

EDN: GGYKWD

УДК 630\*114.68:630\*43:630\*221

## Impact of Logging and Fires on Soil Microbiomes of Scots Pine Stands in the Middle Taiga of Central Siberia

**Anna V. Bogorodskaya\* and Elena A. Kukavskaya**

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS – separate subdivision  
of the Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 01.10.2024, received in revised form 20.03.2025, accepted 21.03.2025

**Abstract.** Fires and logging are the main disturbance factors in forest ecosystems, which have a significant impact on the carbon cycle and soil succession. The duff and upper mineral profile (up to 20 cm) of sandy podzols (Albic Podzols) in lichen pine forests and peaty podzols (Histic Podzols) in sphagnum pine forests in the central taiga of Krasnoyarsk Krai were studied to assess the effects of fire and logging on the soil microbiome. Four categories of plots were investigated in two types of pine forests: undisturbed forest (control), burned forest, a logged site, and a logged burned site. Carbon of microbial biomass ( $C_{mic}$ ), basal respiration (BR), microbial metabolic quotient ( $qCO_2$ ), and abundances of ecological-trophic groups of soil microorganisms were estimated in sphagnum and lichen Scots pine forests four years after fires and logging. The storage of microbial biomass and microbial  $CO_2$  production of the upper part of the soil profile were determined. The study found that in the duff of burned forests and logged burned sites, the  $C_{mic}$  content was reduced by a factor of 2–3.5, the BR intensity – by 30–40 %, the amount of hydrolytics – by a factor of 2–11, and the total  $C_{mic}$  stock in the upper part of the podzol profile – by a factor of 1.7–2.4, while  $qCO_2$  increased by 1.7–5.6 times, and the degree of oligotrophy of soils became higher. In the podzol horizon, significant postfire changes in the parameters studied were observed only in the forest and in the logged site of the lichen Scots pine forest. The increase in microbial  $CO_2$  production by the podzol profile against a background of decreasing total  $C_{mic}$  stocks demonstrates soil carbon loss during microbial mineralization of organic matter in lichen Scots pine forest after fires in forests and on logged sites. In the unburned logged sites, in the duff, the decrease in the microbiome parameters was smaller than in the burned sites, while in the podzol horizon, those parameters increased compared to the control. The greatest change in the soil microbiomes of sandy podzols was observed on the logged and burned site of the lichen Scots pine forest, where significant

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [anbog@ksc.krasn.ru](mailto:anbog@ksc.krasn.ru)

ORCID: 0000-0002-2382-5270 (Bogorodskaya A.); 0000-0002-2805-2588 (Kukavskaya E.)

changes in the studied parameters were revealed to a depth of 10 cm of mineral soil. Studying soil microbiomes after fires and logging is necessary both to understand the rate of recovery of soil ecological functions and to provide predictive estimates of CO<sub>2</sub> mineralization fluxes at a regional scale under conditions of intense anthropogenic activity.

**Keywords:** sandy podzols, peat podzols, microbial biomass, basal respiration, microbial metabolic coefficient, microbial biomass carbon reserve, microbial CO<sub>2</sub> production.

**Acknowledgements.** The work was supported by the State Assignment Projects No. FWES-2024–0023 and No. FWES-2024–0040.

Citation: Bogorodskaya A. V., Kukavskaya E. A. Impact of logging and fires on soil microbiomes of Scots pine stands in the middle taiga of central Siberia. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(1), 22–44. EDN: GGYKWD



## Воздействие рубок и пожаров на микробиомы почв сосняков среднетаежной подзоны Средней Сибири

**А. В. Богородская, Е. А. Кукавская**

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –  
обособленное подразделение Федерального научного центра  
«Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Пожары и рубки являются важнейшими дестабилизирующими факторами лесных экосистем, которые оказывают существенное воздействие на цикл углерода и сукцессии почв. С целью оценки влияния пожаров и рубок на микробиомы почв исследовали подстилки и верхний минеральный профиль (до 20 см) песчаных подзолов (Albic Podzols) в сосняках лишайниковых и торфяно-подзолов (Histic Podzols) в сосняках сфагновых в средней тайге Красноярского края. Изучены 4 категории участков в каждом из типов леса: ненарушенное насаждение (контроль); насаждение, пройденное пожаром; вырубка; вырубка, пройденная пожаром. Определяли содержание углерода микробной биомассы ( $C_{\text{мик}}$ ), базальное дыхание (БД), микробный метаболический коэффициент ( $q\text{CO}_2$ ), численность эколого-трофических групп микроорганизмов почв, рассчитывали запас углерода микробной биомассы и микробное продуцирование CO<sub>2</sub> в верхней части профиля почв. Выявлено, что в подстилках насаждений и выруб, пройденных пожарами, содержание  $C_{\text{мик}}$  снижено в 2–3,5 раза, интенсивность БД – на 30–40 %, количество гидролитиков – в 2–11 раз, общий запас  $C_{\text{мик}}$  в верхней части профиля подзолов – в 1,7–2,4, при этом  $q\text{CO}_2$  возрастает в 1,7–5,6 раза, повышается олиготрофность почв. В подзолистом горизонте значительные изменения рассматриваемых параметров после воздействия пожаров отмечены только в насаждении и на вырубке сосняка лишайникового. Повышение микробного продуцирования CO<sub>2</sub> на фоне снижения общих запасов  $C_{\text{мик}}$  в профиле песчаного подзола демонстрирует потерю углерода почвой в ходе микробной минерализации органического вещества

в сосняке лишайниковом после пожаров в насаждениях и на вырубке. На не горевших вырубках в подстилках наблюдалось меньшее снижение рассматриваемых параметров микробиомов, чем на участках, пройденных пожарами, тогда как в подзолистом горизонте выявлено увеличение таковых по сравнению с контролем. Максимальная трансформация микробиомов песчаных подзолов отмечена на вырубке, пройденной пожаром, в сосняке лишайниковом, где значительные изменения исследуемых показателей отмечены до глубины 10 см минеральной почвы. Исследование микробиомов почв после пожаров и рубок необходимо как для понимания скорости восстановления экологических функций почв, так и для прогнозных оценок минерализационных потоков CO<sub>2</sub> на региональном уровне в условиях современной интенсивной антропогенной деятельности.

**Ключевые слова:** песчаные подзолы, торфяно-подзолы, микробная биомасса, базальное дыхание, микробный метаболический коэффициент, запас углерода микробной биомассы, микробное продуцирование CO<sub>2</sub>.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке проектов государственного задания № FWES-2024–0023 и № FWES-2024–0040.

---

Цитирование: Богородская А. В. Воздействие рубок и пожаров на микробиомы почв сосняков среднетаежной подзоны Средней Сибири / А. В. Богородская, Е. А. Кукавская // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(1). С. 22–44. EDN: GGYKWD

---

## Введение

Пожары и рубки являются важнейшими дестабилизирующими факторами лесных экосистем, которые оказывают существенное воздействие на структуру лесов, их биомассу, цикл углерода и сукцессии почв (Gauthier et al., 2015; Thom, Seidl, 2016; Дымов, 2018; Dymov et al., 2023), при этом в последние десятилетия роль этих факторов в Сибири возросла (Shvetsov et al., 2021; Jones et al., 2022).

Повторяющиеся лесные пожары – природный исторический фактор существования как сосновых лесов (Иванова и др., 2022), так и развития подзолов (Gorbach et al., 2021; Dymov et al., 2023). Прогрев почвы по глубине и термическая деструкция органического вещества являются основными факторами воздействия пожаров на свойства почв, состояние почвенного микробиома и скорость процессов минерализации (Bergeron et al., 2013; Loehman et al., 2014; Santin et al., 2016; Certini et al., 2021;

Pellegrini et al., 2022). Показана высокая вариабельность отклика почвенных микроорганизмов на пожар – от кратковременных снижений численности и биомассы до изменений микробиомов, длящихся десятилетиями, при этом интенсивность пожара чаще всего выступает основным предиктором длительных нарушений в микробном сообществе почв (Holden et al., 2016; Ludwig et al., 2018; Pingree, Kobziar, 2019; Certini et al., 2021; Иванова и др., 2022).

Лесозаготовительные мероприятия – основной антропогенный фактор, нарушающий экологическую обстановку и запускающий процесс вторичных сукцессий лесов, направленность которых определяется лесорастительными условиями, технологией и сезоном лесозаготовки (Иванов, 2005; Дымов, 2017). Территория вырубок неоднородна по степени воздействия. Площадь наименее нарушенных пасечных участков (без захода тяжелой агрегатной техники) составляет

59–71 %, доля участков с нарушениями почвенного покрова составляет для трелевочных волоков – 18–29 %, погрузочных площадок – 6–15 % от общей площади лесосеки (Паутов, Ильчуков, 2001). Морфологические и физико-химические изменения свойств почв, а также снижение активности микробных комплексов почв на механически нарушенных участках лесосек могут сохраняться длительное время – до 100 и более лет (Бабинцева и др., 1984; Тощева, 1988; Думов, 2017; Дымов, 2018). Вырубки и вывоз древесины в зимний период приводят к меньшим нарушениям не только наземного растительного покрова, но и верхних органогенных и органо-минеральных горизонтов почвы (Уланова, 2007; Думов, 2017). Вырубки являются чрезвычайно пожароопасными в связи с присутствием на них большого запаса горючих материалов и условий для их быстрого высыхания. Часто пожары начинаются на вырубках, а затем переходят в лесные насаждения (Kukavskaya et al., 2013). Последствия пожаров на вырубках широко варьируют в зависимости от лесорастительных условий и метеорологических показателей до и во время горения (Валендик и др., 2011).

