

УДК 630*114.68:630*43:630*221

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МИКРОБНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПОЧВ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ И РУБОК В СОСНЯКАХ НИЖНЕГО ПРИАНГАРЬЯ

А. В. Богородская, Г. А. Иванова

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

E-mail: anbog@ksc.krasn.ru, gaivanova@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

Рассматривается динамика эколого-микробиологических параметров почв сосняков кустарничково-лишайниково-зеленомошных Нижнего Приангарья после пожаров разной интенсивности и рубок древостоев на начальном этапе (до 10 лет) восстановления растительности. Установлено, что в течение 4-5-летнего послепожарного периода в 2–9 раз снижается содержание микробной биомассы, ее запасов на 20–90 % в верхнем органо-минеральном горизонте иллювиально-железистого песчаного подзола, регистрируется трансформация структуры и численности эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ), причем отмеченных изменений больше после высокоинтенсивных пожаров. Наиболее высокие значения qCO_2 (6.7–27.4 мкг С– CO_2 /(мг $C_{мик}$ · ч)) наблюдаются в течение 4 лет после пожаров с дальнейшей тенденцией их снижения. Максимальные нарушения функциональных параметров микробного продуцирования CO_2 на фоне уменьшения на 20–40 % общих запасов $C_{мик}$, а также высокие значения qCO_2 (5.5–14 мкг С– CO_2 /(мг $C_{мик}$ · ч)) выявлены в почве 2–5-летних вырубок со значительным механическим повреждением подстилки, тогда как в почве 10-летних вырубок на стадии молодняка рассматриваемые параметры микробного продуцирования приближаются к контролю. Восстановительные сукцессии микробного продуцирования иллювиально-железистого песчаного подзола сосняков Нижнего Приангарья в течение 5–8 лет после пожаров высокой интенсивности и рубок сосняков с нарушением почвенно-растительного покрова имели схожие тенденции и направленность, отражая трансформацию гидротермических и трофических условий почв.

Ключевые слова: пожары разной интенсивности, рубки, эколого-трофические группы микроорганизмов, микробная биомасса, базальное дыхание, микробный метаболический коэффициент.

DOI: 10.15372/SJFS20200304

ВВЕДЕНИЕ

Пожары и рубки являются основными факторами, дестабилизирующими лесные экосистемы. Пожары ежегодно охватывают до 30 млн га территории России, причем на лесные экосистемы приходится до 55 % площади (Vivchar, 2011). Во многих лесных районах Сибири происходит быстрое увеличение площадей как законных, так и незаконных рубок (Vandergert, Newell, 2003).

Основные эксплуатационные леса Красноярского края находятся на территории Нижнего Приангарья, где ежегодно проводились промыш-

ленные рубки леса на площади 35 тыс. га, из которых до 700 га пройдены пожарами (Соколов, Втюрина, 2009). Нижнее Приангарье рассматривается как область критического изменения растительного покрова, вызываемого рубками леса (Achard et al., 2006). Кроме того, для данного региона характерны частые засухи, экстремальные пожароопасные сезоны, и ежегодно в среднем 71 тыс. га насаждений охватываются лесными пожарами (Москальченко, 2009).

Пожары в бореальных лесах рассматриваются как естественный природный фактор, влияющий на динамику растительности и ее

продуктивность (Фурьев, 1996), на популяции животных (Ahlgren, 1974), на минеральный и углеродный циклы (Kasischke et al., 1995) и на почвенные биологические процессы (Neary et al., 1999; Certini, 2005; Ginzburg, Steinberger, 2012; Cutler et al., 2017). Прогрев почвы по глубине является основным фактором воздействия огня на ее свойства и микробиоценозы (Díaz-Raviña et al., 1996; Neary et al., 1999).

Сплошная вырубка древостоев резко изменяет экологическую обстановку и лесорастительные условия, что в значительной мере сказывается на интенсивности биологического круговорота веществ, плодородии почв и сукцессионной динамике нарушенных лесов (Marshall, 2000; Иванов, 2005). Воздействие сплошной вырубки леса на почвы приводит к механическому нарушению растительного покрова, подстилки и верхних почвенных горизонтов, уплотнению их лесозаготовительной техникой, резкому увеличению запасов и изменению химического состава растительного опада в результате образования порубочных остатков (Тошева, 1988; Титарев, 2009; Дымов, 2017, 2018; Думов, 2017), трансформации режимов света, тепла, влаги (Краснощек, Сорокин, 1988) и связанной с этим активности функционирования почвенных микробных комплексов (Pietikäinen, Fritze, 1995).

Установлено, что эволюция почвенных свойств зависит от степени повреждения почвы, направленности и скорости восстановительных сукцессий растительности (Иванов, 2005; Certini, 2005; Богородская, 2006; Титарев, 2009; Дымов, 2018).

Для ранней диагностики состояния почв при антропогенных нарушениях и определении критических пределов ее сбалансированного функционирования в настоящее время применяют биологические параметры. Содержание микробной биомассы в почве, ее функциональная активность (базальное дыхание) и структура эколого-трофических групп микроорганизмов являются основными параметрами в экологических исследованиях, в том числе и при различных сценариях антропогенных (техногенных) нарушений (Ананьева, 2003; Anderson, 2003; Стольникова и др., 2011; Stolnikova et al., 2011; Иващенко и др., 2014; Ivashchenko et al., 2014).

Цель исследований – оценка состояния микробных комплексов почв после пожаров разной интенсивности и сплошнолесосечных вырубок на начальном этапе (до 10 лет) восстановления растительности в сосняках Нижнего Приангарья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в сосновых насаждениях южной тайги Нижнего Приангарья (58°35' с. ш. и 98°55' в. д.). По геоморфологическому районированию территория исследования относится к Приангарскому понижению Енисейского кряжа (Козловская, 1971). Климат района резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах –2.0...–2.4 °С. Безморозный период длится в среднем 103 дня. Годовая сумма осадков составляет 320–380 мм (Галахов, 1964).

Экспериментальные насаждения представлены средневозрастными кустарничково-лишайниково-зеленомошными сосняками (10С) полнотой 0.7–0.9, со средним диаметром 25 см и высотой 20 м, III класса бонитета. Подлесок редкий, в видовом составе ива козья *Salix caprea* L., шиповник иглистый *Rosa acicularis* Lindl., спирея средняя *Spiraea media* Schmidt, единично ольха кустарниковая *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus и рябина сибирская *Sorbus aucuparia* subsp. *sibirica* (Hedl.) Krylov.

Напочвенный покров мозаичный, дифференцирован по условиям микросреды и в значительной степени связан с условиями увлажнения. На большей части лесного массива господствовала бруснично-зеленомошно-лишайниковая синюзия. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса от 30–40 до 60–80 %. В видовом составе около 10 видов сосудистых растений, доминируют брусника обыкновенная *Vaccinium vitis-idea* L. и черника обыкновенная *Vaccinium myrtillus* L. с примесью багульника болотного *Ledum palustre* L. и голубики обыкновенной *Vaccinium uliginosum* L. Мохово-лишайниковый покров составляет 80–100 % проективного покрытия. Доминирует плевроциум Шребера *Pleurozium schreberi* (Wild. ex Brid.) Mitt., в примеси дикранум многоножковый *Dicranum polysetum* Sw. и кукушкин лен обыкновенный *Polytrichum commune* Hedw. Из лишайников доминируют кладония оленья *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg. и кладония лесная *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. (Иванова, 2005).

Почва сосняков представлена иллювиально-железистым песчаным подзолом (Шишов и др., 2004) и характеризуется мощным профилем, отчетливо дифференцированным на горизонты: О (0–6 см); Е (7–18 см); Bf1 (19–33 см); Bf2 (34–47 см); Bf2C (48–75 см); С (76 см и глубже).

Почвенно-микробиологические исследования проводили на экспериментальных участках

в сосняках, пройденных в 2002 г. низовыми экспериментальными пожарами средней (уч. № 1) и высокой интенсивности (уч. № 2), подверженных сплошным рубкам в 1999 г. (уч. № 3) и 2005 г. (уч. № 4). Контролем служили исходные кустарничково-лишайниково-зеленомошные сосняки.

Образцы почвы для микробиологического анализа отбирали по горизонтам из прикопок (О – подстилка, глубина которой варьировала от 0.5–1 см после пожаров высокой интенсивности до 6 см в контрольном сосняке; минеральный горизонт Е – 0–10 см). На пробной площади (ПП) 1 и 2 отбор образцов почвы проводили через сутки после экспериментальных пожаров и каждый год в середине вегетационного периода. На ПП 3 и 4 исследования проводили в 2007–2010 гг. Отбор почвенных образцов сопровождался определением влажности почвы (термовесовым методом), температуры почвенных слоев (портативным термометром «Checktemp») и плотности (бур Н. А. Качинского). Для анализов использовали свежие образцы, хранившиеся при +5 °С не более 2–3 нед.

