние 5 лет увеличилась в 2 раза (с 0.7 тыс. до 1.4 тыс. га). Основная причина списания лесных культур – лесные пожары (более 37.7 %).

В течение нескольких лет сотрудниками лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) ведутся работы по созданию эффективных биоудобрений на основе отходов лесопромышленного комплекса, поддержанию плодородия истощенных почв лесных питомников, повышению иммунитета хвойных пород (Полякова, 2012; Антонов и др., 2019). Показано, что внесение биоудобрений в почву питомника под саженцы хвойных увеличило скорость их роста и развития, а также поддерживало биогенность почвы на протяжении 3–4 лет. В настоящее время проводятся исследования возможности использования биоудобрений на основе опилочно-почвенных субстратов с микопродуктом и мочевиной ($\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$) – ОПСМ+М, для стимуляции естественного лесовозобновления в сосновых вырубках Красноярской лесостепи. Микопродукт был создан путем разложения опилок культурой базидиомицета траметеса разноцветного (*Trametes versicolor* (L.) Lloyd) и показал свою эффективность для стимуляции искусственного лесовозобновления в опытном питомнике Погорельского экспериментального хозяйства ИЛ СО РАН (Пашенова и др., 2009; Антонов и др., 2021).

В ходе исследовательских работ по почвенной биоиндикации в сосняках Погорельского бора в 2011 г. выявлен различный уровень биологической активности почвы после опытных несплошных рубок (Антонов и др., 2014). Отмечено изменение характера почвенных биологических процессов после рубок разной интенсивности и различных способов очистки лесосек от порубочных остатков и прочих лесохозяйственных отходов. Переработка порубочных остатков в щепу аппаратом РМ-4 под сосняками разнотравно-зеленомошными способствовала ускорению разложения измельченной древесно-опилочной массы, скорейшей минерализации и появлению подроста на вырубках. Рекомендо-

вано дальнейшее использование удобрительных композиций на основе измельченных порубочных остатков и опилок, а также мульчирование почвы на технологических участках рубок.

На Красноярскую лесостепь приходится значительная часть пожаров Сибири. Лесной фонд данной территории характеризуется насаждениями пирогенного происхождения (Иванова и др., 2014). Систематическое пирогенное воздействие ведет к изреживанию древесной растительности и, как следствие, к формированию преимущественно разнотравных, бруснично-разнотравных или разнотравно-брусничных насаждений с существенно пониженной продуктивностью (Курбатский, Иванова, 1987). Структура и состав напочвенного покрова во многом зависят от изреживания древостоев и формирования их состава при рубках ухода. Вероятность возникновения горения напочвенного покрова зависит и от его запаса. Актуальной задачей в данных районах является определение путей снижения горимости лесов, в том числе за счет переработки отходов лесного хозяйства и лесовосстановления после вырубок разного типа.

Цель настоящего исследования – оценить эффективность применения инновационного биоудобрения (ОПСМ + М) на участках выборочных рубок до и после пожаров по ряду характеристик микробиологической активности почвы и количеству всходов и подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В рамках поставленной цели решались следующие задачи: исследование ферментативной активности почвы и численных характеристик почвенного микробного сообщества, а также учет самосева на пробных площадях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В спелом сосняке разнотравно-зеленомошном в 2011 и 2017 гг. были выполнены два приема выборочных рубок. Суммарная интенсивность рубки по запасу составила 29 %. На технологических участках сосняка, поступившего в рубку (Волок и Пасека) в 2020 г. были заложены по 6 экспериментальных площадок – 3 контрольных (К) и 3 опытных (О). На опытные площадки было внесено по 50 кг биоудобрения (ОПСМ + М). Также были заложены подобные 6 экспериментальных площадок – 3 контрольных (К) и 3 опытных (О) – в нетронutom рубкой сосняке, который далее служил фоном (Фон) (рис. 1, а).



Рис. 1. Внешний вид экспериментальных участков в Погорельском бору.

a – при применении биоудобрения (ОПСМ + М); *б* – после пожара 7 мая 2022 г.; *в* – после внесения ОПСМ + М, 14 мая 2022 г.

Каждую пробную площадку с помощью реек делили на квадраты размером 0.5×0.5 м. На каждом квадрате подсчитывали число всходов сосны текущего года и самосева предыдущих лет (суммарное количество 1–3-летнего самосева). Число квадратов в каждом варианте опыта (объем выборки) варьировало от 16 до 48. Учеты количества всходов и самосева проводили в начале опыта (20 мая 2020 г.) и в разные периоды сезонов вегетации 2020–2022 гг. В мае 2022 г. в сосняке Погорельского бора прошел пожар высокой интенсивности. Все экспериментальные участки пострадали в разной степени. Вследствие пожара были повреждены деревья и почвенный покров.

На экспериментальных участках выгорела вся подстилка с внесенным ранее биоудобрением (ОПСМ + М), также погиб весь подрост сосны, стволы сосен прогорели на высоту 6–15 м (рис. 1, б).

На участках с биоудобрением (ОПСМ + М) глубина прогара подстилки, как правило, выше, что, по-видимому, связано с присутствием неразложившихся опилок в составе биоудобрения. В этой связи на сгоревшие опытные участки снова вносили биоудобрение (ОПСМ + М) в прежнем количестве. Были заложены следующие варианты: Фон (К и О), Пасека (К и О) и Волок (К и О). В каждом варианте было по три повторности (рис. 1, в). В течение эксперимента (2020–2022 гг.) при применении биоудобрения (ОПСМ + М) образцы почвы на экспериментальных участках были исследованы на общую биологическую активность: ферментативную активность, общую численность микроорганизмов (ОЧМ) и соотношение таксономических групп микроорганизмов. Для оценки запасов напочвенных лесных горючих материалов на экспериментальных участках применяли общепринятую методику учета горючих материалов (Жила, 2013), согласно которой на каждом экспериментальном участке закладывали по две площадки 25×20 см, а также одну площадку на контроле, всего их было 7. На площадках собирали живой напочвенный покров (травы и кустарнички), опад, который включал такие фракции, как хвоя, кора, шишки, веточки, листья и ветошь, сохранившие свою структуру. На углах заложенной площадки измеряли толщину слоя лесных горючих материалов, а также отдельно учитывали толщину мха. Образцы напочвенных горючих материалов сушили в лабораторных условиях с использованием сушильных шкафов, после чего определяли массу в абсолютно сухом

состоянии. Прогоревшую почву (2022 г.) на микробиологические и ферментативные анализы отбирали через 7 дней после пожара, затем вносили биоудобрение ОПСМ + М. Последующий отбор почвенных образцов проводили в июле и сентябре. Кроме того, в образцах почвы исследуемых участков стандартными методами определяли влажность почвы весовым методом (ГОСТ 28268-89, 1989) и pH (портативным потенциометром Аквилон 410), во время отбора образцов измеряли температуру приземного слоя воздуха (на поверхности почвенного покрова) и почвы (слой 0–10 см), с помощью портативного термометра Hanna Checktemp.