Трансформация свойств почв и микробиомов после пожаров и рубок зависит как от степени повреждения почвы, определяемой интенсивностью пирогенного воздействия и фрагментированием лесосек, так и от направленности и скорости восстановительных сукцессий растительности (Иванов, 2005; Holden et al., 2016; Cutler et al., 2017; Думов, 2017; Дымов, 2018; Ludwig et al., 2018; Pingree, Kobziar, 2019; Certini et al., 2021; Иванова и др., 2022).

Интерес к изучению микробиомов почв лесных экосистем после пожаров и рубок определяется их главенствующей ролью в циклах биогенных элементов, продукционно-

деструкционном звене почвенного органического вещества и регуляции газового состава атмосферы (Dobrovol'skaya et al., 2015; Saccà et al., 2017). Микробиомы служат инструментом диагностики состояния почв лесных экосистем, позволяют количественно оценивать степень нарушения и способность почв к восстановлению (Ananyeva et al., 2011; Stolnikova et al., 2011; Гродницкая, 2013; Nikitin et al., 2022).

В нашем исследовании мы проверили две гипотезы: во-первых, ожидается, что на вырубках, проведенных в зимний период, будет меньшая степень нарушения микробиомов почв, чем после воздействия пирогенного фактора, а при двойном нарушении (рубка и пожар) степень трансформации микробиомов почв будет максимальна. Во-вторых, степень трансформации параметров микробиомов почв в значительной степени будет определяться типом леса в связи с различиями эдафических условий почв.

Цель работы заключалась в исследовании микробиомов почв после воздействия рубок и пожаров в лишайниковых и сфагновых сосновых лесах среднетаежной подзоны Средней Сибири.

## Объекты и методы исследования

Исследования проводили в среднетаежной подзоне Средней Сибири в южной части Туруханского района Красноярского края недалеко от Международной обсерватории ZOTTO (60°46' с.ш., 89°08' в.д.) (рис. 1). Климат региона резко-континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет –3,5 °C (Борская метеостанция). Сумма температур выше 10 °C варьирует в пределах 1200–1400 °C. Годовое количество осадков составляет 594 мм.

Сосняки лишайниковой и зеленомошной групп типов леса, широко распространен-





Рис. 1. Расположение пробных площадей (ПП) (I) и категории участков (II) в лишайниковом (1) и сфагновом (2) сосняках: (а) насаждение (контроль); (б) насаждение, пройденное пожаром; (в) вырубка; (г) вырубка, пройденная пожаром

Fig. 1. Location of sample plots (SP) (I) and categories of plots (II) in lichen (1) and sphagnum (2) pine forests: (a) unlogged/unburned (control); (б) unlogged/burned; (в) logged/unburned; (г) logged/burned

ные в районе исследований, характеризуются высокой природной пожарной опасностью (Иванова, Иванов, 2015) и большой нарушенностью рубками (Koshurnikova et al., 2015). Для сравнительной оценки воздействия рубок и пожаров на микробоценозы почв в июле 2022 г. были заложены две пробные площади (ПП) с контрастными условиями увлажнения и различными видами доминирующей растительности: сосняк лишайниковый и сосняк сфагновый (табл., рис. 1). На каждой ПП выделены по четыре категории участков площадью не менее 2 га каждый: ненарушенное насаждение (контроль); насаждение, пройденное пожаром; вырубка; вырубка, пройденная пожаром. Участки располагались в непосредственной близости друг от друга в одном лесном массиве и одинаковых лесорастительных условиях, а древостои изначально имели одинаковые таксационные характеристики. Сравнительную оценку микробиологических характеристик почв двух типов сосняков после рубок и пожаров проводили в сравнении с ненарушенным насаждением – контролем. Таксацию насаждений, описание живого напочвенного покрова и характеристик пожара проводили с использованием общепринятых в практике лесоведения, лесной таксации и пироэкологии методик (Сукачев, Зонн, 1961; Курбатский, 1970; Анучин, 1982). Древостои представлены чистыми сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) насаждениями со средним диаметром 40,8 см и высотой 19,3 м. В зимний период 2017–2018 гг. часть участков была пройдена сплошной рубкой, а в июле 2018 г. на исследуемой территории распространились сильные, устойчивые пожары, которые в насаждениях частично переходили в крону деревьев. В сосняке лишайниковом прогорание напочвенного покрова в 2 раза больше, чем в сосняке сфагновом, при этом на вырубке сфагнового сосняка полнота сгорания су-

щественно превышает таковую в насаждении (табл.).

Почвы в сосняках лишайниковых представлены иллювиально-железистыми песчаными подзолами (Albic Podzols), в сосняках сфагновых – торфяно-подзолами (Histic Podzols) и относятся к отделу альфегумусовых (Шишов и др., 2004; IUSS Working Group WRB, 2015). Для почвенно-микробиологических исследований из трех прикопок для каждой категории участков отбирали репрезентативные почвенные образцы по генетическим горизонтам (О – подстилка, минеральные горизонты Е и Вf). Дискретность отбора проб почв составила 5 см для лучшего выявления изменений после исследуемых нарушающих факторов. Отбор почвенных образцов сопровождался определением температуры почвенных слоев (портативным термометром «Checktemp») и плотности (бур Н. А. Качинского). Для анализов использовались свежие образцы, хранившиеся при +5 °С не более 2 недель. В лаборатории определяли влажность почвы термовесовым методом (Теория и практика., 2006), кислотность почв – портативным потенциометром Аквилон-410 (Россия), при соотношении почва: раствор для подстилок – 1:10, для минеральных горизонтов – 1:5 (Теория и практика., 2006). Определение содержания органического вещества в почве ( $C_{орг}$ ) проводили по параметру «потеря при прокаливании» с последующим пересчетом на углерод (Анализ., 2017) после выдерживания в течение 3 ч при температуре 550 °С в муфельной печи SNOL-1100 (Латвия) (ГОСТ 27753.10–88).

Содержание углерода микробной биомассы ( $C_{мик}$ ) методом субстрат-индуцированного дыхания и интенсивность базального дыхания (БД) почв (Anderson, Domsch, 1978; Ananyeva et al., 2011) определяли в свежих образцах почв без корней и подстилок без

Таблица. Основные характеристики напочвенного покрова и почв исследуемых участков

Table. Main characteristics of the ground cover and soils of the study area

| Категория участка              | Проективное покрытие, % |                | Мощность, см   |                     | Запас, г/м <sup>2</sup> |                | Доминирующие виды живого напочвенного покрова                                                                                                                                                                                   | Характеристика почв                          |                                      |                                                                 |
|--------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                | травы и кустарнички     | лишайники, мхи | лишайники, мхи | очес мха, подстилка | травы и кустарнички     | лишайники, мхи |                                                                                                                                                                                                                                 | горизонт почвы, глубина, см                  | pH H <sub>2</sub> O                  | C, %                                                            |
| Сосняк лишайниковый            |                         |                |                |                     |                         |                |                                                                                                                                                                                                                                 |                                              |                                      |                                                                 |
| Насаждение                     | 10                      | 86             | 4,2±0,3        | 2,3±0,4             | 14±8                    | 559±87         | <i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Web. ex Wigg, <i>C. stellaris</i> (Opiz) Pouzar & Vezda; <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.                                                                                                       | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 3,92<br>4,52<br>4,87<br>5,10<br>5,40 | 26,21±4,87<br>0,16±0,03<br>0,13±0,03<br>0,10±0,01<br>0,06±0,01  |
| Насаждение, пройденное пожаром | 11                      | 12             | 0,1±0,04       | 0,4±0,1             | 14±6                    | 3±2            | <i>Polytrichum commune</i> Hedw.; <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop., <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth                                                                        | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 4,56<br>4,97<br>5,10<br>5,20<br>5,50 | 16,21±2,34<br>0,12±0,01<br>0,19±0,02<br>0,10±0,01<br>0,06±0,002 |
| Вырубка                        | 16                      | 81             | 3,8±0,8        | 0,8±0,1             | 62±34                   | 591±111        | <i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Web. ex Wigg, <i>C. stellaris</i> (Opiz) Pouzar & Vezda, <i>Polytrichum commune</i> Hedw.; <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth, <i>Empetrum nigrum</i> L. | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 3,95<br>4,92<br>4,95<br>5,08<br>5,25 | 27,85±0,61<br>0,75±0,21<br>0,11±0,02<br>0,09±0,01<br>0,06±0,004 |
| Вырубка, пройденная пожаром    | 27                      | 34             | 0,2±0,1        | 0,1±0,1             | 39±8                    | 11±5           | <i>Polytrichum commune</i> Hedw.; <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>V. myrtillus</i> L., <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop., <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth, <i>Carex</i> spp.                             | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 4,92<br>4,78<br>4,96<br>5,20<br>5,38 | 13,48±6,58<br>0,14±0,05<br>0,09±0,02<br>0,08±0,01<br>0,07±0,01  |
| Сосняк сфагновый               |                         |                |                |                     |                         |                |                                                                                                                                                                                                                                 |                                              |                                      |                                                                 |
| Насаждение                     | 76                      | 100            | 5,2±0,2        | 18,2±2,0            | 305±93                  | 768±153        | <i>Sphagnum palustre</i> L., <i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.; <i>Ledum palustre</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L., <i>V. vitis-idaea</i> L., <i>V. uliginosum</i> L., <i>Empetrum nigrum</i> L.         | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 3,87<br>4,47<br>4,78<br>4,98<br>5,38 | 43,36±1,51<br>0,26±0,02<br>0,17±0,03<br>0,13±0,01<br>0,09±0,01  |