Определяли содержание микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) методом субстрат-индуцированного дыхания и интенсивность базального дыхания (БД) хроматографически (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева, 2003). Подробное описание методик и рабочие параметры хроматографа приведены ранее (Богородская, Кукавская, 2016). Микробный метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$) рассчитывали как отношение скорости базального дыхания к микробной биомассе и выражали в $\text{мкг С} - \text{CO}_2 / (\text{мг } C_{\text{мик}} \cdot \text{ч})$ (Ананьева, 2003).

Рассчитывали запас углерода микробной биомассы $C_{\text{мик}}$ в исследуемых горизонтах почвы с учетом плотности (ρ , г/см^3) и объема почвы в данном горизонте (V , м^3) по формуле $C_{\text{мик}} (\text{г/м}^3) = C_{\text{мик}} (\text{г/г почвы}) \cdot \rho \cdot V$. Расчет микробного продуцирования CO_2 горизонтами почвы проводили по формуле $(\text{мг С} - \text{CO}_2 / (\text{м}^3 \cdot \text{ч})) = \text{БД} (\text{мг/г почвы}) \cdot \rho \cdot V$. Общие запасы $C_{\text{мик}}$ и микробное продуцирование CO_2 почвой рассчитывали суммированием полученных данных подстилки и подзолистого горизонта (О + Е) (Сусьян и др., 2009; Susyan et al., 2009; Стольникова и др., 2011; Stolnikova et al., 2011).

Структуру и численность эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ) изучали по количеству колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 г абсолютно сухой почвы, выросших на разных диагностических средах

(Методы..., 1991): на мясо-пептонном агаре учитывали аммонификаторов, на крахмало-аммиачном агаре – прототрофов, на почвенном голодном агаре – лиготрофов, на сусло-агаре (СА) – микроскопические грибы.

Все определения выполняли в трех повторностях и рассчитывали стандартное отклонение от среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Трансформация структуры ЭКТГМ песчаных подзолов сосняков после пожаров и рубок. Иллювиально-железистые песчаные подзолы характеризуются низким содержанием гумуса (0.5–0.7 %) и доступных форм элементов питания, высокой кислотностью (рН подстилки 3.6–4.4, почвы – 4.8–5.2), широким соотношением С : N (от 21 до 34) и высоким содержанием в опаде трудноразлагаемых органических соединений, что предопределяет их низкую биогенность (Богородская, 2006).

Наибольшая численность гетеротрофных микроорганизмов обнаружена в подстилках сосняков, при переходе к подзолистому горизонту численность КОЕ разных групп микроорганизмов резко снижается, что связано с бедностью этого горизонта органическим веществом (рис. 1).

Пожары независимо от интенсивности приводили к выгоранию травяно-кустарничкового яруса, зеленомошно-лишайникового покрова и частичному сгоранию подстилки, которая максимально прогорала после высокоинтенсивного пожара на уч. № 2 (до 7.7 см с напочвенным покровом), где уже через сутки после пожара в подстилке и горизонте Е песчаного подзола отмечено снижение в 1.5–11.7 раз численности КОЕ всех ЭКТГМ (рис. 1, А). Аналогичные изменения отмечены в подстилке на уч. № 1 после среднеинтенсивного пожара, тогда как в минеральном горизонте количество КОЕ разных групп микроорганизмов снижается незначительно.

Исключение составляют микромицеты, численность КОЕ которых значительно снижается в почве после пожаров как средней, так и высокой интенсивности.

Отмечено, что микромицеты более чувствительны к высоким температурам, чем бактерии (Dunn et al., 1985; Neary et al., 1999; Rutigliano et al., 2007). Летальными температурами для бактерий указываются 120 °С в сухих почвах и 100 °С во влажных, в то время как для грибов –

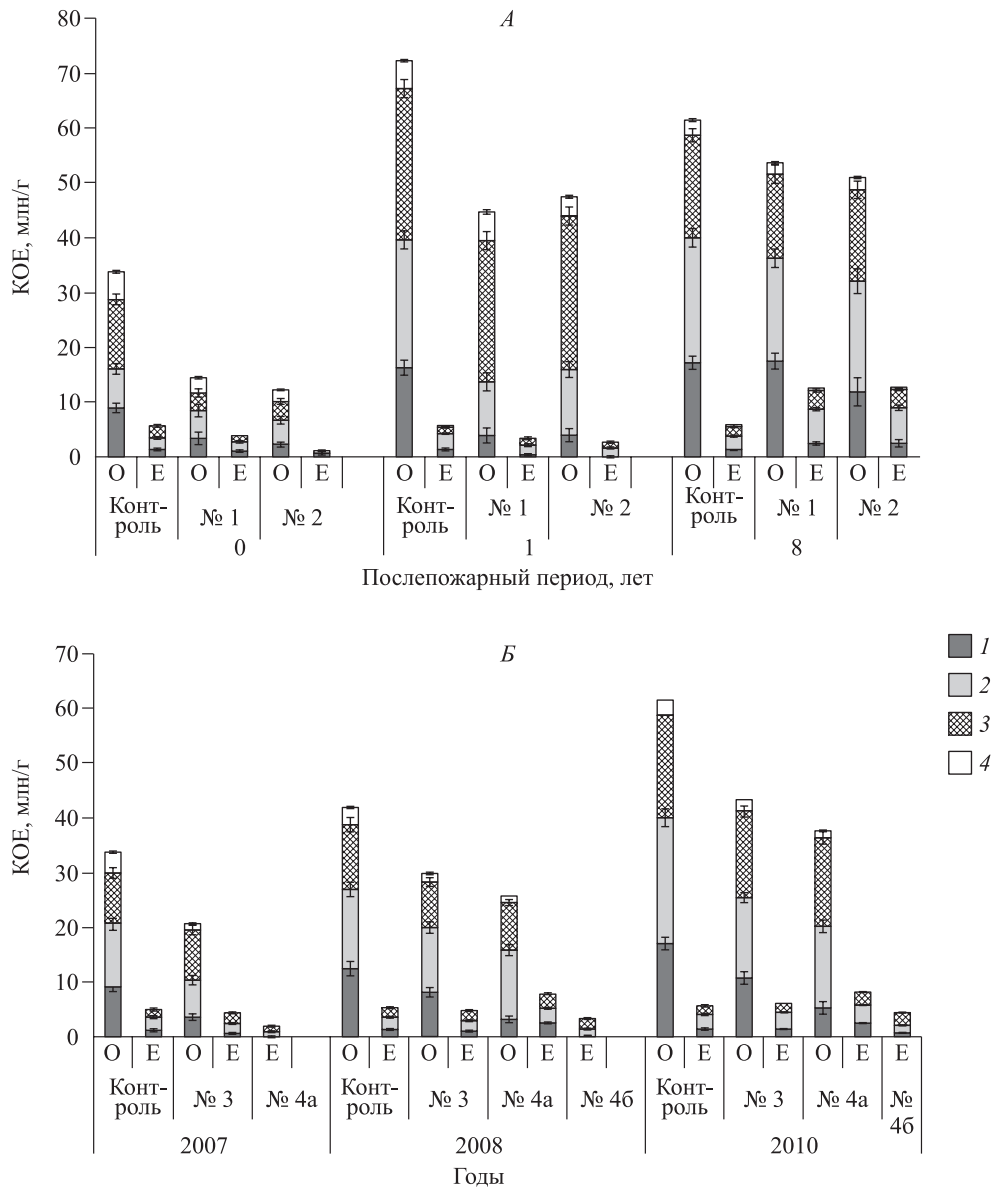


Рис. 1. Динамика численности ЭКТГМ в песчаном подзоле сосняков после пожаров на уч. № 1 – средней, уч. № 2 – высокой интенсивности (А) и на вырубках уч. № 3 – 1999 г., уч. № 4 – 2005 г. (Б) (уч. № 4а и 4б – обозначения в тексте). 1 – аммонификаторы; 2 – прототрофы; 3 – олиготрофы; 4 – грибы.

80 и 60 °С соответственно (Dunn et al., 1985). Основные причины сокращения микромицетов после воздействия высоких температур – изменение качества органического вещества почвы наряду с поступлением в почву токсичных продуктов горения (Vååth et al., 1995; Pietikäinen, Fritze, 1995).

Через год после пожаров отмечают слабое возобновление напочвенного покрова и значительный отпад деревьев, который максимален на уч. № 2 после пожара высокой интенсивности. В подстилках на обоих участках численность аммонификаторов снижена в 4 раза и более, прототрофов – в 2–2.5 раза, тогда как олиготро-

фов сравнима с контролем. В минеральном горизонте Е численность КОЕ аммонификаторов и грибов заметно ниже контроля, особенно после высокоинтенсивного пожара (см. рис. 1, А). В почве после пожаров доминируют микроорганизмы, использующие минеральный азот вследствие обогащения почвы зольными элементами и азотом, а увеличение соотношения олиготрофы/аммонификаторы позволяет судить о повышении олиготрофности почвы.