Ферментативную активность почвы определяли методами А. Ш. Галстяна и Т. А. Щербакковой (Хазиев, 2005), активность гидролитических ферментов (протеазы, уреазы, фосфатазы, инвертазы) – с использованием фотоэлектроколориметра КФК-3 при компостировании в термостате с температурой 30–38 °С и экспозиции до 24 ч, активность ферментов окислительно-восстановительной группы (пероксидаза и полифенолоксидаза – ПО и ПФО) – колориметрическими методами с предварительным полчасовым компостированием. Единицы измерения ферментативной активности: для протеазы – мг глицина/г почвы; уреазы – мг $N-NH_4$ /г почвы; инвертазы – мг глюкозы/г почвы; фосфатазы – мг P_2O_5 /г почвы; пероксидазы и фенолоксидазы – мг 1,4-бензохинона/г почвы (далее мг/г почвы). По соотношению показателей активности полифенолоксидазы к пероксидазе рассчитывали коэффициент гумификации, характеризующий минерализацию гумуса либо его новообразование (Сулейманов, Шорина, 2012). Целлюлозоразлагающую активность почв измеряли с использованием аппликационных методов (Гаврилова, Герасимова, 2019).

Оценку общей (суммарной) численности и соотношения таксономических групп почвенных микроорганизмов проводили классическими методами (Методы..., 1991; Практикум..., 2005). Для выявления общей численности культивируемых микроорганизмов готовили почвенную суспензию разведения $1 : 10^3$, затем проводили посев на агаризированные питательные среды по 0.05 мл в чашку Петри. Использовали крахмало-аммиачный (КАА), мясопептонный (МПА) и почвенный (ПА) агары, а для выявления грибов – агаризованное неохмеленное пивное сусло (СА). Микроорганизмы культивировали при температуре 25 °С. Колонии бактерий учитывали на 3–5-е сутки, актиномицетов и

грибов – на 7–10-е. Проведен количественный учет колоний неспоровых и споровых бактерий (в том числе актиномицетов), мицелиальных и дрожжевых грибов. Методом Т. Gregersen (1978) устанавливали грампринадлежность бактериальных форм. Численность целлюлолитических микроорганизмов определяли согласно ГОСТ Р 54653-2011 (2011) на среде Гетчинсона (Г) с использованием стерильных обеззоленных бумажных фильтров в качестве единственного источника целлюлозы.

Грибы идентифицировали с помощью справочной литературы (Barnet, Hunter, 1998; Watanabe, 2002) и микроскопирования клеток и колоний. При определении учитывали тип спороношения, строение плодовых тел, размер спор и характер их расположения. Микроскопирование клеток и колоний выполняли при увеличении $\times 1350$ (Olympus BX43 (Япония)).

Состояние самосева (количество всходов и самосева) учитывали в дату начала опыта (20 мая 2020 г.) и в разные периоды сезонов вегетации в 2020 и 2021 гг., а также в 2022 г. после пожара. На каждом участке отдельно учитывали число растений в четырех возрастных группах: 1) всходы (сосна первого года вегетации), 2) сеянцы однолетние (сосна второго года вегетации), 3) сеянцы двухлетние (сосна третьего года вегетации), 4) сеянцы трехлетние (сосна четвертого года вегетации).

Статистический анализ. Обработку результатов по ферментативной активности почв (корреляционно-регрессионный анализ) и численных характеристик микробного сообщества проводили с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007. Погрешности определяли по ошибке среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После рубок непременно изменяются световой и тепловой режимы, гидротермические условия, кислотность, под контролем которых находятся биологические свойства почвы, в том числе и энзимологическая активность (табл. 1).

После внесения удобрительной опилочно-почвенной смеси (ОПСМ + М) на поверхности почвы сохраняется тепло, оптимизируя температурный режим подстилок на пасеке и порубочных остатков на волоке. Как на контрольных, так и на опытных участках температура повысилась к сентябрю в среднем на 3–5 °С. Ко второму году исследований значения pH почвы участков

Таблица 1. Гидротермические характеристики и кислотность почвы в слое 0–10 см на экспериментальных участках в сосняке Погорельского бора

Время сезона	Показатель	Фон		Пасека		Волок	
		К	О	К	О	К	О
До внесения ОПСМ + М, май 2020 г.	$T, ^\circ\text{C}$	4.0	7.8	6.0	8.7	6.6	8.3
	pH	6.55	6.55	6.56	6.56	6.47	6.57
	Влажность, %	21.2	26.4	25.1	23.8	19.2	27.9
Сентябрь 2020 г.	$T, ^\circ\text{C}$	9.2	9.5	8.7	9.1	9.4	9.2
	pH	6.69	6.88	6.60	6.72	6.28	6.24
	Влажность, %	27.7	24.0	26.9	27.2	28.8	42.1
Июнь 2021 г.	$T, ^\circ\text{C}$	10.2	10.4	8.9	9.6	9.4	9.4
	pH	6.53	6.50	6.61	6.80	6.49	6.18
	Влажность, %	22.4	24.0	44.8	27.2	59.1	62.7
Сентябрь 2021 г.	$T, ^\circ\text{C}$	8.5	8.6	8.5	8.6	8.8	9.1
	pH	6.59	6.53	6.67	6.79	6.49	6.53
	Влажность, %	31.5	21.8	33.3	32.6	62.7	26.5
Май 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	8.5	9.2	8.2	8.2	8.3	9.2
	pH	6.47	6.55	6.43	6.45	6.65	6.46
	Влажность, %	12.8	21.3	23.3	21.4	13.8	21.2
Июль 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	14.8	15.7	15.9	15.7	15.1	14.9
	pH	6.94	6.92	7.04	6.81	6.91	6.74
	Влажность, %	16.3	16.2	12.9	26.1	15.6	20.5
Сентябрь 2022 г.	$T, ^\circ\text{C}$	9.5	9.6	9.5	9.4	10.1	9.9
	pH	6.30	6.49	6.53	6.35	6.49	6.56
	Влажность, %	34.3	27.4	24.9	32.7	16.3	44.6

возросли. Незначительное подщелачивание почвы также сопровождалось увеличением влажности почвы на волок (табл. 1). После пожара температура в течение сезона оставалась достаточно высокой с пиком в июле, до 15.7–15.9 °С. На участках с внесением ОПСМ + М температура была на 0.1–0.2° ниже, чем в контроле.

Ферментативная активность почвы экспериментальных участков. После внесения биоудобрения (ОПСМ + М) проводились наблюдения за биохимической активностью почвы (табл. 2).

Исследовалась активность окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов в верхнем, наиболее активном слое почвы экспериментальных участков (0–10 см). Разреживание полога, осветление и дополнительное поступление углерода в почву в виде порубочных остатков изменяли активность оксидаз и гидролаз. Внесение биоудобрения заметно увеличило активность уреазы и инвертазы к сентябрю как на Фоне, так и на технологических участках: уреазы – с 0.70–1.36 до 1.19–1.86 мг/г почвы, инвертазы – с 34–44 до 45–48 мг/г почвы (табл. 2).