|                                      |    |     |         |          |        |        |                                                                                                                                                                          |                                              |                                      |                                                                |
|--------------------------------------|----|-----|---------|----------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Насаждение,<br>пройденное<br>пожаром | 83 | -   | -       | 12,7±7,3 | 92±53  | -      | <i>Carex</i> spp., <i>Vaccinium myrtillus</i> L., <i>V. vitis-idaea</i> L., <i>V. uliginosum</i> L., <i>Ledum palustre</i> L.                                            | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 4,27<br>4,79<br>4,92<br>5,12<br>5,41 | 36,69±4,26<br>0,20±0,03<br>0,15±0,04<br>0,14±0,01<br>0,09±0,01 |
| Вырубка                              | 91 | 100 | 4,7±0,2 | 17,7±2,8 | 78±28  | 610±23 | <i>Sphagnum palustre</i> L., <i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.;<br><i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>V. myrtillus</i> L.,<br><i>Carex</i> spp.       | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 3,97<br>4,62<br>4,80<br>4,96<br>5,34 | 39,91±9,34<br>0,84±0,05<br>0,11±0,03<br>0,13±0,01<br>0,09±0,01 |
| Вырубка,<br>пройденная<br>пожаром    | 90 | -   | -       | 5,2±0,7  | 102±23 | -      | <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>V. uliginosum</i> L.,<br><i>Carex</i> spp., <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.)<br>Scop., <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth | O<br>E 0–5<br>E 5–10<br>Bf 10–15<br>Bf 15–20 | 4,47<br>5,10<br>4,97<br>5,10<br>5,40 | 38,40±2,81<br>0,21±0,06<br>0,19±0,03<br>0,14±0,01<br>0,09±0,01 |



крупных растительных остатков. Определение  $\text{CO}_2$  проводили на газовом хроматографе Agilent 6890N (Hewlett-Packard, США), используя инкубационные методики, подробное описание которых приведено ранее (Богородская, Кукавская, 2016). Микробный метаболический коэффициент ( $q\text{CO}_2$ ) рассчитывали как отношение скорости базального дыхания к микробной биомассе (Anderson, Domsch, 1993).

Расчет запасов углерода микробной биомассы  $C_{\text{мик}}$  (г  $\text{C}/\text{м}^3$ ) и общее микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  (БД) (мг  $\text{C}-\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ) в исследуемых горизонтах почв рассчитывали как произведение содержания  $C_{\text{мик}}$  (г/г почвы) или интенсивности БД (мг/(г почвы  $\times$  ч)), объемного веса почвы ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) и объема почвы в данном слое ( $V$ , м<sup>3</sup>). Затем запасы углерода микробной биомассы и микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  всех исследуемых горизонтов суммировали и получали общие запасы  $C_{\text{мик}}$  и микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  на почвенный профиль (Susyan et al., 2009; Stolnikova et al., 2011). Численность культивируемых микроорганизмов и соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ) определяли методом посевов на диагностические среды и выражали в млн колониобразующих единиц (КОЕ) в 1 грамме абсолютно сухой почвы (105 °C, 8 ч): на мясопептонном агаре и сусло агаре – гидролитиков, на крахмало-аммиачном агаре – копитрофов, на почвенном агаре – олиготрофов (Практикум..., 2005).

Статистическую обработку результатов выполняли с помощью программы Excel 2013. Результаты анализов представлены как среднее арифметическое из трех повторностей для каждой категории участков и стандартное отклонение от среднего. Корреляционную связь между ЭКТГМ,  $C_{\text{мик}}$ , БД и физико-химическими свойствами почвы оценивали

коэффициентами ( $r$ ) Спирмена, значимость которых оценивалась при  $p \leq 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Для почв исследуемых ненарушенных сосняков (контроли) характерна сильная кислотность всего профиля, максимальная в подстилке ( $\text{pH} = 3,9$ ) и постепенно уменьшающаяся с глубиной (табл.), при этом значения  $\text{pH}$  ниже на 1–2,5 % в сосняке сфагновом по сравнению с сосняком лишайниковым на протяжении всего изученного профиля (Dymov et al., 2023). Содержание  $C_{\text{орг}}$  в подстилках ненарушенных сосняков сфагновом и лишайниковом достигает 43,4 и 26,2 % соответственно, а в верхнем слое подзолистого горизонта  $C_{\text{орг}}$  снижается до 0,26 и 0,16 % и не превышает 0,09 и 0,06 % в горизонте Vf на глубине 20 см (табл). Содержание  $C_{\text{орг}}$  в минеральной части всего изученного профиля выше на 30–60 % в контрольном сосняке сфагновом по сравнению с сосняком лишайниковым (табл.). Согласно данным А.А. Дымова (Dymov et al., 2023), основное количество органического углерода и азота, а также наибольшие суммы обменных катионов сосредоточены в грубогумусированных подстилках исследуемых сосняков, при переходе к минеральным горизонтам профиля вышеназванные величины уменьшаются в 10–370 раз.

Через четыре года после пожаров в насаждениях и на вырубках в верхних органо-минеральных горизонтах подзолов отмечено снижение кислотности, наиболее заметное в подстилах вырубков, пройденных пожарами (табл.). Для почв вырубков также характерно незначительное снижение кислотности подстилок и подзолистого горизонта. Содержание  $C_{\text{орг}}$  в подстилках песчаных подзолов на пройденных пожарами участках леса и вырубки сосняка лишайникового в 1,6–2 раза ниже контроля и на 13–25 % – в верхнем

5 см слое подзолистого горизонта. В верхних органо-минеральных горизонтах торфяно-подзола на пройденных пожарами участках леса и вырубке в сосняке сфагновом  $C_{орг}$  снижалось на 10–23 % по сравнению с контролем (табл.). В подстилках вырубков обоих типов сосняков содержание  $C_{орг}$  сравнимо с таковым в контрольных насаждениях и повышалось в 3–5 раз в верхнем 0–5 см слое подзолистого горизонта, достигая 0,75 и 0,84 % в сосняке лишайниковом и сфагновом соответственно.

Показано, что значительное снижение кислотности отмечается в верхней части профиля песчаных подзолов в сосняках через год после пожаров и постепенно восстанавливается в ходе послепожарной сукцессии, тогда как содержание общего углерода в подзолах снижено как на свежих гарях, так и через 79 лет после воздействия пожаров (Dymov et al., 2023).

В сосняках лишайниковых и сфагновых выявлены контрастные гидротермические условия почв на разных категориях участков (рис. 2). Так, влажность подстилки сосняка сфагнового в контрольном насаждении в 1,7 раза выше, чем в сосняке лишайниковом, тогда как в горевшем насаждении – почти в 3 раза, на вырубке – почти в 4 раза, а на горевшей вырубке – в 7,7 раза. Влажность минеральных горизонтов торфяно-подзола в сосняке сфагновом в контрольном насаждении превышает аналогичный показатель в сосняке лишайниковом в 2,5–4,5 раза, на вырубке – в 1,6–2,9 раза, горевших участках леса и вырубке – в 3,5–4 раза. Температура почвы в контрольном сосняке лишайниковом на 0,8–3,1 °C выше, чем в сфагновом, и данная тенденция наблюдается на всех категориях участков (рис. 2). Максимальная разница

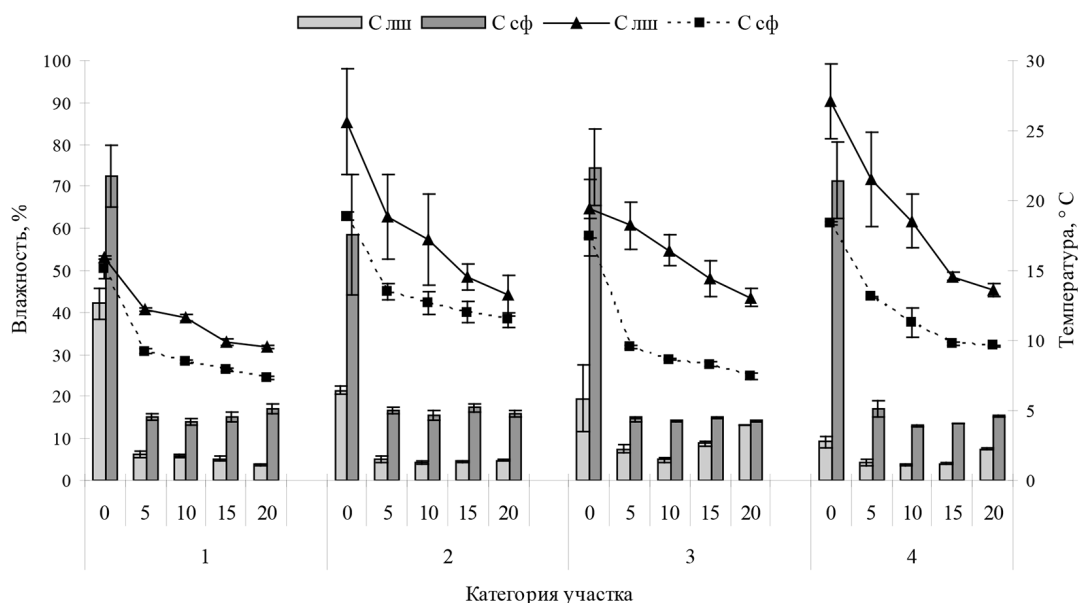


Рис. 2. Влажность (диаграммы) и температура (графики) почв на разной глубине (см) исследуемых сосняков. Указаны средние значения и стандартные отклонения ( $n=3$ ). Категория участков: 1 – насаждение; 2 – насаждение, пройденное пожаром; 3 – вырубка; 4 – вырубка, пройденная пожаром. С лш – сосняк лишайниковый; С сф – сосняк сфагновый

Fig. 2. Moisture content (diagrams) and temperature (graphs) of soils at different depths (cm) of the study pine forests. Mean values and standard deviations are shown ( $n=3$ ). Category of sites: 1 – unlogged/unburned (control); 2 – unlogged/burned; 3 – logged/unburned; 4 – logged/burned. P lh – lichen pine forest; P sf – sphagnum pine forest

температур в верхних горизонтах подзолов в изучаемых сосняках (6–8,7 °C) отмечается на вырубках не горевших и пройденных пожаром.