Через 8 лет после пожаров на участках проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса не превышает 30 %, мохово-лишайникового покрова – 4–6 %, в местах наибольшего

прогорания доминирует бруснично-вейниковая ассоциация, появляется в большом количестве светолюбивый майник двулистный *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt. На 8-й год после пожаров численность ЭКТГМ в подстилках сравнима с контролем за исключением количества аммонификаторов на уч. № 2 и превышает таковую в подзолистом горизонте (см. рис. 1, А). Повышение численности ЭКТГМ в почве через 8 лет после пожаров является отражением качественного изменения органического вещества за счет поступления травянистого опада, хвои и коры погибших деревьев. Смена мохового покрова на травянистый предопределяет переход бактериального сообщества от олиго- к копиотрофной стратегии жизнеобеспечения, предполагая улучшение условий роста микробных популяций в течение 20–30 лет после пожаров (Cutler et al., 2017).

На вырубке 1999 г. (уч. № 3), проведенной в зимний период, через 8 лет сформировался сосновый молодняк лишайниковый с большой долей участия в составе березы. Возобновление сосны, сохранившейся после рубки и вновь появившейся после нее, – более 6 тыс. шт./га. Общее проективное покрытие лишайника – 60 %, доминирует кладония оленья, в примеси кладония звездчатая *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает брусника обыкновенная, единично – кипрей узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. Покрытие порубочными остатками не более 20 %. Механическая минерализация (участки без подстилки) отсутствует. Мощность подстилки с напочвенным покровом достигает 5 см.

На вырубке 2005 г. (уч. № 4), проведенной в летний период с нарушением почвенно-растительного покрова, через 2 года подстилка встречается фрагментарно, не более 5–10 % от площади участка, отмечается перемешивание верхних почвенных слоев. Механическая минерализованность поверхности составляет более 90 %. Покрытие участка порубочными остатками 70 %. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса около 5 %, доминируют вейник тростниковый *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth. и брусника обыкновенная. В малонарушенных зонах участка отмечаются остатки лишайникового покрова из кладоний лесной, оленьей и звездчатой. Послерубочное возобновление сосны удовлетворительное – 3 тыс. шт./га. На уч. № 4 выделены зоны по степени нарушения почвенного покрова: № 4а – минераль-

ный слой почвы под порубочными остатками и остатки подстилки; № 4б – механически минерализованные участки (без подстилки). Вторичные сукцессии почв механически нарушенных участков вырубке относят к турбогенным, при которых максимально трансформируются верхние органо-минеральные горизонты почв, переуплотняются и перемешиваются подстилки и порубочные остатки (Тощева, 1988; Дымов, 2018).

Численность микроорганизмов в почве вырубке заметно снижена по сравнению с контролем (см. рис. 1, Б). В подстилке и подзолистом горизонте 8-летней вырубке (уч. № 3), представленной несомкнутым молодняком, численность аммонификаторов, прототрофов и грибов в 1.5–3 раза ниже контроля, при этом возрастает олиготрофность почвы. Через год здесь отмечена тенденция к восстановлению структуры и численности ЭКТГМ, которая на 11-й год после рубки выше контроля в подзолистом горизонте и несколько снижена в подстилке, что связано с меньшей влажностью подстилки вырубке.

На вырубке (уч. № 4) отмечены максимальные количественные и структурные изменения микробных комплексов. Через 2–3 года после рубки в оставшейся подстилке и на минерализованных участках песчаного подзола численность аммонификаторов и грибов, чувствительных к содержанию доступного органического вещества, снижена в 3–5 раз, доминируют олиготрофы. Под порубочными остатками численность ЭКТГМ заметно снизилась через 2 года после рубки в 2007 г. и значительно возросла в 2008–2010 гг., что связано с активизацией гетеротрофной микрофлоры при разложении органического вещества порубочных остатков.

Изменения функциональных показателей ($C_{\text{мик}}$, БД, $q\text{CO}_2$) микробоценозов почв после пожаров и рубок сосняков. Содержание $C_{\text{мик}}$ в подстилке кустарничково-лишайниково-зеленомошных сосняков Нижнего Приангарья достигало 1100–1800 мкг С/г и снижалось до 130–250 мкг С/г в подзолистом горизонте, тогда как скорость БД варьировала в пределах 6.5–7.7 и 0.45–0.7 мкг С–CO₂/(г · ч) соответственно для органического и верхнего 0–10 см минерального горизонта песчаного подзола (рис. 2).

Годовая динамика определялась гидротермическими условиями почвы на момент отбора почвенных образцов в середине вегетационного периода (Богородская, 2006). Отмечена тесная корреляция рассматриваемых показателей с

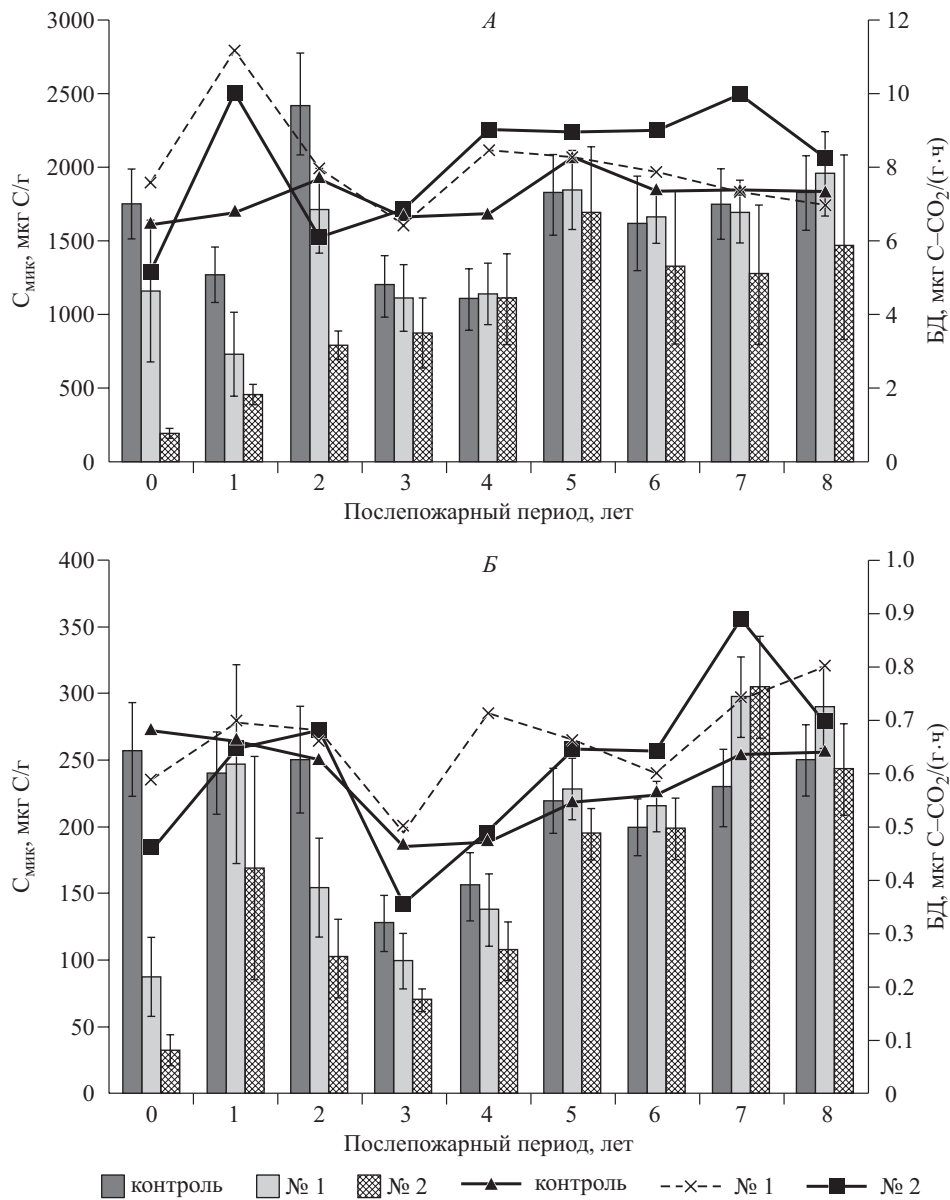


Рис. 2. Динамика содержания углерода микробной биомассы (диаграммы) и интенсивности базального дыхания (графики) в подстилке (А) и подзолистом горизонте (Б) песчаного подзола после пожаров на уч. № 1 – средней и уч. № 2 – высокой интенсивности в южнотаежных сосняках.

температурой почвенных горизонтов ($R = 0.88-0.92$) и их влажностью ($R = 0.72-0.87$).

Микробиологические процессы в песчаном подзоле изучаемых сосняков достаточно сбалансированы, поскольку содержание $C_{\text{мик}}$ коррелировало со скоростью БД в подстилке ($R = 0.61$ при $P = 0.05$) и в подзолистом горизонте ($R = 0.94$ при $P = 0.05$).