Таблица 2. Ферментативная активность почвы на экспериментальных участках в 2020–2021 гг., мг/г почвы (приведена стандартная ошибка среднего)

Показатель	Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
	Контроль			Внесение ОПСМ + М		
2020 г.						
До внесения ОПСМ + М						
Протеаза	0.95 ± 0.02	0.91 ± 0.07	0.96 ± 0.05	—	—	—
Уреаза	1.92 ± 0.07	1.76 ± 0.11	1.69 ± 0.12	—	—	—
Инвертаза	42.1 ± 3.55	43.3 ± 5.60	44.0 ± 3.20	—	—	—
Фенолоксидаза	0.14 ± 0.03	0.32 ± 0.09	0.14 ± 0.02	—	—	—
Пероксидаза	0.19 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.22 ± 0.09	—	—	—
Коэффициент гумификации	0.93 ± 0.45	1.96 ± 0.34	0.89 ± 0.37	—	—	—
После внесения ОПСМ + М						
Протеаза	1.06 ± 0.26	1.29 ± 0.41	1.20 ± 0.27	0.87 ± 0.10	0.84 ± 0.05	0.97 ± 0.10
Уреаза	0.70 ± 0.13	1.26 ± 0.20	1.36 ± 0.16	1.19 ± 0.29	1.36 ± 0.23	1.86 ± 0.31
Инвертаза	43.9 ± 2.18	34.4 ± 4.61	35.6 ± 2.50	46.6 ± 2.41	48.1 ± 1.74	44.8 ± 1.92
Фенолоксидаза	0.43 ± 0.04	0.31 ± 0.02	0.33 ± 0.05	0.29 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.32 ± 0.04
Пероксидаза	0.31 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.30 ± 0.03	0.31 ± 0.03	0.28 ± 0.02
Коэффициент гумификации	1.40 ± 0.17	1.23 ± 0.12	1.22 ± 0.13	1.01 ± 0.07	1.07 ± 0.08	1.16 ± 0.21
2021 г.						
Июнь						
Протеаза	0.44 ± 0.13	0.60 ± 0.09	0.56 ± 0.05	0.56 ± 0.16	0.29 ± 0.05	0.56 ± 0.16
Уреаза	1.77 ± 0.37	1.74 ± 0.13	1.77 ± 0.20	2.15 ± 0.26	1.44 ± 0.16	2.65 ± 0.05
Фосфатаза	1.30 ± 0.10	1.55 ± 0.07	1.65 ± 0.18	1.07 ± 0.03	1.16 ± 0.22	2.15 ± 0.50
Инвертаза	44.3 ± 0.18	41.6 ± 0.94	39.3 ± 2.48	55.6 ± 6.14	47.5 ± 8.43	48.0 ± 7.80
Фенолоксидаза	0.21 ± 0.01	0.55 ± 0.10	0.32 ± 0.08	0.41 ± 0.01	0.56 ± 0.10	0.70 ± 0.09
Пероксидаза	0.13 ± 0.01	0.34 ± 0.08	0.19 ± 0.05	0.22 ± 0.03	0.32 ± 0.04	0.43 ± 0.11
Коэффициент гумификации	1.60 ± 0.19	1.55 ± 0.13	2.29 ± 0.34	1.99 ± 0.22	1.73 ± 0.11	1.89 ± 0.40
Сентябрь						
Протеаза	1.40 ± 0.14	0.99 ± 0.03	0.87 ± 0.04	0.63 ± 0.03	1.17 ± 0.05	1.05 ± 0.08
Уреаза	1.38 ± 0.33	1.66 ± 0.08	1.54 ± 0.33	1.31 ± 0.25	1.49 ± 0.15	1.21 ± 0.20
Фосфатаза	2.29 ± 0.23	1.59 ± 0.27	1.70 ± 0.04	2.27 ± 0.27	2.37 ± 0.45	3.93 ± 0.60
Инвертаза	33.2 ± 5.59	26.2 ± 4.68	46.6 ± 10.33	65.5 ± 2.60	25.6 ± 5.81	41.2 ± 11.07
Фенолоксидаза	0.56 ± 0.03	0.48 ± 0.08	0.39 ± 0.12	0.31 ± 0.04	0.42 ± 0.04	0.55 ± 0.04
Пероксидаза	0.62 ± 0.07	0.62 ± 0.15	0.53 ± 0.20	0.41 ± 0.04	0.67 ± 0.16	0.90 ± 0.18
Коэффициент гумификации	0.91 ± 0.07	0.81 ± 0.06	0.81 ± 0.15	0.75 ± 0.06	0.81 ± 0.28	0.72 ± 0.21

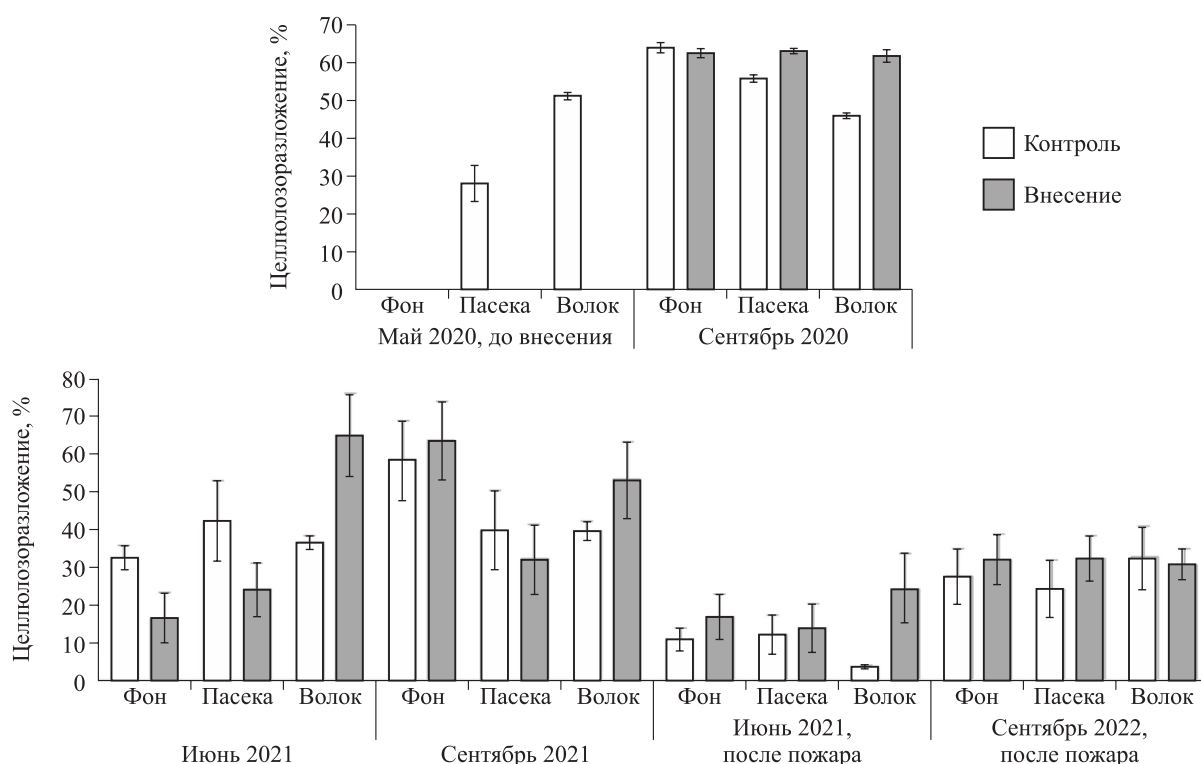


Рис. 2. Способность почвенной микрофлоры к целлюлозоразложению в слое 0–10 см ($n = 3$) на экспериментальных участках Погорельского бора (2020–2022 гг.).