Более сухие эдафические условия почв в сосняках лишайниковых способствуют их повышенной природной пожароопасности и развитию более высокоинтенсивных пожаров в сравнении с сосняками сфагновыми (Буряк и др., 2022). В целом на сухих почвах могут регистрироваться более высокие температуры в верхних почвенных горизонтах во время горения (Busse et al., 2005), что оказывает большее влияние на свойства почв и биоту (Holden et al., 2016; Santin et al., 2016; Certini et al., 2021).

Микробиомы подзолов исследуемых ненарушенных контрольных сосняков характеризуются высокими показателями содержания  $C_{\text{мик}}$  (1485–3780 мкгС/г), скорости БД (4,9–9,4 мкг  $C-CO_2/(г \times ч)$ ) и численности разных эколого-трофических групп микроорганизмов (6,2–33,8 млн КОЕ/г) в подстилках и резким снижением вышеуказанных параметров при переходе к минеральным горизонтам, что отражает характер распределения  $C_{\text{орг}}$  в профиле подзолов (рис. 3, 5, табл.). Содержание  $C_{\text{мик}}$  и интенсивность БД в исследуемом профиле торфяно-подзолов в ненарушенных сосняках сфагновых выше, чем в песчаных подзолах сосняков лишайниковых, при этом максимальные различия отмечены в подстилке (в 2–2,5 раза) и в верхнем 0–5 см слое подзолистого горизонта (в 1,4–2,2 раза) (рис. 3). Численность гидролитиков и копиотрофов в 2,4–2,6 раза, а олиготрофов – в 1,4 раза превышает таковую в подстилке контрольного сосняка сфагнового, по сравнению с сосняком лишайниковым, при этом в подстилке сосняка лишайникового доминирует олиготрофная группировка, а в сосняке сфагновом – копиотрофная. В подзолистом гори-

зонте численность всех ЭКТГМ также в 1,6–1,8 раза выше в сосняке сфагновом (рис. 5). Ранее было показано, что влияние разных растительных микрогруппировок на свойства подзолов сосняков в среднетаежной подзоне Карелии и их микробиологические особенности наиболее отчетливо проявляются в верхних органо-минеральных горизонтах и ослабевают с глубиной, при этом в лишайниковой и зеленомошной микрогруппировках, контрастных по условиям увлажнения, отмечаются наиболее выраженные изменения структурно-функциональной организации микробиоценозов (Мошкина и др., 2019; Бахмет и др., 2022).

Значения микробного метаболического коэффициента в почвах исследуемых ненарушенных сосняков ( $qCO_2 = 2,5–3,3$  и  $1–2,2$  мкг  $C-CO_2/мг C_{\text{мик}} \times ч$  для органогенного и минерального горизонтов) соответствуют данным, полученным для устойчивых и климаксных экосистем ( $\leq 2–4$  мкг  $C-CO_2/мг C_{\text{мик}} \times ч$ ) (Susyan et al., 2011), и демонстрируют сбалансированность микробиологических процессов, когда на поддержание единицы микробной биомассы выделяется меньше  $CO_2$  (Anderson, Domsch, 1993; Susyan et al., 2009) (рис. 4). Исследуемые параметры микробиомов ненарушенных (контрольных) сосновых насаждений ( $C_{\text{мик}}$ , БД, численность гидролитиков, копиотрофов, олиготрофов) имеют значимые прямые связи ( $p \leq 0,05$ ) с температурой ( $r = 0,69–0,86$ ), влажностью почв ( $r = 0,97–0,98$ ), содержанием  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,97–0,99$ ) и обратную связь с pH ( $r = -0,88–0,98$ ), что отражает устойчивый характер распределения микробного компонента в профиле подзолов.

Пожары и рубки древостоев в сосновых насаждениях приводят к значительным изменениям функциональной активности микробиомов. В подстилках пройденных пожарами насаждений и вырубках, содержание  $C_{\text{мик}}$

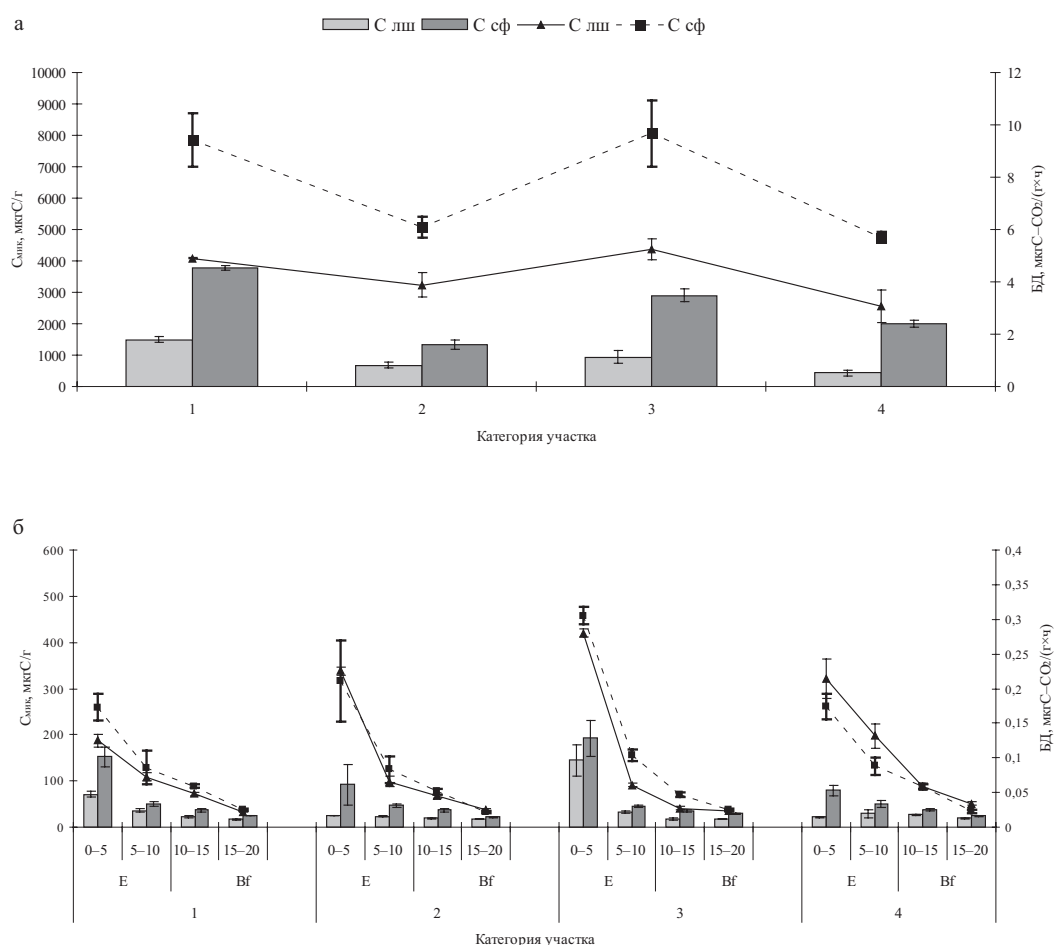


Рис. 3. Содержание  $C_{mic}$  (диаграммы) и скорость БД (графики) в подстилке (а) и минеральных горизонтах (б) подзолов на разной глубине (см) исследуемых участков сосняков. Указаны средние значения и стандартные отклонения ( $n=3$ ). Категория участков: 1 – насаждение; 2 – насаждение, пройденное пожаром; 3 – вырубка; 4 – вырубка, пройденная пожаром. С лш – сосняк лишайниковый; С сф – сосняк сфагновый

Fig. 3.  $C_{mic}$  (diagrams) and BD (graphs) in the duff (a) and mineral horizons (б) of podzols at different depths (cm) of the study areas of pine forests. Mean values and standard deviations are shown ( $n=3$ ). Category of sites: 1 – unlogged/unburned (control); 2 – unlogged/burned; 3 – logged/unburned; 4 – logged/burned. P lh – lichen pine forest; P sf – sphagnum pine forest

снижено в 2–3,5 раза, при этом минимальное его содержание отмечается на вырубке, пройденной пожаром, в сосняке лишайниковом (427 мкгС/г). В подстилках на вырубках содержание  $C_{mic}$  также в 1,3–1,6 раза ниже контроля (рис. 3а). В верхнем слое 0–5 см подзолистого горизонта пройденных пожарами насаждений и вырубков содержание  $C_{mic}$  снижено в сосняке лишайниковом в 2,8–3,3

раза, в сфагновом – в 1,6–1,9 раза по сравнению с ненарушенным насаждением, тогда как на не горевших вырубках отмечено возрастание  $C_{mic}$  в 2 раза и на 26 % для сосняков лишайникового и сфагнового соответственно. В нижележащем слое подзолистого горизонта 5–10 см в сосняке лишайниковом на вырубке и на участках, пройденных пожарами насаждений и вырубков,  $C_{mic}$  также снижено

