

Микробная биомасса и дыхательная активность почвы вырубki при разном механическом воздействии

© 2025. Д. А. Севергина¹, ст. лаборант,

И. Д. Гродницкая², д. б. н., зав. лабораторией, О. Э. Пашкеева², к. б. н., с. н. с.,

В. В. Старцев¹, к. б. н., н. с., А. А. Дымов¹, д. б. н., в. н. с., зав. отделом,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН,

660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50/28,

e-mail: severgina.darja@gmail.com

Представлены данные по микробиологическим свойствам подзолистых почв (Retisols), которые подверглись воздействию тяжелой колесной лесозаготовительной техники, в первые три года после рубки. Исследование проводилось на разных техногенных участках вырубki: пасечного участка (П) и волоков (ЗП – три прохода лесозаготовительной техники, 10П – десять проходов, 10Р – десять проходов с последующим выравниванием). Углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}} = \text{МБ}$) и скорость микробного продуцирования CO_2 (базальное дыхание, БД) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД). Содержание МБ в исходном лесу составило от 24 до 815 мкг С/г почвы, величины БД – от 0,3 до 32,5 мкг С- CO_2 /г/ч. На пасечном участке в течение трёх лет происходит постепенное увеличение содержания МБ до 2–14 раз по сравнению с исходным лесом. В минеральных горизонтах её значения максимальны в первый год (80 мкг С/г почвы), затем снижаются в восемь раз. На волоках в первые два года наблюдается значительное уменьшение микробного углерода до семи раз, а затем его резкое увеличение на третий год после рубки. Доля $C_{\text{мик}}$ в органическом углероде изученных почв составила от 0,01 до 2,57%. Наибольшие значения этого параметра были выявлены в минеральных горизонтах почв участков волоков. Вклад углерода микробного происхождения в углерод водорастворимых соединений больше, чем в общий углерод. Можно утверждать, что в изменённых почвах вырубki идёт интенсивное накопление микробного углерода, особенно в углероде водорастворимых соединений, на третий год после рубки.

Ключевые слова: сплошная вырубка, подзолистые почвы, субстрат-индуцированное дыхание, микробная биомасса, почвенное органическое вещество.

Microbial biomass and respiratory activity of clear-cutting soils exposed to different mechanical effects

© 2025. D. A. Severgina¹ ORCID: 0000-0002-3464-2744, I. D. Grodnitskaya² ORCID: 0000-0002-2689-3711

O. E. Pashkeeva² ORCID: 0000-0002-1741-1055, V. V. Startsev¹ ORCID: 0000-0002-6425-6502

A. A. Dymov¹ ORCID: 0000-0002-1284-082X

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS,

50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,

e-mail: severgina.darja@gmail.com

Data on microbiological properties of podzolic soils (Retisols) in the first three years after logging that were exposed to heavy wheeled logging equipment are presented. The study was conducted on different technogenic logging plots: apiary plot (A) and trails (ЗП – three passes of logging equipment, 10П – ten passes, 10R – ten passes by leveling). Microbial biomass carbon ($C_{\text{mic}} = \text{MB}$) and microbial CO_2 production rate (basal respiration, BR) were determined by the substrate-induced respiration method (SIR). MB content in the initial forest ranged from 24 to 815 $\mu\text{gC/g}$ soil, and BR values ranged from 0.3 to 32.5 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g/h}$. The apiary plot shows a gradual increase in MB content up to 2–14 times higher than the original forest over three years. In mineral horizons its values are maximum in the first year

(80 $\mu\text{gC/g}$ soil), then they decrease by eight times. There is a significant decrease in microbial carbon up to seven times in the first two years, followed by a sharp increase in the third year after logging in skidding trails. The share of C_{mic} in the soil organic carbon of the studied soils ranged from 0.01 to 2.57%. The highest values of this parameter were detected in the mineral horizons of soils of the skidding trails. The share of C_{mic} to water-soluble organic soil carbon is greater than that to the total carbon. It can be stated that in the modified soils of young clearcuts there is intensive accumulation of microbial carbon especially in carbon of water-soluble compounds in the third year after logging.

Keywords: felling, Retisols, substrate-induced respiration (SIR), microbial biomass, soil organic matter.