В целом по имеющимся шкалам (Звягинцев, 1978; Гапонюк, Малахов, 1985) энзимологическую активность в верхнем слое почвы исследуемых участков можно считать низкой, а активность гидролитических ферментов была как на восстанавливающихся вырубках с низкой интенсивностью (Фахрутдинов, Ямпольская, 2015). В 2021 г. на участках внесения биоудобрения в июне наблюдалось небольшое повышение активности инвертазы (с 39–44 до 47–55 мг/г почвы), однако в сентябре наибольшее повышение ферментативной активности на технологических участках наблюдали на примере фосфатазы (с 1.6–1.7 до 2.4–3.9 мг/г почвы) (табл. 2).

Способность почвенной микробиоты к целлюлозоразложению до внесения биоудобрения на Волоке в среднем была 51%, на Фоновом участке – немного ниже – 47 % и самой низкой – на Пасеке – 28 % (рис. 2). После внесения биоудобрений к концу вегетационного периода достоверное увеличение целлюлозоразлагающего потенциала микробиоты отмечено на Пасеке и Волоке на 8 и 16 % соответственно относительно контроля.

Возможно, это связано с совокупным влиянием как биоудобрения, так и дополнительным осветлением после рубок.

В июне 2021 г. потенциальная целлюлозоразлагающая активность почвы достигала 42 %,

но положительное действие удобрений наблюдалось только на Волоке, где целлюлозоразлагающий потенциал составил 65 %, что на 29 % выше, чем в контроле. К сентябрю биоудобрение положительное действие оказывало на целлюлозоразлагающий потенциал почвенной микробиоты на Волоке (53 %), что выше на 14 % на аналогичных участках без внесения. На пасеке способность к целлюлозоразложению продолжала тренд к снижению и составляла 32 % (рис. 2).

Активность фенолоксидаз была примерно одинаковой в начале и в конце сезона, но коэффициент гумификации – выше в июне на всех участках, так как в сентябре повышается активность пероксидазы (до 0.4–0.9 мг/г почвы), скорей всего по причине поступления дополнительного количества опада в течение сезона (табл. 2).

После применения биоудобрения повышается зависимость от температуры у полифенолоксидаз (возрастание коэффициента детерминации R^2 с 0.35 до 0.68) и уреазы (с 0.29 до 0.63), причем в последнем случае зависимость описывается логарифмом. Прочнее становится зависимость от влажности, описываемая в основном полиномиальными уравнениями, за исключением полифенолоксидазы ($R^2 = 0.56$ после внесения ОПСМ + М). У уреазы она также повышается после применения биоудобрения (R^2 с 0.01 до

Таблица 3. Пирологические характеристики экспериментальных участков через 2 нед после пожара в мае 2022 г.

Участок	Вариант, ОПСМ + М	Температура, °С		Мощность слоя подстилки	Глубина прогорания подстилки	Высота нагара, м	Запас лесных горючих материалов, т/га
		воздуха	почвы				
Фон	Без внесения Внесение	27.0	8.4	0.6	1.5	min 8, max 15	2.79
		27.2	9.1	0.3	1.6		2.75
Пасека	Без внесения Внесение	26.9	10.8	0.7	2.0	min 6, max 8	3.04
		26.7	8.0	0.6	2.3		4.93
Волок	Без внесения Внесение	26.6	15.7	0.5	0.5	min 2, max 10	2.53
		26.3	8.3	0.3	1.6		1.76
Контроль		27.5	12.0	0.5	Не горело		6.01

0.67). Незначительно повышается зависимость активности протеазы и целлюлозоразлагающей способности от влажности ($R^2 = 0.27$ и $R^2 = 0.40$ соответственно). На экспериментальных участках после пирогенного воздействия выявлено снижение запаса лесных горючих материалов до 50 % от допожарных значений. Так, послепожарный запас составил на Волоке от 1.76 до 2.53 т/га, при этом глубина прогорания доходила до 1.6 см. На Пасеке данный показатель варьировал от 3.04 до 4.93 т/га, глубина прогорания составила более 2 см (табл. 3).

После пожара в мае 2022 г. заметно выше была активность лишь фосфатазы после внесения биоудобрения на всех участках (до 1.33–1.43 мг/г почвы) (табл. 4), несколько выше – протеазная активность на Волоке и на Фоновом участке (увеличилась с 0.23–0.28 до 0.32–0.43 мг/г почвы).

Активность инвертазы повысилась только на участке Фон (с 55.5 до 87.2 мг/г почвы).

Несмотря на низкую фенолоксидазную активность, коэффициент гумификации стал выше после внесения биоудобрения на технологических участках почти в 2 раза, и несколько ниже – на Фоне. Способность почвенной микробиоты к целлюлозоразложению после пожара на всех исследуемых участках заметно снизилась, примерно в 4–5 раз относительно предыдущего сезона и составила 3–12 %. Достоверные различия по активности целлюлозолитических ферментов на площадках с внесенным биоудобрением отмечены на Волоке – опытный показатель в 8 раз превышал контрольное значение. В конце вегетационного периода внесение биоудобрения увеличивало активность гидролитических ферментов на всех участках, за исключением Волока, где возрастает лишь активность протеазы (почти в 3 раза) (табл. 4). Причем происходит

это на фоне двукратного повышения активности фенолоксидазы и увеличения коэффициента гумификации до 0.96, что может свидетельствовать о разложении и минерализации доступного материала в биоудобрениях и реакциях поликонденсации гумусовых веществ в верхних органических горизонтах. Отмечена тенденция роста целлюлозоразлагающего потенциала к сентябрю (рис. 2). После пожара заметно снизились зависимости биохимических показателей в течение сезона от температуры, однако повысились от влажности в случае как инвертазы (R^2 с 0.24 до 0.85), так и фосфатазы, протеазы и полифенолоксидазы (R^2 с 0.10 до 0.87).

Микробиологическая активность почвы экспериментальных участков. Микробиологические анализы почвы экспериментальных участков показали, что изначально (до внесения ОПСМ+М) численность микроорганизмов не различалась между участками и колебалась в пределах 3.08–3.48 млн КОЕ/г почвы. В микробное сообщество входили неспоровые и споровые бактерии (в том числе актиномицеты) и грибы. В сентябре 2020 г. в контрольных вариантах эксперимента отмечено достоверное увеличение ОЧМ по сравнению с началом года (рис. 3).