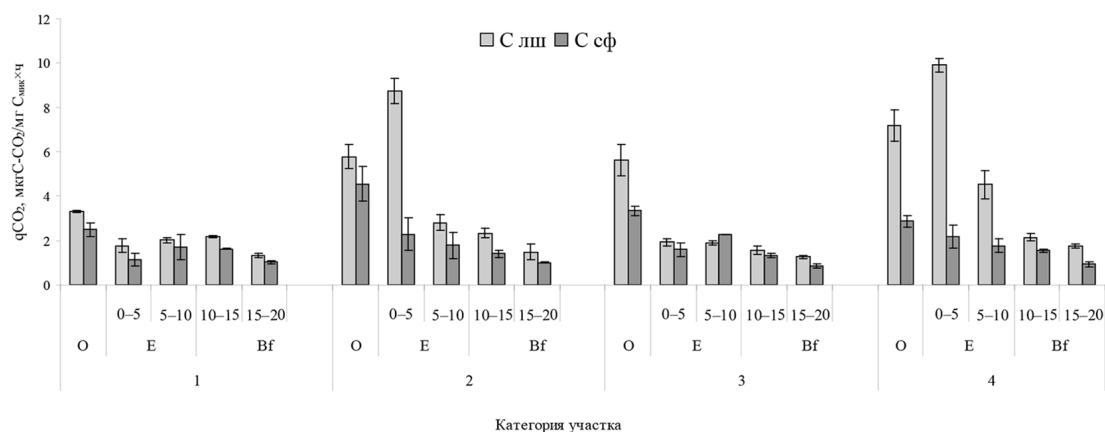


Рис. 4. Микробный метаболический коэффициент в почвах на разной глубине (см) исследуемых сосняков. Указаны средние значения и стандартные отклонения ( $n=3$ ). Категория участков: 1 – насаждение; 2 – насаждение, пройденное пожаром; 3 – вырубка; 4 – вырубка, пройденная пожаром. С лш – сосняк лишайниковый; С сф – сосняк сфагновый

Fig. 4. The microbial metabolic coefficient in soils at different depths (cm) of the study pine forests. Mean values and standard deviations are shown ( $n=3$ ). Category of sites: 1 – unlogged/unburned (control); 2 – unlogged/burned; 3 – logged/unburned; 4 – logged/burned. P lh – lichen pine forest; P sf – sphagnum pine forest

на 12–35 %, тогда как в сосняке сфагновом данные показатели достоверно не отличались от значений  $C_{мик}$  в ненарушенном насаждении (рис. 3б).

Интенсивность БД в подстилках пройденных пожарами насаждений и вырубок снижена на 30–40 % и немного выше контроля на не горевших вырубках (рис. 3а). Интенсивность БД в слое 0–5 см горизонта Е в 2 раза выше контроля на всех категориях участков в сосняке лишайниковом и на 20 и 76 % – на участках пройденных пожарами насаждений и не горевших вырубках в сосняке сфагновом. В слое 5–10 см подзолистого горизонта скорость БД увеличивается в 2 раза только на пройденной пожаром вырубке в сосняке лишайниковом и не отличается на остальных категориях участков независимо от типа леса (рис. 3б). Ниже 10 см минерального профиля подзолов достоверных различий рассматриваемых показателей не выявлено, что свидетельствует о влиянии пожаров и рубок на микробиологические свойства только

в верхних (до 10 см) почвенных горизонтах (Богородская, Кукавская, 2016; Holden et al., 2016; Certini et al., 2021).

Значения коэффициента  $qCO_2$  как важного индикатора эффективности использования и доступности органических соединений (Anderson, Domsch, 1993) в подстилке и верхнем слое 0–5 см подзолистого горизонта увеличиваются в 1,7–5,6 раза на всех категориях участков в сосняке лишайниковом и достигают максимальных значений (7,2 и 9,9  $mgC-CO_2/mg C_{мик} \cdot ч$ ) на вырубке, пройденной пожаром, где также отмечено увеличение  $qCO_2$  в 2 раза, и в слое 5–10 см подзолистого горизонта (рис. 4). В сосняке сфагновом микробный метаболический коэффициент выше контроля в 2 раза в горизонтах О и Е (0–5 см) на пройденном пожаром участке леса и в горизонте Е на горевшей вырубке, тогда как на не горевшей вырубке – превышает контроль на 30–40 %. Повышение значений  $qCO_2$  после пожаров и рубок за счет высокой интенсивности БД наряду с потерей микробной



биомассы при сгорании органического вещества указывает на потерю углерода почвой (Anderson, Domsch, 1993) и демонстрирует наибольшую нарушенность микробиомов в почве сосняка лишайникового. В стрессовых условиях снижается эффективность использования органического субстрата микроорганизмами, когда большая часть субстрата «катаболизируется» до  $\text{CO}_2$ , а меньшая – вовлекается в микробную биомассу (Joergensen, Emmerling, 2006). Полученные значения  $q\text{CO}_2$  для пройденных пожарами участков леса и вырубок в сосняках лишайниковых ниже, чем после высокоинтенсивных пожаров в сосняках и березняках центральных районов Забайкальского края (Bogorodskaya et al., 2023), и сравнимы с полученными данными для песчаных подзолов сосняков лишайниково-зеленомошных Нижнего При-

ангарья (Богородская, Иванова, 2020; Иванова и др., 2022) и Сымской равнины (Богородская, Сорокин, 2014) Красноярского края, находящихся на восстановительных послепожарных сукцессиях. Отмеченное увеличение  $q\text{CO}_2$  на исследуемых вырубках согласуется с таковым, полученным для пятилетних вырубок в лишайниково-зеленомошных сосняках, произрастающих на песчаных подзолах Нижнего Приангарья (Богородская, Иванова, 2020), и ниже, чем в дерново-подзолистых почвах на однолетних вырубках в сосняках разнотравно-зеленомошных (Богородская, Кукавская, 2016).

Численность и структура эколого-трофических групп микроорганизмов также отражают значительные изменения микробиомов в подстилке и верхней части подзолистого горизонта после пожаров и руб-

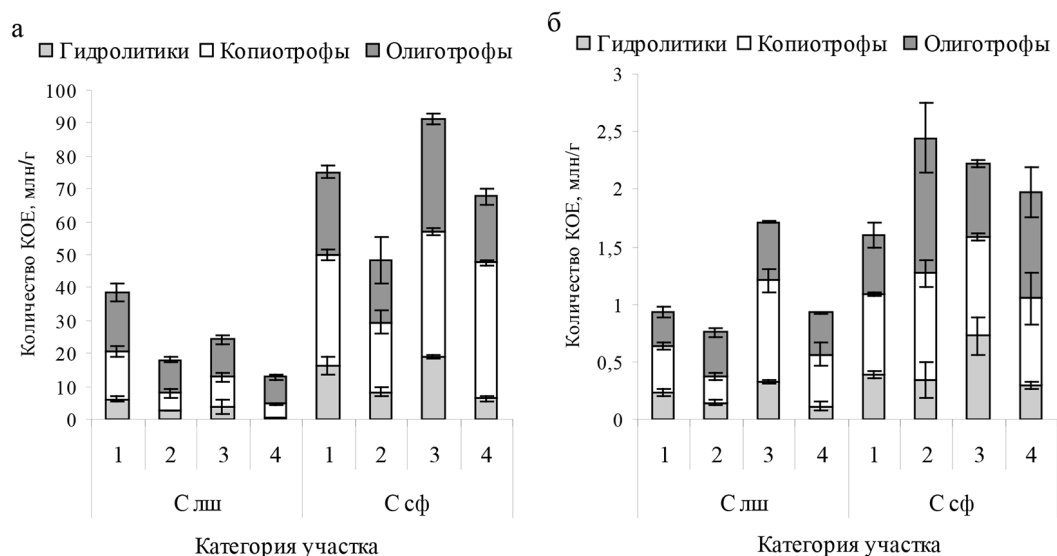


Рис. 5. Численность и структура эколого-трофических групп микроорганизмов в подстилке (а) и подзолистом горизонте (0–5 см) (б) почв исследуемых сосняков. Указаны средние значения и стандартные отклонения ( $n=3$ ). Категория участков: 1 – насаждение; 2 – насаждение, пройденное пожаром; 3 – вырубка; 4 – вырубка, пройденная пожаром. С лш – сосняк лишайниковый; С сф – сосняк сфагновый

Fig. 5. The number and structure of ecological-trophic groups of microorganisms in the duff (а) and podzolic horizon (0–5 cm) (б) of soils of the study pine forests. Mean values and standard deviations are shown ( $n=3$ ). Category of sites: 1 – unlogged/unburned (control); 2 – unlogged/burned; 3 – logged/unburned; 4 – logged/burned. P lh – lichen pine forest; P sf – sphagnum pine forest

ки леса (рис. 5). Максимальное снижение численности ЭКТГМ отмечено в подстилке пройденной пожаром вырубке в сосняке лишайниковом: количество КОЕ гидролитиков и копиотрофов ниже контроля в 3,5–11 раз, олиготрофов – более чем в 2 раза. На других категориях участков в подстилке сосняка лишайникового численность разных групп также ниже контроля в 1,5–2,5 раза. В подзолистом горизонте сосняка лишайникового, пройденного пожаром, в 1,5–2 раза снижено только количество гидролитиков, тогда как на вырубке численность всех ЭКТГМ выше контроля.

В подстилке пройденных пожарами насаждений и вырубок сосняка сфагнового отмечено снижение количества гидролитиков в 2–2,5 раза, тогда как количество копиотрофов и олиготрофов снижено незначительно. В подзолистом горизонте численность всех групп либо сравнима с контролем, либо несколько выше. На вырубке количество всех групп микроорганизмов увеличивалось, по сравнению с контрольным насаждением, как в подстилке, так и в горизонте Е.