Лесные экосистемы играют важную роль в поддержании и сохранении биологического разнообразия, снижают негативные проявления антропогенного воздействия на природу, стабилизируют происходящие биосферные процессы. Лесам принадлежит основная роль в регулировании круговорота биофильных элементов (в том числе, углерода) в наземных экосистемах [1, 2]. Одними из значимых антропогенных факторов, напрямую влияющих на изменение структурной организации таёжных биоценозов и естественных потоков вещества в них, являются лесозаготовительные мероприятия [3], которые существенно изменяют физико-химические свойства почвы, их водный, воздушный и гидротермический режимы. В результате происходит изменение количества и стабильности органического вещества, что оказывает непосредственное влияние на биологические свойства почв [4, 5].

Лесные экосистемы подвергаются возрастающему антропогенному воздействию с XVII–XVIII веков [6, 7]. В течение предыдущих 20 лет всё больше лесозаготовительных предприятий используют многооперационные машины (харвестер, форвардер), которыми в настоящее время заготавливается до 90% всей древесины в Республике Коми [8, 9].

Территория вырубок неоднородна по степени воздействия на почвы. Основные нарушения почвенного покрова находятся на трелёвочных волоках, которые могут достигать от 18 до 29% от площади лесосеки [10, 11].

Подобные экологические нарушения изменяют биохимические процессы и естественные потоки вещества в них [12, 13], что в первую очередь отражается на сообществе почвенных микроорганизмов [14]. Процессы микробиологической трансформации углерода в лесных почвах Севера имеют свои особенности и в значительной степени определяют лесорастительную способность почв [15, 16]. Исследование микробиологической трансформации углерода в лесных экосистемах средней тайги имеет большое диагностическое значение, так как даёт возможность количественно оценить биогенную составляющую баланса углерода, его динамику и направленность

потоков в почве на ранних стадиях влияния меняющихся экологических и антропогенных факторов [17–19].

Цель данной работы заключалась в оценке содержания углерода микробной биомассы и её дыхательной активности в подзолистой почве вырубки при разной интенсивности воздействия колесной лесозаготовительной техники в первые три года после рубки.

Объекты и методы исследования

Для оценки изменений почв был организован полевой эксперимент, в рамках которого был подобран участок хвойно-лиственного насаждения, развивающегося на подзолистых почвах. В период полевого сезона 2020 г. была исследована почва под исходным лесом, который в дальнейшем (декабрь 2020 г.) был вырублен. Детальная характеристика особенностей морфологического строения и физико-химических свойств почв представлена нами ранее [20, 21]. Для оценки влияния лесозаготовительной техники на почвы было исследовано четыре участка: пасечный участок лесосеки (П), волок с тремя проходами форвардера (3П), волок с десятью проходами (10П), а также участок, на котором производили выравнивание колеи после десяти проходов форвардера (10Р). Диагностика трансформируемых почв проводилась согласно [22] с учётом рекомендаций по оценке свойств турбированных почв [5, 9].

Отбор проб проводился в июле на протяжении четырёх лет с 2020 по 2023 гг. На каждом технологическом участке вырубки отбирали почвенные образцы до глубины 20 см. Химический анализ почв проводили в аккредитованной экоаналитической лаборатории и отделе почвоведения Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$, %) определяли на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba). Водорастворимый органический углерод почвы определяли как водорастворимую ($C_{\text{вс}}$, %) фракцию общего углерода с помощью анализатора TOC-VCPN (Япония, Shimadzu) с модулем TNM-1. Кислотность почв определялась с помощью Edge

HI20002-02 pH-метра (Hanna Instruments, США) с цифровым электродом ($\pm 0,01$ pH) при соотношении почва:раствор – для подстилок – 1:25, для минеральных горизонтов 1:2,5 [23]. Во всех почвенных образцах влажность (%) была определена по ГОСТ 28268-89. Дыхательную (респирометрическую) активность микроорганизмов определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) с использованием газового хроматографа Agilent 6890 N (США). По количеству выделяемого почвенными микроорганизмами CO_2 определяли микробную биомассу (МБ ($\text{C}_{\text{мик}}$)) и базальное дыхание (БД) [24–26]. Вклад микробного углерода ($\text{C}_{\text{мик}}$, %) в общее органическое вещество рассчитывали как $\text{C}_{\text{мик}}/\text{C}_{\text{общ}} \cdot 100$. Вклад микробного углерода ($\text{C}_{\text{мик}}$, %) в водорастворимое органическое вещество рассчитывали как $\text{C}_{\text{мик}}/\text{C}_{\text{вс}} \cdot 100$ [15].