Максимальное снижение содержания $C_{\text{мик}}$ отмечено через сутки после пожара высокой интенсивности (уч. № 2): в подстилке и подзолистом горизонте она составляла 188 и 35 мкг С/г, что в 8–9 раз ниже контроля (см. рис. 2). Интен-

сивность БД сразу после пожаров снижалась незначительно или даже повышалась в подстилке после среднеинтенсивного пожара (уч. № 1). Через год после пожаров в подстилке содержание $C_{\text{мик}}$ снижено в 1.7–3 раза по сравнению с контролем, тогда как интенсивность БД выше контроля на 50–65 %. В подзолистом горизонте содержание $C_{\text{мик}}$ снижено в 1.5 раза после высокоинтенсивного пожара и несколько выше контроля после среднеинтенсивного, тогда как интенсивность БД сравнима с контролем. В течение дальнейших двух послепожарных лет в подстилке уровень микробной биомассы ниже

контроля, особенно после высокоинтенсивного пожара. Через 4 года после пожаров отмечена тенденция восстановления содержания $C_{\text{мик}}$ до контрольного уровня на обоих участках, тогда как с 5-го по 8-й послепожарные годы на уч. № 2 уровень $C_{\text{мик}}$ остается ниже контроля на 10–30 %, при этом вариабельность показателя высокая, что объясняется микросинузиальностью напочвенного покрова при зарастании гари. В минеральном горизонте песчаного подзола уровень $C_{\text{мик}}$ восстанавливается до контрольного через 4–5 лет после пожаров.

Динамика интенсивности БД как в подстилке, так и горизонте Е с 4-го послепожарного года на уч. № 2 остается выше контроля, тогда как после среднеинтенсивного пожара в подстилке достигает уровня контроля через 5 лет, а в минеральном горизонте также несколько выше контроля на протяжении 8 лет после пожара.

Воздействие высоких температур, развивающихся при горении (до 1000 °С в подстилке при пожаре высокой интенсивности), наряду со снижением уровня влажности, а также количественными и качественными преобразованиями органического вещества почвы называются причинами послепожарного снижения $C_{\text{мик}}$ (Fritze et al., 1993; Pietikäinen, Fritze, 1995; Ginzburg, Steinberger, 2012). Увеличение скорости микробного дыхания связывают с минерализацией пирогенного органического вещества (растительных и микробных остатков) и миграцией их по почвенному профилю в минеральные горизонты (Fritze et al., 1993; Bååth et al., 1995; Fierro et al., 2007). Мертвые корни сгоревшей растительности являются дополнительным легкоминерализуемым субстратом почвенных микроорганизмов, что в первые годы после пожаров обуславливает высокую интенсивность базального дыхания почв (Wüthrich et al., 2002).

Значительное повышение значений микробного метаболического коэффициента наблюдается в подстилке и подзолистом горизонте уже через сутки после пожаров: на уч. № 2 превышает контроль в 7.5–5 раз, на уч. № 1 – в 2–2.5 раза (см. рис. 2). Через год после пожаров в подстилке значения $q\text{CO}_2$ в 3–4 раза превышают контроль на обоих участках и на 40 % – на уч. № 2 в горизонте Е. В течение 4 лет после пожаров уровень $q\text{CO}_2$ выше контроля в органическом и минеральном горизонте песчаного подзола, с 5-го года после пожара средней интенсивности он сравним с контролем. После высокоинтенсивного пожара в подстилке $q\text{CO}_2$ на 20–85 % превышает контроль в течение всего наблюдаемого

послепожарного периода, тогда как в горизонте Е сравним с контролем уже на 5-й год.

Высокий уровень $q\text{CO}_2$ после пожаров связан с увеличением интенсивности микробного дыхания и отмиранием микробной биомассы, что, в свою очередь, может указывать на потерю углерода почвой (Fritze et al., 1993; Pietikäinen, Fritze, 1995; Wüthrich et al., 2002). Наиболее высокие значения $q\text{CO}_2$ наблюдаются в почве после пожаров высокой интенсивности, когда нарушения экофизиологического состояния микроорганизмов увеличиваются из-за воздействия высоких температур, при которых происходит максимальная потеря $C_{\text{мик}}$. Длительность периода восстановления уровня $q\text{CO}_2$ также дольше вследствие изменения качества почвенного органического вещества (Anderson, 2003). Более того, $q\text{CO}_2$ может в определенной степени характеризовать экологическую стратегию почвенных микроорганизмов. Его высокое значение отмечено для быстрорастущих *r*-стратегов, менее эффективных в использовании углерода и требующих высоких энергетических затрат на поддержание биомассы (Anderson, Domsch, 1993). Дальнейшее послепожарное сукцессионное развитие микробоценозов направлено на преобладание медленно растущих *K*-стратегов, полнее усваивающих субстрат. В итоге энергетический баланс системы выравнивается, что отражается на снижении значений $q\text{CO}_2$ (Fritze et al., 1993).

Динамика параметров функциональной активности микробоценозов почв вырубок представлена на рис. 3.

В подстилке 8-летней вырубке (уч. № 3) в 2007 г. содержание $C_{\text{мик}}$ ниже контроля почти в 2 раза, тогда как скорость БД почти на 20 % выше контроля. В течение дальнейших 3 лет отмечена тенденция постепенного восстановления $C_{\text{мик}}$ до уровня контроля, тогда как интенсивность БД оставалась почти в 2 раза выше. В минеральном слое почвы на этой вырубке содержание $C_{\text{мик}}$ сравнимо с контролем почти во все годы исследований, а интенсивность БД несколько выше контроля.

На 2-летней вырубке (уч. № 4) отмечены максимальные изменения функциональной активности микрофлоры. В оставшейся подстилке $C_{\text{мик}}$ снижено в 2 раза на протяжении 3 лет, а интенсивность БД имеет тенденцию к росту с возрастом вырубке до 11.7 мкг $\text{C}-\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$, что на 60 % выше контроля. В минеральном слое почвы под порубочными остатками $C_{\text{мик}}$ и БД значительно превышают контроль в течение

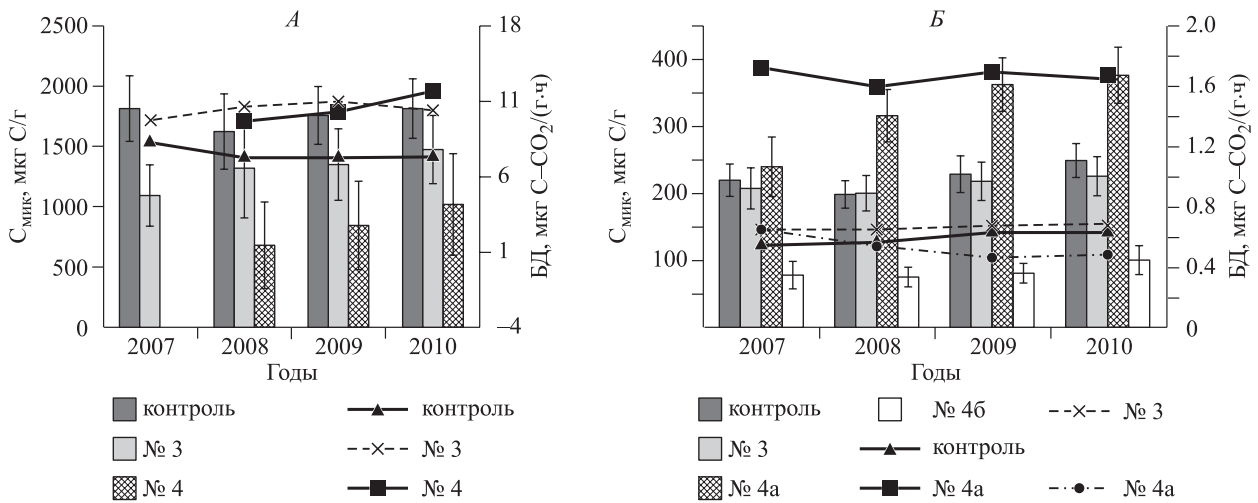


Рис. 3. Динамика содержания углерода микробной биомассы (диаграммы) и интенсивности базального дыхания (графики) в подстилке (А) и подзолистом горизонте (Б) песчаного подзола на вырубках уч. № 3 – 1999 г. и уч. № 4 – 2005 г.