После пожаров на вырубках и в насаждениях, как правило, доминирует олиготрофная группировка, что свидетельствует о возрастании олиготрофности почв, тогда как количество гидролитиков и копиотрофов чаще снижается, поскольку зависит от поступления в почву свежего и легкодоступного органического вещества (Мошкина и др., 2019).

Исследуемые микробиологические параметры ( $C_{\text{мик}}$ , БД, количество гидролитиков, копиотрофов, олиготрофов) на вырубках и пройденных пожарами участках леса и вырубок имели положительную высокую корреляцию с  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,94, 0,98, 0,82, 0,90, 0,94$ , соответственно) и с влажностью почвы ( $r = 0,93, 0,86, 0,87, 0,97, 0,92$ ) и обратную связь с pH ( $r = -0,77, -0,82, -0,76, -0,97, -0,92$ ).

С температурой почвы зависимость выявлена только для БД ( $r = 0,49$ ). Содержание  $C_{\text{мик}}$  и интенсивность БД в почвах после пожаров и рубок имели тесную корреляцию с численностью ЭКТГМ ( $r = 0,86–0,99$ ), что указывает на высокие индикационные характеристики рассматриваемых параметров микробиомов при данных видах антропогенных нарушений (Гродницкая, 2013).

Общие запас  $C_{\text{мик}}$  и микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  в исследуемом профиле торфяно-подзолов в ненарушенном сосняке сфагновом достигают  $43,8 \text{ г/м}^3$  и  $88,2 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$  соответственно, что в 3,6–3,7 раза выше, чем в профиле песчаного подзола контрольного сосняка лишайникового ( $11,7 \text{ г/м}^3$  и  $24,8 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ), при этом максимальные различия (в 8,5–11,3 раза) приходится на подстилку (рис. 6), мощность которой почти в 8 раз выше в сосняке сфагновом (табл.). Профильное распределение запасов углерода микробной биомассы и микробного продуцирования  $\text{CO}_2$  в подзолах двух типов сосняков также отличается: 60 и 74 % соответственно приходится на подстилку в сосняке сфагновом ( $26,1 \text{ г/м}^3$  и  $65,2 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ), тогда как в сосняке лишайниковом 50 и 57 % приходится на подзолистый горизонт ( $6,6 \text{ г/м}^3$  и  $12,3 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ).

Запасы углерода микробной биомассы и микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  в верхней части профиля песчаных подзолов сосняков лишайниковых и торфяно-подзолов сосняков сфагновых среднетаежной подзоны в 1,5–3 раза ниже, чем в песчаных подзолах Нижнего Приангарья (Богородская, Иванова, 2020), и значительно ниже, чем в верхней части профиля дерново-подзолистых почв лиственных насаждений Саянского района и светлохвойных лесов Нижнего Приангарья (Богородская, Кукавская, 2016), а также в почвах южно- и среднетаежных лесов Европей-

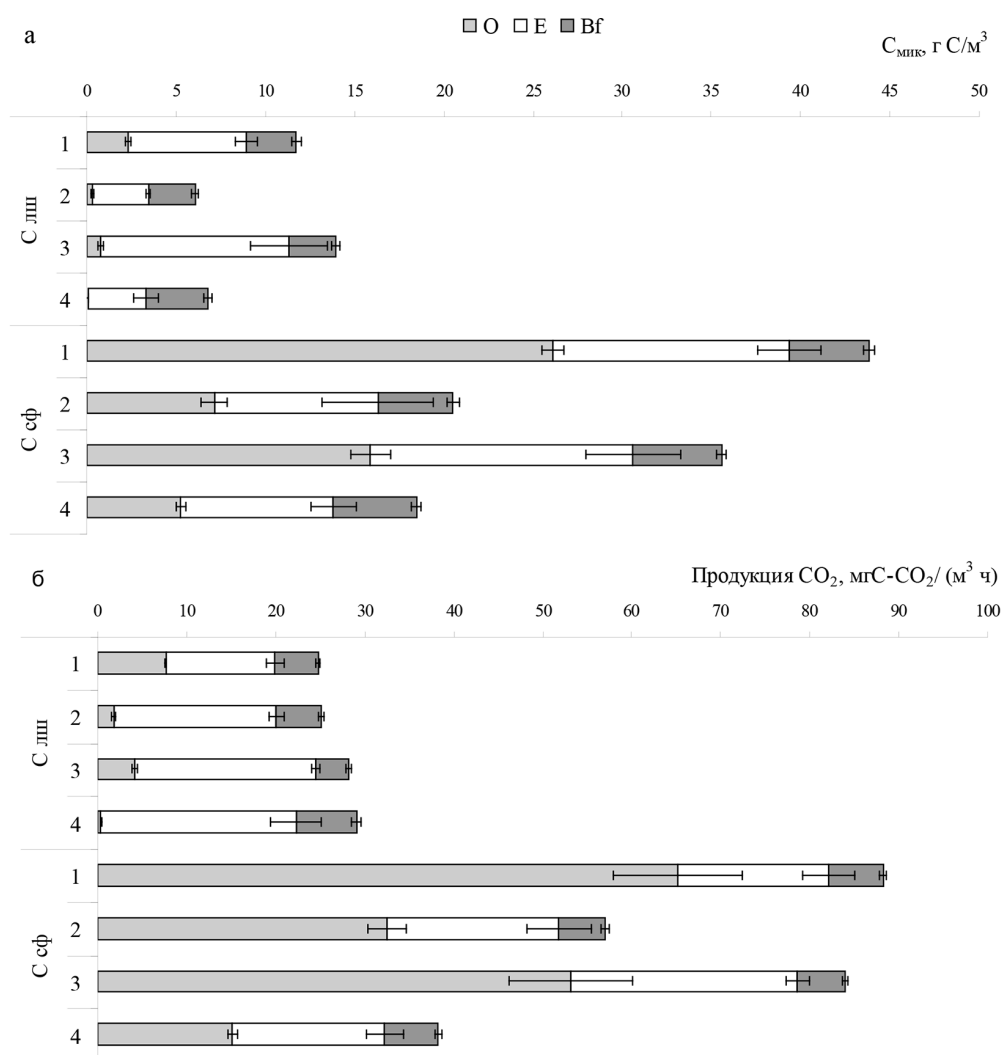


Рис. 6. Запас углерода микробной биомассы (а) и микробная продукция CO<sub>2</sub> (б) в верхних горизонтах подзолов исследуемых сосняков. Указаны средние значения и стандартные отклонения (n=3). Категория участков: 1 – насаждение; 2 – насаждение, пройденное пожаром; 3 – вырубка; 4 – вырубка, пройденная пожаром. С лш – сосняк лишайниковый; С сф – сосняк сфагновый

Fig. 6. Carbon stock of microbial biomass (а) and microbial CO<sub>2</sub> production (б) in the upper horizons of podzols of the study pine forests. Mean values and standard deviations are shown (n=3). Category of sites: 1 – unlogged/unburned (control); 2 – unlogged/burned; 3 – logged/unburned; 4 – logged/burned. P lh – lichen pine forest; P sf – sphagnum pine forest

ской России (Susyan et al., 2009; Stolnikova et al., 2011), поэтому изучаемые подзолы по запасам микробного компонента можно считать крайне бедными.

После пожаров и рубок происходит трансформация профильного распределения запасов  $C_{\text{мик}}$  и микробного продуцирования

углекислого газа (рис. 6). В сосняках независимо от их типа на пройденных пожарами участках леса и вырубках общий запас  $C_{\text{мик}}$  снижен в 1,7–2,4 раза, тогда как общая микробная продукция CO<sub>2</sub> – в 1,6–2,3 раза ниже контроля в сосняке сфагновом и несколько выше в сосняке лишайниковом (рис. 6).

На вырубке в сосняке лишайниковом общие запасы  $C_{\text{мик}}$  и микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  выше контроля на 14 и 19 % соответственно, тогда как на вырубке в сосняке сфагновом – ниже контроля на 20 и 5 %. Максимальное снижение запасов  $C_{\text{мик}}$  и микробного продуцирования  $\text{CO}_2$  на всех категориях участков наблюдается в подстилке, при этом минимальные значения отмечены на пройденной пожаром вырубке в сосняке лишайниковом ( $0,05 \text{ г/м}^3$  и  $0,34 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ). Также отмечено снижение долевого участия подстилки в общих запасах на исследуемый профиль подзолов. Запас  $C_{\text{мик}}$  в подзолистом горизонте почв вырубок выше контроля на 60 и 12 % для сосняков лишайникового и сфагнового соответственно, тогда как на пройденных пожарами участках леса и вырубках ниже контроля в 1,5–2 раза. Микробное продуцирование  $\text{CO}_2$  в подзолистом горизонте выше контроля на 50–79 % в сосняке лишайниковом на всех категориях участков, достигая максимума на пройденной пожаром вырубке ( $21,95 \text{ мг С-}\text{CO}_2/(\text{м}^3 \times \text{ч})$ ). В сосняке сфагновом достоверное увеличение данного показателя отмечено только на вырубке.

Уровень трансформации общих запасов  $C_{\text{мик}}$  и микробного продуцирования  $\text{CO}_2$  в профиле подзолов исследуемых сосняков через четыре года после пожаров согласуется с аналогичными данными, полученными для песчаных подзолов сосняков Нижнего Приангарья после среднеинтенсивных пожаров, и ниже, чем после пожаров высокой интенсивности, когда рассматриваемые величины не восстановились и спустя 8 лет (Богородская, Иванова, 2020). На четырехлетних вырубках в исследуемых сосняках изменение рассматриваемых величин ниже, чем на свежих и трех-, пятилетних вырубках в сосняках Нижнего Приангарья (Богородская, Кукавская, 2016; Богородская, Иванова, 2020), где

отмечалась большая механическая нарушенность верхних горизонтов почв при рубке леса.