Эксперименты проводили в трёхкратной повторности, приведено среднее значение $\pm$ ошибка среднего ($M \pm m$). Статистическую обработку проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2013.

Результаты и обсуждение

Подзолистая почва исходного леса (ИЛ) характеризуется от сильноокислых до близких к нейтральным значениями pH (от 4,7 до 5,6) в органогенных горизонтах (табл. 1). Верхний минеральный горизонт (EL) также характеризуется как сильноокислый (pH 4,8). Кислотность подстилки пасечного участка, как и в почвах участка волока с тремя проходами (ЗП), смещается ближе к нейтральной среде, pH варьирует от 4,8 до 5,8. В элювиальном горизонте значения кислотности на пасечном участке идентичны значениям исходного леса. В минеральном горизонте волока с тремя проходами форвардера значения pH увеличились на 0,3 единицы с 2021 по 2023 гг. На волоках с десятью проходами в ходе зарастания травяной растительностью и возрастания доли листовенного опада, поступающего на поверхность почв при возобновлении листовенными породами [5], происходит подщелачивание верхнего почвенного горизонта – pH от 4,9 до 5,6.

Влажность почв имеет большое влияние на состояние почвенных микробиомов [17]. Наибольшие изменения на молодых вырубках наблюдаются в органогенных горизонтах пасечного участка и волока с тремя проходами. На пасечном участке влажность в подстилке

претерпевает сильные изменения – в первый год после рубки она снижается в 4 раза (до 8,1%), а затем увеличивается в 2,0–2,5 раза по сравнению с исходными показателями. На ЗП в течение трёх лет наблюдается переувлажнение органогенных горизонтов. Верхние минеральные горизонты являются достаточно стабильными по показателю влажности на обоих участках (от 11,3 до 18,0%). В турбозёмах влажность верхнего горизонта в большинстве случаев сильно не отличалась от влажности элювиального горизонта исходной подзолистой почвы. Наибольшие изменения происходят сразу после рубки: на 10П – наблюдается переувлажнение почвы, а на 10Р – её иссушение.

Содержание общего углерода в исходной подзолистой почве характеризуется регрессивно-аккумулятивным распределением по профилю с максимальными концентрациями в подстилках (от 34,4 до 44,5%) и их уменьшением в минеральном горизонте (0,45%), что типично для данного типа почв [27]. Почвы пасечного участка по содержанию углерода на протяжении трёх лет близки к изначальным значениям. В органогенных горизонтах содержание углерода составляло от 40,0 до 46,2%, а в минеральных – с 0,31 до 0,49%. В элювиальном горизонте наибольшие изменения $\text{C}_{\text{общ}}$ отмечаются на второй год после рубки – его содержание увеличивается в два раза. Скорее всего, это связано с большей пропиткой потёчным органическим веществом при разложении порубочных растительных остатков на второй год после рубки [9].

В почве с тремя проходами форвардера, где наибольшие изменения претерпела лесная подстилка, содержание углерода в органогенных горизонтах было максимально близко к исходным значениям и находилось в пределах от 43,3 до 47,0%. Скорее всего такие результаты можно объяснить тем, что при проведении эксперимента произошло уплотнение нижних органогенных горизонтов O(F) и O(H), но масса накопленных растительных остатков и содержание в них углерода осталось таким же, как и до рубки. В минеральном горизонте содержание общего углерода увеличивается в 1,5–2 раза.

Наибольшие отличия наблюдаются в почвах на волоках с десятью проходами форвардера. Содержание углерода в турбированных горизонтах спустя год после рубки составляло от 0,32 до 2,2%, что обусловлено перемешиванием подстилок с верхними минеральными горизонтами [28]. Спустя два года после рубки