Внесение ОПСМ + М не оказало достоверного воздействия на суммарную численность почвенных микроорганизмов, но вызвало увеличение доли грибов на 4–8 %.

К концу второго года исследования в опытных вариантах участков Волок и Пасека отмечено достоверное увеличение численности по сравнению с контрольными значениями в 1.5 и 2.9 раза соответственно (рис. 3). На участках Фон К и О не выявлено достоверных различий по ОЧМ, но вариант с внесением ОПСМ + М характеризуется меньшей долей грибов (в 1.7 раз) и снижением доли актиномицетов.

Таблица 4. Ферментативная активность на участках рубок с внесением биоудобрения после пожара в 2022 г., мг/г почвы (приведена стандартная ошибка среднего)

Месяц	Показатель	Контроль			Внесение ОПСМ + М		
		Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
Май	Гидролазы						
	Протеаза	0.24 ± 0.03	0.31 ± 0.01	0.28 ± 0.09	0.32 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.43 ± 0.07
	Уреаза	1.84 ± 0.30	2.94 ± 0.77	3.22 ± 0.91	1.95 ± 0.13	2.60 ± 0.17	2.11 ± 0.33
	Фосфатаза	1.13 ± 0.19	0.92 ± 0.07	1.03 ± 0.17	1.43 ± 0.01	1.33 ± 0.15	1.35 ± 0.32
	Инвертаза	55.52 ± 6.23	64.63 ± 11.53	80.14 ± 10.52	87.24 ± 12.65	63.86 ± 21.14	69.00 ± 6.17
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.09 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.13 ± 0.05	0.31 ± 0.04	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.02
	Пероксидаза	0.17 ± 0.03	0.22 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.29 ± 0.07
	Коэффициент гумификации	0.52 ± 0.06	1.14 ± 0.23	1.11 ± 0.19	1.44 ± 0.15	1.28 ± 0.30	0.97 ± 0.34
Июль	Гидролазы						
	Протеаза	0.40 ± 0.04	0.38 ± 0.01	0.56 ± 0.12	0.49 ± 0.03	0.39 ± 0.03	0.61 ± 0.04
	Уреаза	1.49 ± 0.27	2.57 ± 0.41	2.31 ± 0.47	2.84 ± 0.39	2.10 ± 0.63	1.66 ± 0.35
	Фосфатаза	1.69 ± 0.23	1.00 ± 0.06	1.26 ± 0.09	1.87 ± 0.14	1.58 ± 0.14	1.65 ± 0.24
	Инвертаза	65.28 ± 9.63	68.87 ± 8.62	77.13 ± 3.97	90.36 ± 4.42	81.71 ± 5.04	76.96 ± 4.07
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.17 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.21 ± 0.05	0.29 ± 0.04	0.30 ± 0.02	0.27 ± 0.04
	Пероксидаза	0.28 ± 0.05	0.79 ± 0.17	0.90 ± 0.14	0.66 ± 0.15	0.35 ± 0.07	0.63 ± 0.17
	Коэффициент гумификации	0.65 ± 0.11	0.50 ± 0.16	0.23 ± 0.04	0.50 ± 0.14	0.90 ± 0.23	0.50 ± 0.17
Сентябрь	Гидролазы						
	Протеаза	0.27 ± 0.04	0.58 ± 0.04	0.34 ± 0.02	0.64 ± 0.06	0.53 ± 0.19	0.96 ± 0.06
	Уреаза	2.13 ± 0.33	2.65 ± 0.01	4.21 ± 0.31	3.39 ± 0.61	2.66 ± 0.57	3.24 ± 0.64
	Фосфатаза	1.38 ± 0.12	1.08 ± 0.09	1.40 ± 0.19	1.65 ± 0.17	1.28 ± 0.24	1.08 ± 0.20
	Инвертаза	27.73 ± 1.44	30.22 ± 9.65	26.53 ± 2.28	46.16 ± 1.57	40.00 ± 0.93	27.26 ± 2.70
	Оксидазы						
	Фенолоксидаза	0.37 ± 0.06	0.32 ± 0.01	0.26 ± 0.13	0.36 ± 0.06	0.38 ± 0.02	0.54 ± 0.13
	Пероксидаза	0.56 ± 0.07	1.28 ± 0.17	0.60 ± 0.06	0.94 ± 0.20	0.82 ± 0.10	0.69 ± 0.13
	Коэффициент гумификации	0.71 ± 0.17	0.35 ± 0.15	0.43 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.48 ± 0.07	0.97 ± 0.19

В мае 2022 г. на экспериментальных участках сосняков Погорельского бора прошел пожар, последствия которого сказались на почвенном микробоценозе. Суммарная численность микроорганизмов в почве экспериментальных участков находилась в пределах 8.5–39.06 млн КОЕ/г почвы, при этом максимальные значения ОЧМ отмечены в вариантах Пасека О и Фон К (рис. 3).

Пожар обусловил поступление пирогенного углерода в почву, что способствовало росту численности микроорганизмов-карботрофов, относящихся к различным таксономическим группам. Среди почвенного микробного сообщества доминировали неспоровые бактерии, численность которых достигала 37.2 млн КОЕ/г почвы, а доля от общего числа микроорганизмов – 96 % (табл. 5). По сравнению с сентябрем 2021 г. во

всех вариантах отмечен рост численности спорообразующих бактерий (без учета актиномицетов), их численность находилась в пределах 0.58–4.09 млн КОЕ/г почвы. Все почвенные образцы характеризовались относительно невысокой численностью грибов, которая колебалась от 0.23 до 1.29 млн ОЕ/г почвы (табл. 5).

Грибные организмы были представлены дрожжевыми и гифальными формами. Представители рода *пеницилл* (*Penicillium* Link) доминировали в вариантах Волок К (10.78 %), Фон К (23.46 %) и О (18.56 %). На участке Волок О преобладали микромицеты рода *триходерма* (*Trichoderma* Pers.) (49.26 %). На участке Пасека доминировали представители отдела *зигомикота* (*Zygomycota* Moreau): в контроле – *Umbelopsis* Amos & H. L. Barnett (14.87 %), в опыте – *мукор* (*Mucor* Fresen.) (18.24 %).