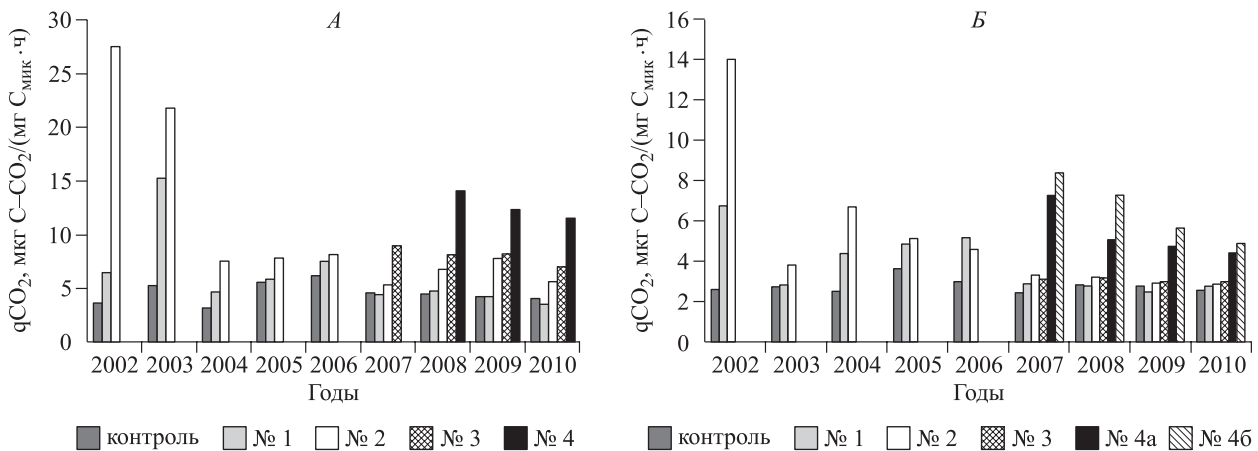


Рис. 4. Годовая динамика микробного метаболического коэффициента в подстилке (А) и подзолистом горизонте (Б) песчаного подзола после пожаров на уч. № 1 – средней, уч. № 2 – высокой интенсивности и на вырубках уч. № 3 – 1999 г. и уч. № 4 – 2005 г.

4 лет, тогда как на минерализованных участках $C_{\text{мик}}$ снижено в 1.5–2.5 раза, а интенсивность БД оставалась на уровне контроля.

Повышение значений qCO_2 в 2–3.5 раза наблюдалось в течение 5-летнего периода только в почве вырубке с механической минерализованностью подстилки (уч. № 4) (рис. 4).

Нарушение структуры почвы при проведении рубки, трансформации гидротермических и трофических условий почвы вследствие удаления древостоя является стрессом для микробценоза и изменяет его экофизиологический статус (Våth et al, 1995; Pietikäinen, Fritze, 1995). Микробценоз почвы 8–11-летней вырубке на стадии молодняка (уч. № 3) не испытывал значительных нарушений гомеостатического состояния: незначительное повышение значений qCO_2 отмечено только в подстилке (см. рис. 4).

Отмеченные изменения в почвенном микробном комплексе иллювиально-железистого песчаного подзола после пожаров разной интенсивности в сосняках Нижнего Приангарья сопоставимы с аналогичными изменениями в лишайниково-зеленомошных сосняках Средней Сибири (Богородская, 2006).

Вместе с тем степень трансформации эколого-функциональных параметров микробценозов и период их восстановления на 2–5-летней вырубке с нарушением почвенно-растительного покрова выше в сравнении с сукцессиями микробных комплексов в дерново-подзолистых почвах на вырубках пихтарников Енисейского края, где уже на травянистой стадии функциональные параметры микробценоза превышали контроль (Богородская, Шишкин, 2020; Bogorodskaya, Shishikin, 2020).

Динамика запасов углерода микробной биомассы и микробного продуцирования CO_2 в горизонтах *O* и *E* песчаного подзола после пожаров и на вырубках. Запас микробной биомассы в подстилке песчаного подзола контрольного лишайниково-зеленомошного сосняка невелик ($4.3\text{--}7.1 \text{ г/м}^3$), и на него приходится в разные годы исследований 17–21 % от общего запаса на горизонты *O* + *E* (рис. 5, 6).

Максимум микробного продуцирования CO_2 приходится также на подзолистый горизонт ($66\text{--}95 \text{ мг С-CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$), что составляет 70–80 % от общего продуцирования на горизонты *O* + *E*.

Полученные данные по запасам микробной биомассы и продуцированию CO_2 песчаным подзолом кустарничково-лишайниково-зеленомошных сосняков значительно ниже, чем в почвах южно- и среднетаежных лесов Европейской России (Сусьян и др., 2009; Susyan et al., 2009; Стольников и др., 2011; Stolnikova et al., 2011) и в 2–10 раз ниже запасов $S_{\text{мик}}$ в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв лиственных

и светлохвойных насаждений Средней Сибири (Богородская, Кукавская, 2016) и дерново-подзолистых почв пихтарников Енисейского края (Богородская, Шишкин, 2020; Bogorodskaya, Shishikin, 2020).

После пожаров происходит трансформация профильного распределения запасов $S_{\text{мик}}$ и микробной продукции углекислого газа (рис. 5). Сразу после пожаров общий запас $S_{\text{мик}}$ снижается в 3–8 раз, а микробная продукция CO_2 – на 20–35 % от контроля. Через год после среднеинтенсивного пожара общий запас $S_{\text{мик}}$ сравним с контролем, тогда как после высокоинтенсивного – в 1.5 раза ниже контроля. В дальнейшие 3 года после пожаров общий запас $S_{\text{мик}}$ ниже контроля на 20–65 %. Начиная с 5-го года после пожара средней интенсивности уровень запаса $S_{\text{мик}}$ достигает контроля или даже несколько превышает его.

После пожара высокой интенсивности общий запас $S_{\text{мик}}$ даже через 8 лет на 17 % ниже контроля (34.9 г/м^3). Максимальное снижение

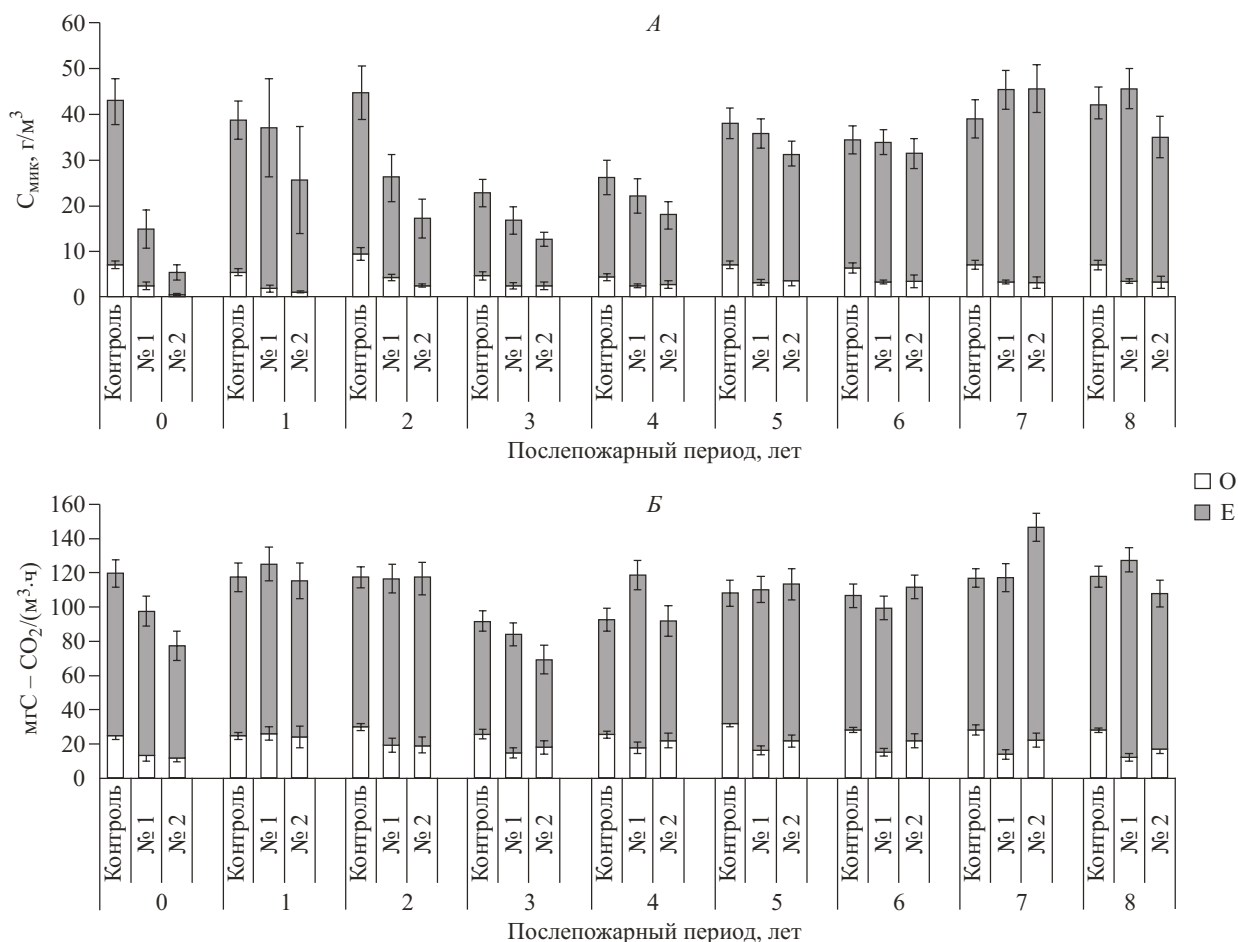


Рис. 5. Динамика запасов углерода микробной биомассы (А) и микробного продуцирования CO_2 (Б) в подстилке и подзолистом горизонте песчаного подзола после пожаров на уч. № 1 – средней и № 2 – высокой интенсивности в южнотаежных сосняках.