Таким образом, в сосняке лишайниковом через четыре года после пожаров в насаждениях и на вырубке отмечено повышение микробного продуцирования  $\text{CO}_2$  на фоне снижения общих запасов  $C_{\text{мик}}$  в профиле песчаного подзола, что демонстрирует преобладание минерализационных процессов и потерю углерода почвой. На пройденных пожарами участках леса и вырубках в сосняках сфагновых и на вырубках в обоих типах леса дисбаланса в процессе минерализации/иммобилизации углерода профилем подзолов не выявлено.

## Заключение

Проведенные исследования подтвердили выдвинутые гипотезы по влиянию условий местопроизрастания и нарушающих факторов на степень трансформации микробиомов почв средней тайги Средней Сибири. Исследуемые сосняки различались эдафическими условиями почв: в верхних органо-минеральных горизонтах песчаного подзола сосняка сфагнового в 1,7–4,5 раза выше влажность, кислотность, содержание  $C_{\text{орг}}$  (в подстилке в 2 раза, в минеральных горизонтах – на 30–60 %), температура почвы ниже, чем в сосняке лишайниковом. Различия почвенных условий отразились на характеристиках микробиомов подзолов изученных сосняков: в сосняке сфагновом содержание  $C_{\text{мик}}$ , интенсивность БД в 1,5–2,5 раза, запасы микробной биомассы и продуцирование  $\text{CO}_2$  в профиле почвы почти в 4 раза и численность разных ЭКТГМ в 1,5–2,6 раза выше, чем в сосняке лишайниковом.

В подстилках насаждений и вырубках, пройденных пожарами, содержание  $C_{\text{мик}}$  снижается в 2–3,5 раза, интенсивность БД –

на 30–40 %, количество гидролитиков – в 2–11 раз,  $q\text{CO}_2$  возрастает в 1,7–5,6 раза, повышается олиготрофность почв, тогда как в минеральной части профиля подзолов значительные изменения исследуемых параметров микробиомов отмечены только в сосняке лишайниковом. Общий запас  $C_{\text{мик}}$  в верхней части профиля подзолов снижается в 1,7–2,4 раза в насаждениях и на вырубках, пройденных пожарами, обоих типов сосняков, тогда как микробная продукция  $\text{CO}_2$  – в 1,6–2,3 раза ниже контроля в сосняке сфагновом и на 2–18 % выше в сосняке лишайниковом. На не горевших вырубках наблюдается снижение рассматриваемых параметров микробиомов только в подстилках, тогда как в подзолистом горизонте они выше контрольных значений.

Воздействие пожаров и рубок значительно проявляется в сосняке лишайниковом, по сравнению с сосняком сфагновым, где

более влажные эдафические условия почв и большая мощность подстилки предохраняют минеральные горизонты почв от действия нарушающих факторов. Максимальная трансформация микробиомов песчаных подзолов отмечена на вырубке, пройденной пожаром, в сосняке лишайниковом. Повышение микробного продуцирования  $\text{CO}_2$  на фоне снижения общих запасов  $C_{\text{мик}}$  в профиле песчаного подзола демонстрирует дисбаланс минерализации/иммобилизации углерода почвой в сосняке лишайниковом после пожаров в насаждениях и на вырубке.

Увеличение площади антропогенно- и техногенно-нарушенных лесных экосистем в Сибири обуславливает необходимость региональных исследований микробиомов почв в насаждениях, нарушенных пожарами и рубками, с целью оценки отклика функциональной активности почв на изменение окружающей среды.

## Список литературы / References

*Анализ тепличных грунтов и их компонентов* (2017) Гиниятуллин К.Г., Валеева А.А., Смирнова Е.В. (составители) Казань, Казанский университет, 66 с. [*Analysis of greenhouse soils and their components* (2017) Giniyatullin K. G., Valeeva A. A., Smirnova E. V. (compilers) Kazan, Kazan University, 66 p. (in Russian)]

Анучин Н.П. (1982) *Лесная таксация: Учебник для вузов. 5-е издание*. Москва, Лесная промышленность, 552 с. [Anuchin N. P. (1982) *Forest taxation: Textbook for universities. 5th Edition*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 552 p. (in Russian)]

Бабинцева Р.М., Горбачев В.Н., Сорокин Н.Д. (1984) Экологические аспекты лесовосстановления при современных лесозаготовках. *Лесоведение*, 5: 19–25 [Babintseva R. M., Gorbachev V. N., Sorokin N. D. (1984) Ecological aspects of reforestation during modern logging. *Russian Journal of Forest Science* [Lesovedenie], 5: 19–25 (in Russian)]

Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мошкина Е.В., Ткаченко Ю.Н., Мамай А.В., Новиков С.Г., Мошников С.А., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю. (2022) Пространственная вариабельность свойств подзолов в зависимости от растительных микрогруппировок в сосняке брусничном. *Лесоведение*, 1: 47–60 [Bakhmet O. N., Medvedeva M. V., Moshkina Ye. V., Tkachenko Yu. N., Mamay A. V., Novikov S. G., Moshnikov S. A., Timofeeva V. V., Karpechko A. Yu. (2022) Spatial variability of podzol properties depending on the plant microgroups on the example of the cowberry pine forests. *Russian Journal of Forest Science* [Lesovedenie], 1: 47–60 (in Russian)]

Богородская А.В., Иванова Г.А. (2020) Оценка состояния микробных комплексов почв после пожаров и рубок в сосняках Нижнего Приангарья. *Сибирский лесной журнал*, 3: 37–50 [Bogorodskaya A. V., Ivanova G. A. (2020) Evaluation of soil microbial complexes after fires and logging in pine forests of the Lower Priangar'e. *Siberian Journal of Forest Science* [Sibirskii lesnoi zhurnal], 3: 37–50 (in Russian)]

Богородская А.В., Кукавская Е.А. (2016) Состояние микробных сообществ в почвах лиственных и светлосвойных лесов Средней Сибири после рубок и пожаров. *Лесоведение*, 5: 383–396 [Bogorodskaya A. V., Kukavskaya E. A. (2016) Activity of soil microbial communities in deciduous and light coniferous forests in Central Siberia after cuts and fires. *Russian Journal of Forest Science* [Lesovedenie], 5: 383–396 (in Russian)]

Богородская А.В., Сорокин Н.Д. (2014) Воздействие пожаров на почвенные микробные комплексы среднетаежных сосняков. *Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири*. Евдокименко М.Д. (ред.) Новосибирск, Наука, с. 181–200 [Bogorodskaya A. V., Sorokin N. D. (2014) Impact of fires on soil microbial complexes of middle taiga pine forests. *The impact of fires on the components of the ecosystem of middle taiga pine forests of Siberia*. Evdokimenko M. D. (Ed.) Novosibirsk, Nauka, p. 181–200 (in Russian)]

Буряк Л.В., Каленская О.П., Кукавская Е.А., Лузганов А.Г. (2022) Зонально-географические особенности воздействия пожаров на лесообразование светлосвойных насаждений юга Сибири. Новосибирск, Наука, 284 с. [Buryak L. V., Kalenskaya O. P., Kukavskaya E. A., Luzganov A. G. (2022) Zonal-geographical features of the impact of fires on forest formation of light coniferous stands in the south of Siberia. Novosibirsk, Nauka, 284 p. (in Russian)]

Валендик Э.Н., Верховец С.В., Кисилыхов Е.К., Иванова Г.А., Брюханов А.В., Косов И.В., Голдаммер И.Г. (2011) *Технологии контролируемых выжиганий в лесах Сибири*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 160 с. [Valendik E. N., Verkhovets S. V., Kisilyakhov E. K., Ivanova G. A., Bryukhanov A. V., Kosov I. V., Goldammer I. G. (2011) *Technologies of controlled burning in the forests of Siberia*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 160 p. (in Russian)]

ГОСТ 27753.10–88. Грунты тепличные. Метод определения органического вещества (1990) Москва, Стандартинформ, 4 с. [GOST 27753.10–88. Greenhouse soils. Method for determination of organic matter (1990) Moscow, Standartinform, 4 p. (in Russian)]

Гродницкая И.Д. (2013) Эколого-микробиологическая индикация и биоремедиация почв естественных и нарушенных лесных экосистем Сибири. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. Красноярск, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 35 с. [Grodnitskaya I. D. (2013) *Ecological and microbiological indication and bioremediation of soils of natural and disturbed forest ecosystems of Siberia. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences*. Krasnoyarsk, V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 35 p. (in Russian)]

Дымов А.А. (2018) Почвы послерубочных, постпирогенных и постагрогенных лесных экосистем северо-востока европейской части России. Автореферат на соискание ученой степени доктора биологических наук. Москва, МГУ, 48 с. [Dymov A. A. (2018) *Soils of post-logging, post-pyrogenic and post-agrogenic forest ecosystems of the north-east of the European part of Russia. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences*. Moscow, Moscow State University, 48 p. (in Russian)]



Иванов В.В. (2005) Экологические последствия механизированных лесозаготовок в южной тайге Красноярского края. *Лесоведение*, 2: 3–8 [Ivanov V. V. (2005) Ecological consequences of mechanized logging operations in southern taiga of Krasnoyarsk Krai. *Russian Journal of Forest Science* [Lesovedenie], 2: 3–8 (in Russian)]

Иванова Г.А., Иванов А.В. (2015) *Пожары в сосновых лесах Средней Сибири*. Новосибирск, Наука, 240 с. [Ivanova G. A., Ivanov A. V. (2015) *Fires in the pine forests of Central Siberia*. Novosibirsk, Nauka, 240 p. (in Russian)]