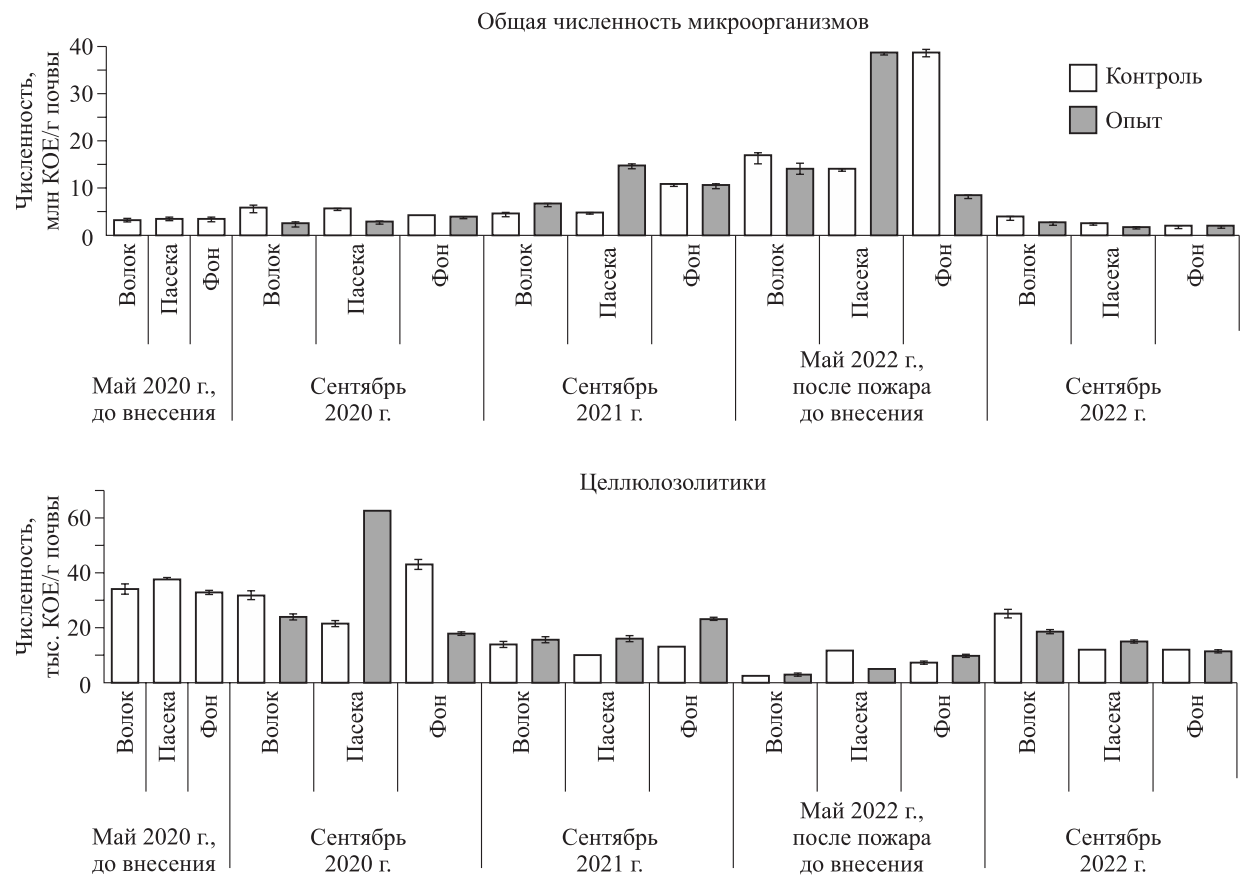


Рис. 3. Общая численность микроорганизмов и целлюлозолитических микроорганизмов на экспериментальных участках Погорельского бора (2020–2022 гг.).

Таблица 5. Соотношение (%) таксономических групп почвенных микроорганизмов на экспериментальных участках сосняка Погорельского бора (2020–2022 гг.) до и после внесения биоудобрения

Группа микроорганизмов	2020 г.									2021 г., сентябрь					
	Май (до внесения ОПСМ + М)			Сентябрь											
	Волок	Пасека	Фон	Волок		Пасека		Фон		Волок		Пасека		Фон	
				К	О	К	О	К	О	К	О	К	О	К	О
Споровые бактерии	9.2	14.5	12.7	6.6	5.6	6.1	3.4	6.4	4.5	22.0	25.2	42.2	2.0	2.4	2.5
Актиномицеты	16.8	16.5	19.6	11.9	18.7	27.4	15.8	18.4	12.3	25.7	5.2	21.1	4.8	9.1	11.4
Неспоровые бактерии	61.4	55.8	57.7	73.0	59.1	54.6	60.6	35.4	65.1	40.2	61.1	25.2	84.0	80.8	81.6
Грибы	12.7	13.2	10.0	8.5	16.5	11.9	20.2	39.8	18.1	12.1	8.5	11.5	9.2	7.7	4.5
2022 г.															
	Май (после пожара, до внесения ОПСМ + М)							Сентябрь							
	Волок	Пасека	Фон	Волок		Пасека		Фон		Волок		Пасека К			
				К	О	К	О	К	О	К	О				
Споровые бактерии	24.3	14.4	25.7	1.5	1.5	20.6	13.2	20.3	13.5	12.1	15.0	11.6			
Актиномицеты	1.4	12.6	4.8	1.1	0.3	5.2	53.4	41.5	37.4	31.4	42.5	37.5			
Неспоровые бактерии	72.9	70.7	60.7	96.0	94.9	67.1	18.2	22.0	22.5	24.7	14.9	37.1			
Грибы	1.4	2.3	8.8	1.4	3.3	7.2	15.2	16.3	26.5	31.8	27.7	13.8			

В сентябре 2022 г. отмечено снижение общей численности почвенных микроорганизмов в 4–10 раз (рис. 3), при этом в большинстве случаев преобладали актиномицеты, их доля достигала 53 % (Волок К) (табл. 5).

Во всех вариантах отмечено увеличение доли грибов (в 3–14 раз) относительно начала сезона, при этом также отмечено снижение их видового разнообразия.

Постоянными обитателями почвенного микробиоценоза были микромицеты *Trichoderma* sp., *Penicillium* sp. и не идентифицированные представители отдела зигомикота. Также изучена численность микроорганизмов, обладающих целлюлолитической активностью (рис. 3).

Результаты микробиологических посевов показали, что изначально данный показатель находился в пределах 32.8–37.51 тыс. КОЕ/г почвы, при этом на участке Пасека количество целлюлолитиков (актиномицетов и грибов) было достоверно выше, чем на участке Фон. К сентябрю 2020 г. на участках Волок О и Фон О отмечено снижение численности целлюлолитиков на 9 и 15 тыс. КОЕ/г почвы соответственно относительно начала вегетации.

При этом в варианте Пасека О данный показатель превысил на 25.8 тыс. КОЕ/г почвы и составил 62.36 тыс. КОЕ/г почвы. Следует отметить, что на участках Пасека О и Фон О в сентябре помимо грибов и актиномицетов выделялись грамотрицательные бактерии, обладающие целлюлолитической активностью.

К сентябрю 2021 г. на всех участках с внесением ОПСМ + М отмечено повышение количества целлюлолитиков по сравнению с контрольными вариантами (рис. 3). Максимальное значение пришлось на участок Фон О и составило 23.06 тыс. КОЕ/г почвы. После пожара в мае численность целлюлолитических микроорганизмов упала до минимальных значений за весь период исследования и находилась в пределах 2.18–12.16 тыс. КОЕ/г почвы. Отмечено, что на разных участках доминировали различные таксономические группы. Так, на участках Волок К и О и Пасека К преобладали бактериальные формы (кроме актиномицетов), их доля составила 79; 39 и 57 % соответственно. В варианте Пасека О преобладали актиномицеты (51 %), на участках Фон К и Фон О – грибы (56 и 50 % соответственно).