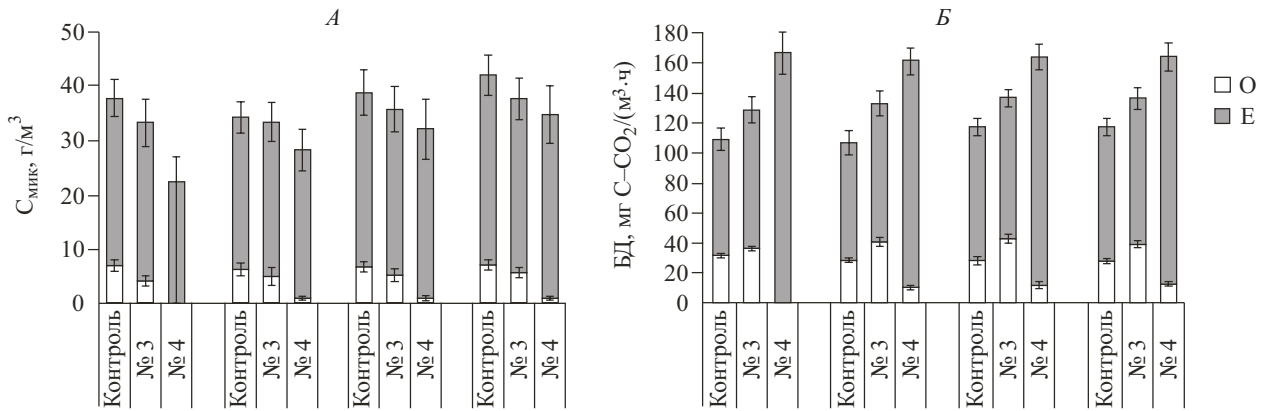


Рис. 6. Динамика запасов углерода микробной биомассы (А) и микробного продуцирования CO₂ (Б) в подстилке и подзолистом горизонте песчаного подзола на вырубках уч. № 3 – 1999 г. и уч. № 4 – 2005 г. в южнотаежных сосняках.

запаса C_{мик} во все послепожарные годы наблюдается в подстилке, при этом снижается ее долевое участие в общих запасах на горизонтах О + Е.

Послепожарная динамика общего микробного продуцирования CO₂ изменяется незначительно: в некоторые годы ее уровень несколько снижен или превышает контроль, при этом вклад подстилки в общее продуцирование CO₂ горизонтами О + Е ниже контрольного на протяжении 8 лет после пожаров.

Таким образом, после среднеинтенсивного пожара в течение 4 лет снижен общий запас C_{мик}, который не восстанавливается до уровня контроля и на 8-й год после пожара высокой интенсивности, при этом общее микробное продуцирование CO₂ горизонтами О + Е песчаного подзола снижается незначительно, либо увеличивается, что отражает преобладание минерализационных процессов в почвах, и экосистема сосняков кустарничково-лишайниково-зеленомошных становится источником углерода в атмосферу (Кукавская, 2009).

На 2-летней вырубке (уч. № 4) общий запас C_{мик} достоверно снижен на 40 %, с возрастом вырубке запасы C_{мик} возрастают, при этом остаются ниже контроля на 20 % (рис. 6). Вклад подстилки в общие запасы C_{мик} на горизонтах О + Е снижается до 0–3 %, что связано со значительным механическим повреждением подстилки. Общее микробное продуцирование CO₂ на этой вырубке выше контроля на 54–40 %, что свидетельствует об увеличении минерализационного потока и потере углерода почвами нарушенных вырубков. Известно, что почвы антропогенно- и техногенно-преобразованных экосистем вносят весомый эмиссионный вклад

CO₂ в атмосферу, причем увеличение площади нарушенных лесных ценозов, в том числе вырубками, обеспечивает существенную долю потоков почвенных эмиссий углекислого газа (Yan et al., 2003; Иващенко и др., 2014; Ivashchenko et al., 2014). Отмеченные тенденции снижения общих запасов C_{мик} и повышения микробного продуцирования CO₂ характерны для почвы 8-летней вырубке (уч. № 3), при этом они незначительны и к 11-летнему возрасту вырубке приближаются к контролю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 4–5 лет после пожаров в кустарничково-лишайниково-зеленомошных сосняках Нижнего Приангарья регистрируются снижение содержания микробной биомассы в 2–9 раз, ее запасы на 20–90 % в верхнем органо-минеральном горизонте иллювиально-железистого песчаного подзола, трансформация структуры и численности эколого-трофических групп микроорганизмов, причем отмеченные изменения больше после высокоинтенсивных пожаров. Повышение значений микробного метаболического коэффициента в 2–7.5 раз наблюдается как сразу, так и в течение 4 лет после пожаров с тенденцией снижения его значений. Значения qCO₂ достигают контроля через 5 лет после пожаров в подзолистом горизонте и в подстилке после среднеинтенсивного пожара, тогда как в подстилке после высокоинтенсивного пожара qCO₂ выше контроля на 20–85 % в течение 8 лет. Высокий уровень qCO₂ после пожаров связан с увеличением интенсивности микробного дыхания, что отражает изменение экологических стратегий почвенного микробоценоза в сторону

повышения энергетических затрат на поддержание биомассы и является следствием изменения качества органического вещества и гидротермических условий почв.

Значительные нарушения функциональных параметров микробоценоза, снижение численности и структурные изменения ЭКТГМ, повышение на 54–40 % микробного продуцирования CO₂ на фоне уменьшения на 20–40 % общих запасов C_{микр}, а также снижение устойчивости микробного комплекса почв, выраженное в высоких значениях qCO₂, отмечены в почве 2–5-летних вырубок со значительным механическим повреждением подстилки, тогда как в почве 8–10-летней рубки на стадии молодняка с сохранением структуры почвенно-растительного покрова изменения не столь значительны и приближаются к контролю.

В течение 5–8 лет после пожаров высокой интенсивности и рубок сосняков с нарушением почвенно-растительного покрова наблюдались схожие тенденции динамики микробоценозов иллювиально-железистого песчаного подзола: повышение микробной продукции CO₂ почвами, сопровождаемое снижением общих запасов C_{микр}, трансформация структуры и численности ЭКТГМ и высокие значения микробного метаболического коэффициента, превышающие контроль в 2–7.5 раз, что свидетельствует о схожих темпах и направленности восстановительных сукцессий микробоценозов сосняков Нижнего Приангарья после воздействия значительных по силе факторов, дестабилизирующих лесные экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Ананьева Н. Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с. [*Ananyeva N. D.* Mikrobiologicheskie aspekty samoochishcheniya i ustoychivosti pochv (Microbiological aspects of self-cleaning and soil stability). Moscow: Nauka, 2003. 222 p. (in Russian)].
- Богородская А. В.* Влияние пожаров на микробные комплексы почв сосновых лесов Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2006. 21 с. [*Bogorodskaya A. V.* Vliyaniye pozharov na mikrobnnye komplekсы pochv sosnovykh lesov Sredney Sibiri: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk (The effect of fires on microbial complexes of soils in pine forests of the Central Siberia: cand. biol. sci. (PhD) thesis). Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Inst. For., Rus. Acad. Sci., Sib. Br., 2006. 21 p. (in Russian)].
- Богородская А. В., Кукавская Е. А.* Состояние микробных сообществ в почвах лиственных и светлохвойных лесов Средней Сибири после рубок и пожаров // Лесоведение. 2016. № 5. С. 383–396 [*Bogorodskaya A. V., Kukavskaya E. A.* Sostoyaniye mikrobnnykh soobshchestv v pochvakh listvennykh i svetlokhvoynnykh lesov Sredney Sibiri posle rubok i pozharov (The state of microbial communities in the soil of deciduous and light coniferous forests of the Central Siberia after felling and fires) // Lesovedeniye (Rus. J. For. Sci.). 2016. N. 5. P. 383–396 (in Russian with English abstract)].
- Богородская А. В., Шишикин А. С.* Динамика микробной биомассы, ее структура и функциональная активность в почвах при лесовозобновлении на вырубках пихтарников Енисейского кряжа // Почвоведение. 2020. № 1. С. 119–130 [*Bogorodskaya A. V., Shishikin A. S.* Dinamika mikrobnnoy biomassy, ee struktura i funktsionalnaya aktivnost v pochvakh pri lesovozobnovlenii na vyrubkakh pikhtarnikov Eniseyskogo kryazha (Dynamics of microbial biomass, its structure and functional activity in soils of restored felled areas in fir forests of the Yenisei Ridge) // Pochvovedeniye (Soil Sci.). 2020. N. 1. P. 119–130 (in Russian with English abstract)].
- Галахов Н. Г.* Климат // Средняя Сибирь. М.: Наука, 1964. С. 83–98 [*Galakhov N. G.* Klimat (Climate) // Srednyaya Sibir (The Central Siberia). Moscow: Nauka, 1964. P. 83–98 (in Russian)].
- Дымов А. А.* Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798 [*Dymov A. A.* Vliyanie sploshnykh rubok v borealnykh lesakh Rossii na pochvy (obzor) (The effect of clear-cutting in the boreal forests of Russia on soils: A review) // Pochvovedeniye (Soil Sci.) 2017. N. 7. P. 787–798 (in Russian with English abstract)].
- Дымов А. А.* Почвы механически нарушенных участков лесосек средней тайги Республики Коми // Лесоведение. 2018. № 2. С. 130–142 [*Dymov A. A.* Pochvy mekhanicheskii narushennykh uchastkov lesosек sredney taygi Respubliki Komi (Soils of mechanically disturbed sites at cuttings in middle taiga in the Republic of Komi) // Lesovedeniye (Rus. J. For. Sci.). 2018. N. 2. P. 130–142 (in Russian with English abstract)].
- Иванов В. В.* Экологические последствия механизированных лесозаготовок в южной тайге Красноярского края // Лесоведение. 2005. № 2. С. 3–8 [*Ivanov V. V.* Ekologicheskie posledstviya mekhanizirovannykh lesozagotovok v yuzhnoy tayge Krasnoyarskogo kraya (Ecological consequences of mechanized logging operations in southern taiga of Krasnoyarsk Krai) // Lesovedeniye (Rus. J. For. Sci.). 2005. N. 2. P. 3–8 (in Russian with English abstract)].
- Иванова Г. А.* Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.03. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. 40 с. [*Ivanova G. A.* Zonalno-ekologicheskie osobennosti lesnykh pozharov v sosnyakakh Sredney Sibiri: avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk: 06.03.03 (Zonal-ecological specifics of forest fires in pine forests of the Central Siberia: doct. biol. sci. (DSc) thesis). Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Inst. For., Rus. Acad. Sci., Sib. Br., 2005. 40 p. (in Russian)].
- Иващенко К. В., Ананьева Н. Д., Васенев В. И., Кудяров В. Н., Валентини П.* Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088