Иванова Г.А., Кукавская Е.А., Безкоровая И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Тарасов П.А. (2022) *Воздействие пожаров на светлехвойные леса Нижнего Приангарья*. Новосибирск, Наука, 204 с. [Ivanova G. A., Kukavskaya E. A., Bezkorovaynaya I. N., Bogorodskaya A. V., Zhila S. V., Ivanov V. A., Kovaleva N. M., Krasnoshchekova E. N., Tarasov P. A. (2022) *Impact of fires on light coniferous forests of the Lower Angara region*. Novosibirsk, Nauka, 204 p. (in Russian)]

Курбатский Н.П. (1970) Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск, с. 5–58 [Kurbatsky N. P. (1970) A study of the quantity and properties of forest combustible materials. *Questions of forest pyrology*. Krasnoyarsk, p. 5–58 (in Russian)]

Мошкина Е.В., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мамай А.В., Зачиняева А.В., Ткаченко Ю.Н. (2019) Микробиологические особенности почв в растительных микрогруппировках среднетаежного сосняка брусничного в Карелии. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*, 11: 107–121 [Moshkina E. V., Bakhmet O. N., Medvedeva M. V., Mamai A. V., Zachinyaeva A. V., Tkachenko Yu. N. (2019) Microbiological characteristics of soils under vegetation microgroups in a middle-taiga cowberry pine forest in Karelia. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* [Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk], 11: 107–121 (in Russian)]

Паутов Ю.А., Ильчуков С.В. (2001) Пространственная структура производных насаждений на сплошных концентрированных вырубках в Республике Коми. *Лесоведение*, 2: 27–32 [Pautov Yu. A., Ilchukov S. V. (2001) Spatial structure of secondary plantings on clear concentrated fellings in the Komi Republic. *Russian Journal of Forest Science* [Lesovedenie], 2: 27–32 (in Russian)]

*Практикум по микробиологии* (2005) Нетрусов А.И. (ред.) Москва, Academia, 603 с. [Practical training in microbiology (2005) Netrusov A. I. (Ed.) Moscow, Academia, 603 p. (in Russian)]

Сукачев В.Н., Зонн С.В. (1961) *Методические указания по изучению типов леса*. Москва, Издательство АН СССР, 144 с. [Sukachev V. N., Zonn S. V. (1961) *Methodical instructions for studying forest types*. Moscow, AS USSR, 144 p. (in Russian)]

*Теория и практика химического анализа почв* (2006) Воробьева Л.А. (ред.) Москва, ГЕОС, 400 с. [Theory and practice of chemical analysis of soils (2006) Vorobyova L. A. (Ed.) Moscow, GEOS, 400 p. (in Russian)]

Тошева Г.П. (1988) *Изменение почвенного покрова на вырубках ельников южной тайги. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Москва, МГУ, 24 с. [Toshcheva G. P. (1988) *Changes in soil cover in cleared areas of spruce forests in the southern taiga. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences*. Moscow, Moscow State University, 24 p. (in Russian)]

Уланова Н.Г. (2007) Механизмы сукцессий растительности сплошных вырубок в ельниках Южной тайги. *Актуальные проблемы геоботаники. Материалы III Всероссийской школы-конференции 24–28 сентября 2007*. Петрозаводск, Издательство КарНЦ РАН, с. 199–211 [Ulanova N. G. (2007) Mechanisms of vegetation succession in clear-cut areas in spruce forests of the Southern taiga. *Current problems of geobotany. Proceedings of III All-Russian school-conference September 24–28, 2007*. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, p. 199–211 (in Russian)]

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. (2004) *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск, Ойкумена, 342 с. [Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. (2004) *Classification and diagnostics of soils of Russia*. Smolensk, Oikumena, 342 p. (in Russian)]

Ananyeva N. D., Susyan E. A., Gavrilenko E. G. (2011) Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration. *Eurasian Soil Science*, 44(11): 1215–1221

Anderson J. P. E., Domsch K. H. (1978) A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(3): 215–221

Anderson T. H., Domsch K. H. (1993) The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> ( $q\text{CO}_2$ ) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3): 393–395

Bergeron S. P., Bradley R. L., Munson A., Parsons W. (2013) Physico-chemical and functional characteristics of soil charcoal produced at five different temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 58: 140–146

Bogorodskaya A. V., Kukavskaya E. A., Kalenskaya O. P., Buryak L. V. (2023) Changes in the microbiological and physicochemical properties of soils after fires in pine and birch forests in the central part of the Zabaikalsky krai. *Eurasian Soil Science*, 56(11): 1707–1723

Busse M. D., Hubbert K. R., Fiddler G. O., Shestak C. J., Powers R. F. (2005) Lethal soil temperatures during burning of masticated forest residues. *International Journal of Wildland Fire*, 14(3): 267–276

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. (2021) The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 488: 118989

Cutler N. A., Arróniz-Crespo M., Street L. E., Jones D. L., Chaput D. L., DeLuca T. H. (2017) Long-term recovery of microbial communities in the boreal bryosphere following fire disturbance. *Microbial Ecology*, 73(1): 75–90

Dobrovol'skaya T. G., Zvyagintsev D. G., Chernov I. Yu., Golovchenko A. V., Zenova G. M., Lysak L. V., Manucharova N. A., Marfenina O. E., Polyanskaya L. M., Stepanov A. L., Umarov M. M. (2015) The role of microorganisms in the ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*, 48(9): 959–967

Dymov A. A. (2017) The impact of clear-cutting in boreal forests of Russia on soils: a review. *Eurasian Soil Science*, 50(7): 780–790

Dymov A. A., Startsev V. V., Yakovleva E. V., Dubrovskiy Y. A., Milanovsky E. Y., Severgina D. A., Panov A. V., Prokushkin A. S. (2023) Fire-induced alterations of soil properties in albic podzols developed under pine forests (middle taiga, Krasnoyarsky kray). *Fire*, 6(2): 67

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. (2015) Boreal forest health and global change. *Science*, 349(6250): 819–822

Gorbach N.M., Kutuyavin I.N., Startsev V.V., Dymov A.A. (2021) Dynamics of fires in the northeast of the European part of Russia in the Holocene. *Theoretical and Applied Ecology*, 3: 104–110 (in Russian)

Holden S.R., Rogers B.M., Treseder K.K., Randerson J.T. (2016) Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire. *Environmental Research Letters*, 11(3): 035004

IUSS Working Group WRB (2015) *World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources reports. No. 106*. FAO, Rome

Joergensen R.G., Emmerling C. (2006) Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3): 295–309

Jones M.W., Abatzoglou J.T., Veraverbeke S., Andela N., Lasslop G., Forkel M., Smith A.J. P., Burton C., Betts R.A., van der Werf G.R., Sitch S., Canadell J.G., Santin C., Kolden C., Doerr S.H., Le Quéré C. (2022) Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60(3): e2020RG000726

Koshurnikova N., Verkhovets S., Antamoshkina O., Trofimova N., Zlenko L., Zhuikov A. (2015) Assessment of Central Siberia forest ecosystems sustainability to forest fires: academic research outcomes. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 214: 1008–1018

Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Ivanova G. A., Conard S. G., Kalenskaya O. P., Zhila S. V., McRae D. J. (2013) Influence of logging on the effects of wildfire in Siberia. *Environmental Research Letters*, 8(4): 045034

Loehman R.A., Reinhardt E., Riley K.L. (2014) Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees-A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 317: 9–19

Ludwig S.M., Alexander H.D., Kielland K., Mann P.J., Natali S.M., Ruess R.W. (2018) Fire severity effects on soil carbon and nutrients and microbial processes in a Siberian larch forest. *Global Change Biology*, 24(12): 5841–5852

Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E. A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. (2022) Microbiological indicators of soil ecological functions: a review. *Eurasian Soil Science*, 55(2): 221–234

Pellegrini A.F. A., Harden J., Georgiou K., Hemes K.S., Malhotra A., Nolan C.J., Jackson R.B. (2022) Fire effects on the persistence of soil organic matter and long-term carbon storage. *Nature Geoscience*, 15(1): 5–13

Pingree M.R. A., Kobziar L.N. (2019) The myth of the biological threshold: A review of biological responses to soil heating associated with wildland fire. *Forest Ecology and Management*, 432: 1022–1029

Saccà M.L., Barra Caracciolo A., Di Lenola M., Grenni P. (2017) Ecosystem services provided by soil microorganisms. *Soil biological communities and ecosystem resilience. Sustainability in plant and crop protection*. Lukac M., Grenni P., Gamboni M. (Eds.) Springer, Cham, p. 9–24

Santin C., Doerr S.H., Merino A., Bryant R., Loader N.J. (2016) Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration. *Geoderma*, 264(Part A): 71–80

Shvetsov E. G., Kukavskaya E. A., Shestakova T. A., Laflamme J., Rogers B. M. (2021) Increasing fire and logging disturbances in Siberian boreal forests: a case study of the Angara region. *Environmental Research Letters*, 16(11): 115007

Stolnikova E. V., Ananyeva N. D., Chernova O. V. (2011) The microbial biomass and its activity and structure in the soils of old forests in the European Russia. *Eurasian Soil Science*, 44(4): 437–452

Susyan E. A., Ananyeva N. D., Gavrilenko E. G., Chernova O. V., Bobrovskii M. V. (2009) Microbial biomass carbon in the profiles of forest soils of the southern taiga zone. *Eurasian Soil Science*, 42(10): 1148–1155

Susyan E. A., Wirth S., Ananyeva N. D., Stolnikova E. V. (2011) Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO<sub>2</sub> respiration activity. *European Journal of Soil Biology*, 47(3): 169–174

Thom D., Seidl R. (2016) Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 91(3): 760–781