В сентябре 2022 г. численность целлюлолитиков повысилась в 2–5 раз относительно послепожарных значений, но не достигла исходных данных 2020 г. (рис. 3). При этом бактерии

доминировали во всех контрольных вариантах, их доля достигла 53 % (Волок К). На участке Волок О преобладали актиномицеты (42 %), а Пасека О – грибы (51 %). В варианте Фон О актиномицеты и грибы занимали равные позиции, их доли составляли по 36 %.

Состояние самосева на экспериментальных участках. Учет самосева (1–3-летних) сосны обыкновенной показал неоднозначные результаты. В 2020–2021 гг. на экспериментальных участках сосняка отмечено положительное влияние биоудобрения на лесовозобновление по густоте всходов и подросту сосны. В течение 2 лет наблюдений отмечали более низкую густоту всходов на пасеке по сравнению с волоком (табл. 6). Возможно, это связано с недостаточной освещенностью под пологом сосны на Пасеке. На Волоке, где деревья были убраны при проведении выборочной рубки, световые условия были более благоприятны для всходов и самосева сосны, что сказалось на увеличении их количества.

Отмечено, что на Пасеке количество всходов и самосева в опытном варианте с внесением ОПСМ + М было достоверно больше, чем в контроле ($p < 0.05$), биоудобрение здесь стимулировало естественное лесовозобновление. На Волоке к концу сезона 2020 г. (сентябрь) стимулирующего эффекта не обнаружилось, количество всходов в контрольном варианте было выше, чем в опытном.

Однако на второй год наблюдений на Волоке количество всходов в начале сезона вегетации (июнь 2021 г.) в опытном варианте было существенно выше, чем в контроле. Такая же тенденция сохранилась и в сентябре 2021 г. К тому же подрост сосны по волокам было заметно больше, чем всходов, и это свидетельствует о том, что всходы сосны успешно перешли в категорию подроста на второй год после применения ОПСМ + М. Однако при пожаре 2022 г. весь самосев сгорел, и на участках никаких всходов не осталось (табл. 6).

После закладки новых участков с применением ОПСМ + М в июле и сентябре 2022 г. были зарегистрированы появившиеся всходы сосны как на опытных, так и на контрольных участках. Как показали наши результаты, естественное лесовозобновление на исследуемых участках после пожара было меньше, чем в допожарный период (на волоке в 6 раз относительно июльских наблюдений 2021 г.). При этом выявлено достоверное стимулирующее действие ОПСМ + М на всхожесть семян сосны как на Пасеке, так и на

Таблица 6. Учет всходов и подроста сосны на экспериментальных участках в сосняке Погорельского бора после рубок и пожара (2020–2022 гг.), шт./м² (*n* = 9)

Месяц	Категория самосева	Контроль			Опыт		
		Фон	Пасека	Волок	Фон	Пасека	Волок
2020 г.							
Июль	Всходы	10.1 ± 1.3 ^a	2.3 ± 0.5 ^a	22.9 ± 3.3 ^a	11.5 ± 1.3 ^a	6.2 ± 0.9 ^b	29.7 ± 3.5 ^a
	Подрост	0.7 ± 0.3	1.7 ± 0.6 ^a	19.3 ± 3.9 ^a	Не измеряли	1.3 ± 0.5 ^a	12.9 ± 3.4 ^a
Сентябрь	Всходы	14.7 ± 1.5 ^a	4.4 ± 0.7 ^a	30.2 ± 2.5 ^a	10.7 ± 1.7 ^b	10.2 ± 1.4 ^b	22.6 ± 1.7 ^b
	Подрост	0.4 ± 0.2	1.8 ± 0.5 ^a	18.0 ± 1.9 ^a	Не измеряли	1.4 ± 0.5 ^a	16.2 ± 2.0 ^a
2021 г.							
Июнь	Всходы	0 ^a	0.1 ± 0.08 ^a	0.5 ± 0.2 ^a	0.2 ± 0.09 ^a	0 ^a	2.1 ± 0.5 ^a
	Подрост	9.0 ± 1.2 ^a	3.5 ± 0.6 ^a	43.2 ± 2.9 ^a	7.9 ± 1.5 ^a	9.8 ± 1.4 ^b	33.4 ± 2.8 ^b
Сентябрь	Всходы	Не измеряли	3.2 ± 0.7 ^a	26.7 ± 2.9 ^a	Не измеряли	6.9 ± 1.1 ^b	31.5 ± 2.4 ^a
	Подрост	» »	3.1 ± 0.6 ^a	32.4 ± 2.5 ^a	» »	7.5 ± 1.2 ^b	34.7 ± 2.3 ^a
2022 г. (после пожара и повторного внесения ОПСМ + М)							
Июль	Всходы	4.75 ± 0.27 ^a	1.77 ± 0.13 ^a	3.25 ± 0.25 ^a	3.42 ± 0.18 ^b	3.14 ± 0.15 ^b	4.87 ± 0.20 ^b
	Подрост	Не обнаружено			Не обнаружено		
Сентябрь	Всходы	5.14 ± 0.28 ^a	2.00 ± 0.16 ^a	2.56 ± 0.25 ^a	3.52 ± 0.17 ^b	4.14 ± 0.21 ^b	5.48 ± 0.20 ^b
	Подрост	Не обнаружено			Не обнаружено		

Примечание. Одинаковыми индексами *a* и *b* отмечены варианты эксперимента (опыт, контроль) достоверно не различающиеся между собой (*p* < 0.05 по *t*-критерию) в Фоновом лесу, на Пасеке и на Волоке.

Волоке. Обращает на себя внимание, что после пожара всхожесть на Волоке и Пасеке перестала резко различаться. Так, в июле 2020 г. до пожара количество всходов на Волоке было в 5–10 раз больше, чем на Пасеке, а в июле 2022 г. после пожара – в 1.5–2 раза (табл. 6).

В опытных вариантах Волока и Пасеки зарегистрировано большее количество всходов по сравнению с контрольными, а на фоновых участках в лесу – большее количество всходов отмечено в контроле по сравнению с опытом (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным результатам, внесение в 2020 г. инновационного биоудобрения (ОПСМ + М) на экспериментальные участки (Пасека, Волок, Фон) сосняков Погорельского бора Красноярской лесостепи вызвало увеличение биологической активности почвы по сравнению с вариантами без внесения ОПСМ + М. Так, в первые 2 года показатели активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов почвы в 1.5–2 раза увеличивались по сравнению с контрольными вариантами. Биоудобрение оказало активизирующее воздействие на почвенную микробиоту всех опытных участков: к концу второго года исследования в отдельных вариантах отмечено достоверное

увеличение численности до 3 раз по сравнению с контрольными значениями. При этом внесение ОПСМ + М в подстилку стимулировало образование всходов сосны, повышало их сохранность на участках Пасеки и Волока.

Пожар в мае 2022 г. полностью уничтожил самосев/подрост сосны на всех экспериментальных участках. Вторичное внесение биоудобрения в пирогенно трансформированную почву способствовало появлению достоверно большего количества всходов в опытных вариантах Волока и Пасеки по сравнению с соответствующими контрольными участками. Наиболее показательные результаты получены при внесении ОПСМ + М на участки без порубочных остатков. Отмечено, что до пожара количество всходов на Волоке было в 6 раз выше, чем на Пасеке, а после пожара на Волоке и Пасеке существенной разницы не обнаружено.