- [*Ivashchenko K. V., Ananyeva N. D., Vasenev V. I., Kuddeyarov V. N., Valentini R.* Biomassa i dykhatelnaya aktivnost pochvennykh mikroorganizmov v antropogennno-izmenennykh ekosistemakh (Moskovskaya Oblast) (Biomass and respiratory activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (Moscow region)) // *Pochvovedenie (Soil Sci.)* 2014. N. 9. P. 1077–1088 (in Russian with English abstract)].
- Козловская С. Ф.* Енисейский кряж // Плоскогорья и низменности Восточной Сибири. М.: Наука, 1971. С. 46–53. [*Kozlovskaya S. F.* Yeniseyskiy kryazh (Yenisei Ridge) // *Ploskogorya i nizmennosti Vostochnoy Sibiri (Highlands and lowlands of the Eastern Siberia)*. Moscow: Nauka, 1971. P. 46–53 (in Russian)].
- Краснощечков Ю. Н., Сорокин Н. Д.* Почвенно-экологические изменения на вырубках и горях Восточного Хэнтэя (МНР) // *Почвоведение*. 1988. № 1. С. 117–127 [*Krasnoshchekov Yu. N., Sorokin N. D.* Pochvenno-ekologicheskie izmeneniya na vyrubkakh i garyakh Vostochnogo Khenteya (MNR) (Soil and environmental changes in clearings and burnt areas of the East Khentei (MPR)) // *Pochvovedenie (Soil Sci.)* 1988. N. 1. P. 117–127 (in Russian with English abstract)].
- Кукавская Е. А.* Воздействие лесных пожаров на баланс углерода среднетаежных сосняков Енисейской равнины: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.03.03. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2009. 19 с. [*Kukavskaya E. A.* Vozdeystvie lesnykh pozharov na balans ugleroda srednetazhnykh sosnyakov Eniseyskoy ravniny: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 06.03.03 (Influence of forest fires on carbon balance of middle taiga pine forests of the Yenisei plain: cand. biol. sci. (PhD) thesis). Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Inst. For., Rus. Acad. Sci., Sib. Br., 2009. 19 p. (in Russian)].
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с. [*Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii / Pod red. D. G. Zvyagintseva (Methods of soil microbiology and biochemistry / D. G. Zvyagintsev (Ed.))*. Moscow: Moscow St. Univ. Publ., 1991. 304 p. (in Russian)].
- Москальченко С. А.* Пожарная опасность и возобновление на нарушенных лесных территориях Нижнего Приангарья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2009. 21 с. [*Moskalchenko S. A.* Pozharnaya opasnost i vozobnovlenie na narushennykh lesnykh territoriyakh Nizhnego Priangarya: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk: 06.03.03 (Fire hazard and renewal on disturbed forest territories of the Lower Priangar'e: cand. agr. sci. (PhD) thesis). Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Inst. For., Rus. Acad. Sci., Sib. Br., 2009. 21 p. (in Russian)].
- Соколов В. А., Втюрина О. П.* Стратегия освоения лесов Красноярского края // Сб. мат-лов V Междунар. выставки и науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апр., 2009 г., Новосибирск. Т. 3. № 2. Новосибирск: СГГА, 2009. С. 41–44 [*Sokolov V. A., Vtyurina O. P.* Strategiya osvoeniya lesov Krasnoyarskogo kraia (The developing strategy of the Krasnoyarsk Krai forests) // *Sb. mat-lov V Mezhdunar. vystavki i nauch. kongr. «GEO-Sibir-2009»*, 20–24 apr., 2009 g., Novosibirsk (Proc. V Int. Expo. Sci. Congr. «GEO-Siberia-2009»), 20–24 Apr., 2009, Novosibirsk). V. 3. N. 2. Novosibirsk: SGGA (Sib. St. Geodes. Acad.), 2009. P. 41–44 (in Russian with English abstract)].
- Стольников Е. В., Ананьева Н. Д., Чернова О. В.* Микробная биомасса, ее активность и структура в почвах старовозрастных лесов европейской территории России // *Почвоведение*. 2011. № 4. С. 479–494 [*Stolnikova E. V., Ananyeva N. D., Chernova O. V.* Mikrobnaya biomassa, ee aktivnost i struktura v pochvakh starovozrastnykh lesov evropeyskoy territorii Rossii (Microbial biomass, its activity and structure in the soils of old-growth forests of the European territory of Russia) // *Pochvovedenie (Soil Sci.)*. 2011. N. 4. P. 479–494 (in Russian with English abstract)].
- Сусьян Е. А., Ананьева Н. Д., Гавриленко Е. Г., Чернова О. В., Бобровский М. В.* Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв южной тайги // *Почвоведение*. 2009. № 10. С. 1233–1240 [*Susyan E. A., Ananyeva N. D., Gavrilenko E. G., Chernova O. V., Bobrovskii M. V.* Uglerod mikrobnoy biomassy v profile lesnykh pochv yuzhnoy taygi (Microbial biomass carbon in the profiles of forest soils of the southern taiga) // *Pochvovedenie (Soil Sci.)* 2009. N. 10. P. 1233–1240 (in Russian with English abstract)].
- Титарев Р. П.* Особенности восстановления почвенных свойств и растительности на сплошных вырубках в подзоне южной тайги (на примере Боровинского лесничества Калужской области): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27; 03.00.16. М.: МГУ, 2009. 26 с. [*Titarev R. P.* Osobennosti vosstanovleniya pochvennykh svoystv i rastitel'nosti na sploshnykh vyrubkakh v podzone yuzhnoy taygi (na primere Borovinskoy lesnichestva Kaluzhskoy oblasti): avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. (Features of restoration of soil properties and vegetation on clear-cuts in the subzone of the southern taiga (on the example of the Borovinskiy forestry district in Kaluga Oblast): cand. biol. sci. (PhD) thesis). Moscow: Moscow St. Univ., 2009. 26 p. (in Russian)].
- Тошчева Г. П.* Изменение почвенного покрова на вырубках ельников южной тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. М.: МГУ, 1988. 24 с. [*Toshcheva G. P.* Izmenenie pochvennogo pokrova na vyrubkakh el'nikov yuzhnoy taygi: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk (Change in soil cover on felling areas of spruce forests of the southern taiga: cand. biol. sci. (PhD) thesis). Moscow: Moscow St. Univ., 1988. 24 p. (in Russian)].
- Фуряев В. В.* Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. 253 с. [*Furyaev V. V.* Rol pozharov v protsesse lesoobrazovaniya (The role of fires in the forestation process). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 1996. 253 p. (in Russian)].
- Шишов Л. С., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с. [*Shishov L. S., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I.* Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii (Classification and diagnostics of Russian soils). Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p. (in Russian)].
- Achard F., Mollicone D., Stibig H.-J., Aksenov D., Laestadius L., Li Z., Popatov P., Yaroshenko A.* Areas of rapid forest-cover change in boreal Eurasia // *For. Ecol. Manag.* 2006. V. 237. Iss. 1–3. P. 322–334.
- Ahlgren I. F.* The effects of fire on soil organisms // *Fire and ecosystems*. Acad. Press, 1974. P. 47–72.