Таблица 1 / Table 1

Свойства исследуемых почв / Properties of the studied soils

Участок Plot	Горизонт Horizon	Год отбора Selection year	pH	W	$C_{\text{общ}} / C_{\text{tot}}$	$C_{\text{вс}} / C_{\text{ws}}$	$C_{\text{мик}} / C_{\text{общ}} / C_{\text{mic}} / C_{\text{tot}}$	$C_{\text{мик}} / C_{\text{вс}} / C_{\text{mic}} / C_{\text{ws}}$
ИЛ / IF	O (L)	2020	5,6±0,2	32,2±1,0	42,9±1,5	1,21	0,02	0,81
	O (F)		4,7±0,2	69,3±2,1	44,5±1,6	0,65	0,18	12,50
	O (H)		4,7±0,2	73,4±2,2	34,4±1,2	0,40	0,07	5,85
	EL		4,8±0,2	14,9±0,4	0,45±0,10	0,01	0,54	22,30
П / A	O (L)	2021	5,8±0,2	8,1±0,4	44,8±1,6	0,53	0,02	1,88
	O (F)		5,3±0,2	52,7±1,6	44,4±1,6	0,38	0,15	16,81
	O (H)		5,0±0,2	72,9±2,2	40,0±1,4	0,26	0,08	11,63
	EL		4,8±0,2	12,8±0,4	0,31±0,07	0,02	2,57	51,70
	O (L)	2022	5,7±0,2	56,6±1,7	45,8±1,6	2,27	0,04	0,78
	O (F+H)		5,1±0,2	72,3±2,2	46,2±1,6	0,64	0,06	4,00
	EL		4,8±0,2	11,3±0,3	1,03±0,24	0,04	0,07	2,02
	O (L)	2023	5,2±0,2	79,5±2,4	44,1±1,5	1,80	0,30	7,44
	O (F)		5,0±0,2	80,6±2,4	44,4±1,6	0,61	0,12	8,87
	O (H)		4,8±0,2	86,2±2,6	42,3±1,5	0,65	0,09	6,06
	EL		4,7±0,2	17,6±0,5	0,49±0,11	0,03	0,20	3,74
ЗП / ЗР	O	2021	5,0±0,2	68,1±2,0	47,0±1,6	0,83	0,08	4,31
	EL		5,0±0,2	12,6±0,4	0,65±0,15	0,01	0,29	19,81
	O	2022	4,9±0,2	52,7±1,6	45,8±1,6	2,22	0,04	0,80
	EL		5,1±0,2	15,5±0,5	0,91±0,21	0,03	0,24	7,85
	O (L)	2023	4,8±0,2	64,0±1,9	45,9±1,6	1,55	0,20	5,79
	O (F+H)		5,3±0,2	71,0±2,1	43,3±1,5	1,18	0,10	3,84
10П / 10Р	TUR	2021	4,9±0,2	25,2±0,8	2,2±0,3	0,02	0,14	14,13
	TUR	2022	5,3±0,2	14,7±0,4	1,07±0,25	0,04	0,36	9,52
	O	2023	5,2±0,2	37,0±1,1	22,8±2,3	0,27	0,03	2,81
	TUR		5,1±0,2	35,0±1,1	6,2±0,6	0,05	0,22	27,54
10Р / 10R	TUR	2021	5,4±0,2	8,1±0,4	0,32±0,07	0,01	0,01	0,25
	TUR	2022	5,2±0,2	12,7±0,4	0,50±0,12	0,03	0,56	10,37
	TUR	2023	5,6±0,2	17,0±0,5	0,41±0,09	0,03	0,92	11,90

Примечание: ИЛ – исходное хвойно-лиственное насаждение, П – пасечный участок, ЗП – волок с тремя проходами форвардера, 10П – волок с десятью проходами, 10Р – волок с десятью проходами и последующим выравниванием (приведены усреднённые значения, $n=3$); W – влажность почвы (%), $C_{\text{общ}}$ – общий углерод почвы (%), $C_{\text{вс}}$ – водорастворимый органический углерод почвы (%), $C_{\text{мик}}$ – микробный углерод почвы (%).

Note: IF – initial forest; A – apiary plot; ЗП – skidding trail after three forwarder passes; 10П – skidding trail after ten forwarder passes; 10Р – skidding trail after ten forwarder passes and surface leveling (reclamation) (averaged values, $n=3$); W – soil moisture (%); C_{tot} – total soil carbon (%); C_{ws} – water-soluble organic soil carbon (%); $C_{\text{mic}}/C_{\text{tot}}$ – the share of microbial carbon to total carbon (%); $C_{\text{mic}}/C_{\text{ws}}$ – the share of microbial carbon to water-soluble organic carbon (%).

на участке 10П общее содержание углерода падает в 2 раза (до 1,07%). На третий год после рубки отмечается не только заново сформировавшийся «эмбриональный» органогенный подгоризонт, в котором содержание углерода достигает 22,8%, но и происходит значительное увеличение углерода – в горизонте TUR в 6 раз (6,2%).