Таким образом, проведенные исследования показывают целесообразность использования ОПСМ + М для активации естественного возобновления сосны обыкновенной после проведения выборочных рубок и пожара.

Работа выполнена в рамках государственного задания FWES 2021–0011 «Снижение рисков возрастающего воздействия болезней и вредителей на лесные экосистемы в условиях глобальных изменений окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов Г. И., Барченков А. П., Пашенова Н. В., Кондакова О. Э., Гродницкая И. Д. Влияние опилочно-почвенных субстратов на рост саженцев сосны и ели в лесопитомнике экспериментального хозяйства «Погорельский бор» // Лесоведение. 2021. № 3. С. 303–317.
- Антонов Г. И., Кондакова О. Э., Семенякин Д. А. Влияние несплошных рубок на почвенный микробный комплекс сосняков Красноярской лесостепи // Живые и биокосные системы. 2014. № 7. 18 с.
- Антонов Г. И., Пашенова Н. В., Гродницкая И. Д. Опилочно-почвенный субстрат для оптимизации плодородия почв. Патент на изобретение № 2681572 от 11.03.2019.
- Гаврилова В. И., Герасимова М. И. Целлюлозолитическая активность почв: методы измерения, факторы и эколого-географическая зависимость // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 23–27.
- Гапонюк Э. И., Малахов С. В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах: Тр. 4-го Всесоюз. совещ. Л.: Гидрометеониздат, 1985. С. 3–10.
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Утв. и введен в действие Пост. Гос. комитета СССР по стандартам от 27.09.89 № 2924. Дата введения 01.06.1990. М.: Госстандарт, 1989.
- ГОСТ Р 54653-2011. Удобрения органические. Методы микробиологического анализа. Утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 802-ст. Дата введения 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2011. 24 с.
- Жила С. В. Трансформация фитомассы в светлосвойных насаждениях Нижнего Приангарья под воздействием пожаров: дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2013. 190 с.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
- Иванова Г. А., Конард С. Г., Макрае Д. Д. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири / Отв. ред. М. Д. Евдокименко. Новосибирск: Наука. 2014. 232 с.
- Курбатский Н. П., Иванова Г. А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1987. 111 с.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Асеева И. В., Бабьева И. П., Бызов Б. А., Гузев В. С., Добровольская Т. Г., Звягинцев Д. Г., Зенова Г. М., Кожевни П. А., Кураков А. В., Лысак Л. В., Марфенина О. Е., Мирчинк Т. Г., Полянская Л. М., Паников Н. С., Скворцова И. Н., Степанов А. Л., Ужаров М. М. / Под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- Пашенова Н. В., Лоскутов С. Р., Пермькова Г. В., Анискина А. А. Влияние отвара чистотела на биоконверсию сосновых опилок культурами базидиальных грибов-ксилотрофов // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: Материалы IV Всерос. конф., Барнаул, 21–23 апр., 2009 г. В 2-х кн. / Под ред. Н. Г. Базарновой, В. И. Маркина. Барнаул: Алтай. гос. ун-т, 2009. Кн. 2. С. 39–41.
- Полякова Г. Г. Физиологические механизмы иммунитета хвойных на примере взаимодействия флоры ствола и офиостомовых грибов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.01.05. Красноярск: СФУ, 2012. 31 с.
- Постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 № 513-п «Об утверждении государственной программы Красноярского края «Развитие лесного хозяйства». Красноярск: Правительство Красноярского края, 2013.
- Практикум по микробиологии / Под ред. А. И. Нетрусова. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 608 с.
- Сулейманов Р. Р., Шорина Т. С. Влияние нефтяного загрязнения на динамику биохимических процессов чернозема обыкновенного (Оренбургская область) // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 240–243.
- Фахрутдинов А. И., Ямпольская Т. Д. Изменение отдельных микробных и биохимических показателей почв лесных вырубок ХМАО – Югры // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2015. Т. 17. № 6. С. 268–273.
- Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- Barnet H. L., Hunter B. B. Illustrated genera of imperfect fungi. Fourth Ed. St. Paul, Minnesota: Amer. Phytopathol. Soc. Press, 1998. 218 p.
- Gregersen T. Rapid method for distinction of gram-negative from gram-positive bacteria // Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. 1978. V. 5. N. 2. P. 123–127.
- Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi: Morphologies of cultured fungi and key to species. 2nd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. 504 p.

INFLUENCE OF INNOVATIVE BIOFERTILIZERS ON SOIL BIOLOGICAL ACTIVITY AND UNDERGROWTH OF SCOTCH PINE AFTER FELLING AND FIRE

G. I. Antonov, V. A. Senashova, G. G. Polyakova, N. V. Pashenova,
S. V. Zhila, I. D. Grodnitskaya

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: egoan@yandex.ru, vera0612@mail.ru, ggpolyakova@mail.ru, pasnat@ksc.krasn.ru,
getgain@mail.ru, igrod@ksc.krasn.ru

Preserving the integrity of forests after logging and fires involves the development of various methods to promote natural reforestation. One of these methods is the creation of environmentally friendly and safe biofertilizers based on waste from the timber industry. The use of innovative biofertilizer in the Pogorelsky Bor (pine forest) of the Krasnoyarsk forest-steppe had a positive effect on the biopotential of soils and the amount of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) undergrowth after selective felling. In the first two years, in all experimental variants, an increase in the activity of hydrolytic and redox enzymes of the soil by 1.5–2 times was noted; they increased compared to the control. Immediately after the introduction of biofertilizer in the soil microbial complex, the amount of cellulolytics increases to 62 thousand CFU/g of soil in the logging areas. By the end of the growing season, both in the first and in the second year of application of biofertilizer in the experimental variant of the logging, sprouts of Scots pine were recorded 2–3 times more than in the control variant of this site. The fire that took place in May 2022 led to an increase in the total number of microorganisms up to 38 million CFU/g of soil and an increase in the activity of a number of hydrolytic enzymes during the growing season in experimental plots using biofertilizer. At the end of the growing season in 2022, there was no response of microorganisms to the application of biofertilizer, and actinomycetes dominated in the soil microbial complex. Also, by September of this year, the cellulose-decomposing potential, humification, and the activity of hydrolytic and redox enzymes decreased by more than 2 times. Biofertilizer significantly stimulated the formation of shoots and undergrowth of pine in the post-fire areas of the technological areas of felling (logging sites and portage) by 2 times.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., forest regeneration, sawdust-soil substrate, mycoproduct, enzymatic activity, wood-destroying basidiomycetes.

How to cite: Antonov G. I., Senashova V. A., Polyakova G. G., Pashenova N. V., Zhila S. V., Grodnitskaya I. D. Influence of innovative biofertilizers on soil biological activity and undergrowth of Scotch pine after felling and fire // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 4. P. 12–25 (in Russian with English abstract and references).