- Anderson J. P. E., Domsch K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biol. Biochem.* 1978. V. 10. Iss. 3. P. 215–221.
- Anderson T.-H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality // *Agr. Ecosyst. Environ.* 2003. V. 98. Iss. 1–3. P. 285–293.
- Anderson T.-H., Domsch K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V. 25. Iss. 3. P. 393–395.
- Bååth E., Frostegård Å., Pennanen T., Fritze H. Microbial community structure and pH response in relation to soil organic matter quality in wood-ash fertilized, clear-cut or burned coniferous forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 1995. V. 27. Iss. 2. P. 229–240.
- Bogorodskaya A. V., Shishikin A. S. Dynamics, structure, and functional activity of microbial biomass in soils of restoring felled areas in fir forests of the Yenisei Ridge // *Euras. Soil. Sci.* 2020. V. 53. Iss. 1. P. 126–136 (Original Rus. text © A. V. Bogorodskaya, A. S. Shishikin, 2020, publ. in *Pochvovedenie*. 2020. N. 1. P. 119–130).
- Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia*. 2005. V. 143. Iss. 1. P. 1–10.
- Cutler N. A., Arróniz-Crespo M., Street L. E., Jones D. L., Chaput D. L., DeLuca T. H. Long-term recovery of microbial communities in the boreal bryosphere following fire disturbance // *Microb. Ecol.* 2017. V. 73. Iss. 1. P. 75–90.
- Díaz-Raviña M., Prieto A., Bååth E. Bacterial activity in a forest soil after soil heating and organic amendments measured by the thymidine and leucine incorporation techniques // *Soil Biol. Biochem.* 1996. V. 28. Iss. 3. P. 419–426.
- Dunn P. H., Barro S. C., Poth M. Soil moisture affects survival of microorganisms in heated chaparral soil // *Soil Biol. Biochem.* 1985. V. 17. Iss. 2. P. 143–148.
- Dymov A. A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review // *Euras. Soil. Sci.* 2017. V. 50. Iss. 7. P. 780–790 (Original Rus. text © A. A. Dymov, 2017, publ. in *Pochvovedenie*. 2017. N. 7. P. 787–798).
- Fierro A., Rutigliano F. A., De Marco A., Castaldi S., Virzo De Santo A. Post-fire stimulation of soil biogenic emission of CO₂ in a sandy soil of a Mediterranean shrubland // *Int. J. Wildland Fire*. 2007. V. 16. Iss. 5. P. 573–583.
- Fritze H., Pennanen T., Pietikäinen J. Recovery of soil microbial biomass and activity from prescribed burning // *Can. J. For. Res.* 1993. V. 23. N. 7. P. 1286–1290.
- Ginzburg O., Steinberger Y. Effects of forest wildfire on soil microbial-community activity and chemical components on a temporal-seasonal scale // *Plant and Soil*. 2012. V. 360. Iss. 1–2. P. 243–257.
- Ivashchenko K. V., Ananyeva N. D., Vasenev V. I., Kudeyarov V. N., Valentini R. Biomass and respiration activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (Moscow region) // *Euras. Soil. Sci.* 2014. V. 47. Iss. P. 892–903 (Original Rus. text © K. V. Ivashchenko, N. D. Ananyeva, V. I. Vasenev, V. N. Kudeyarov, R. Valentini, 2014, publ. in *Pochvovedenie*. 2014. N. 9. P. 1077–1088).
- Kasischke E. S., Christensen N. L., Stocks B. J. Fire, global warming and the carbon balance of boreal forests // *Ecol. Appl.* 1995. V. 5. N. 2. P. 437–451.
- Marshall V. G. Impacts of forest harvesting on biological processes in northern forest soils // *For. Ecol. Manag.* 2000. V. 133. Iss. 1–2. P. 43–60.
- Neary D. G., Klopatek C. C., DeBano L. F., Ffolliott P. F. Fire effects on bellowground sustainability: a review and synthesis // *For. Ecol. Manag.* 1999. V. 122. Iss. 1–2. P. 51–71.
- Pietikäinen J., Fritze H. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: Comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification // *Soil Biol. Biochem.* 1995. V. 27. Iss. 1. P. 101–109.
- Rutigliano F. A., De Marco A., D'Ascoli R., Castaldi S., Gentile A., Virzo De Santo A. Impact of fire on fungal abundance and microbial efficiency in C assimilation and mineralization in a Mediterranean maquis soil // *Biol. Fertil. Soils*. 2007. V. 44. N. 2. P. 377–381.
- Stolnikova E. V., Ananyeva N. D., Chernova O. V. The microbial biomass and its activity and structure in the soils of old forests in the European Russia // *Euras. Soil. Sci.* 2011. V. 44. Iss. 4. Article number: 437 (Original Rus. text © E. V. Stolnikova, N. D. Ananyeva, O. V. Chernova, 2011, publ. in *Pochvovedenie*. 2011. N. 4. P. 479–494).
- Susyan E. A., Ananyeva N. D., Gavrilenko E. G., Chernova O. V., Bobrovskii M. V. Microbial biomass carbon in the profiles of forest soils of the southern taiga zone // *Euras. Soil. Sci.* 2009. V. 42. Iss. 10. P. 1148–1155 (Original Rus. text © E. A. Susyan, N. D. Ananyeva, E. G. Gavrilenko, O. V. Chernova, M. V. Bobrovskii, 2009, publ. in *Pochvovedenie*. 2009. N. 10. P. 1233–1240).
- Vandergert P., Newell J. P. Illegal logging in the Russian Far East and Siberia // *Int. For. Rev.* 2003. V. 5. Iss. 3. P. 303–306.
- Vivchar A. Wildfires in Russia in 2000–2008: estimates of burnt areas using the satellite MODIS MCD45 data // *Rem. Sens. Lett.* 2011. V. 2. Iss. 1. P. 81–90.
- Wüthrich C., Schaub D., Weber M., Marxer P., Conedera M. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland // *Catena*. 2002. V. 48. Iss. 3. P. 201–215.
- Yan T., Yang L., Campbell C. D. Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in Three Gorges Reservoir area // *Geoderma*. 2003. V. 115. Iss. 1–2. P. 129–138.

EVALUATION OF SOIL MICROBIAL COMPLEXES AFTER FIRES AND LOGGING IN PINE FORESTS OF THE LOWER PRIANGAR'E

A. V. Bogorodskaya, G. A. Ivanova

V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch

Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Science, Siberian Branch

Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

E-mail: anbog@ksc.krasn.ru, gaivanova@ksc.krasn.ru

The dynamics of ecological and microbiological parameters of the soils in fruticulose-lichen-green moss type of pine forests after fires of different intensity and logging tree stands at the initial stage (up to 10 years) of vegetation restoration in the Lower Priangar'e region are discussed in the article. It is revealed that at four to five year period after fires content of microbial biomass decreases by 2–9 times, total C_{mic} storages decreases by 20–40 % in the upper organo-mineral horizon of illuvial-ferrous sandy podzol, and the transformation of the structure and the number of ecological-trophic groups of microorganisms (ETGM), with more marked changes after high-intensity fires. The highest values of qCO_2 (6.7–27.4 $\mu gC-CO_2/(mgC_{mic} \cdot h)$) were observed within four years after fires with a tendency to decrease its values. The maximum changes of the functional parameters of microbial communities, decreases the number of ETGM and changes its structure, increased microbial production of CO_2 by 54–40 % while reducing total C_{mic} storages by 20–40 %, and a high qCO_2 value (5.5–14.4 $\mu gC-CO_2/(mgC_{mic} \cdot h)$) were observed in the soil in two-five years of deforestation with significant mechanical disturbance of litter, whereas in the soil of ten logging at the young stage the considered parameters of microbial communities approximated the control. The restored successions of microbiocenoses of the of illuvial-ferrous sandy podzol of pine forests in five to eight years after high-intensity fires and after logging of pine forests with disturbance of soil and vegetation cover had similar trend and focus, reflecting the transformation of hydrothermal and trophic soil conditions.

Keywords: *fires of different intensity, logging areas, ecological-trophic groups of microorganisms, microbial biomass, basal respiration, microbial metabolic coefficient.*

How to cite: *Bogorodskaya A. V., Ivanova G. A. Evaluation of soil microbial complexes after fires and logging in pine forests of the Lower Priangar'e // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2020. N 3. P. 37–50 (in Russian with English abstract and references).*