В почве участка с выравниванием возрастание углерода в верхнем минеральном горизонте на второй год составило до 0,5%. На следующий год содержание углерода сни-

зилось до 0,41%, что, скорее всего, связано с частичным восстановлением и изменением видового состава напочвенного покрова. На участке наблюдалось активное заселение травянистыми растениями, такими как седмичник (*Lysimachia europaea* (L.) U. Manns & Anderb.), золотарник (*Solidago virgaurea virgaurea* L.), осока шаровидная (*Carex globularis* L.), что характерно для данных сообществ [29].

Полученные значения микробной биомассы (рис. а) на исходном участке леса сильно разнятся в зависимости от горизонта:

в лесных подстилках значение МБ варьирует от 98 до 815 мкг С/г почвы. Высокие значения МБ (815 мкг С/г почвы) в подстилке связаны с тем, что в процессе дыхания, помимо микроорганизмов, участвуют ещё живые мхи и растительные остатки, которые способствуют увеличению микробного дыхания [1]. В верхнем минеральном горизонте (ЕL) отмечено низкое содержание микробной биомассы – 24 мкг С/г почвы (рис. б), что типично для таких почв [30]. Базальное дыхание на исходном участке леса варьирует от 6,0 до 32,5 мкг С-СО₂/г/ч в лесной подстилке, а в элювиальном горизонте составляет 0,3 мкг С-СО₂/г/ч.

На пасечном участке наибольшие изменения микробной биомассы наблюдаются в органогенных горизонтах почвы, так как в течение трёх лет она увеличивается в 2–14 раз по сравнению с исходным участком леса. В минеральном горизонте прослеживается обратная закономерность: в первый год отмечается четырёхкратный прирост биомассы, а в дальнейшем – её резкое сокращение. При этом стоит отметить, что базальное дыхание в первый год после рубки незначительно снижается, а в последующие годы возрастает в 2–4 раза. Скорее всего, это происходит из-за чрезмерного увлажнения почвы.

Иначе обстоит дело на участках волоков. На волоке с тремя проходами (ЗП) в первые два года количество микробной биомассы в подстилочных горизонтах уменьшилось от трёх до семи раз по сравнению со значениями на контрольном участке леса. В минеральном горизонте в течение двух лет не наблюдаются существенных изменений. Вероятно, это связано с тем, что при прохождении форвардера почва была уплотнена. На третий год отмечается резкий прирост МБ по сравнению с предыдущими годами. Базальное дыхание за анализируемый период возрастает и составляет в лесной подстилке от 16,3 до 199,5 мкг С-СО₂/г/ч, а в элювиальном горизонте – от 0,5 до 5,3 мкг С-СО₂/г/ч.

На протяжении двух лет после рубки содержание микробной биомассы на волоке с десятью проходами (10П) относительно невелико (31–38 мкг С/г почвы) и сравнимо со значением микробной биомассы в верхнем минеральном горизонте исходного участка леса. На третий год в восстановившемся органогенном горизонте количество микробного углерода соответствует верхнему горизонту подстилки исходного леса (77 мкг С/г почвы). Отмечено, что интенсивность базального дыхания значительно колеблется на протяжении

трёх лет: в первый год после рубки в среднем составляет 2,1 мкг С-СО₂/г/ч, в следующий год – от 0,6 мкг С-СО₂/г/ч, на третий год увеличивается в 20 раз.

На участке 10Р значения микробной биомассы и базального дыхания в первый год после рубки очень низкие. Вероятнее всего, это происходит из-за того, что верхний почвенный слой и лесная подстилка полностью удаляются. Поэтому количество микроорганизмов в минеральном слое из-за недостатка органики существенно снижается. В 2022 г. на этом же участке отмечаются дорубочные значения МБ, а в 2023 г. она увеличивается почти в два раза по сравнению с элювиальным горизонтом исходного участка леса. Базальное дыхание находится в пределах от 0,3 до 1,0 мкг С-СО₂/г/ч, что соответствует значениям контрольного участка.

Анализ почв волоков за три года исследований показал, что влажность и кислотность почвы влияли на функционирование микробного сообщества, но достоверно это подтверждается только для влажности ($t \geq 0,61$). Хотя нами отмечается повышение кислотности, но корреляция значений рН с содержанием микробной биомассы достоверно не установлена.

Углерод микробной биомассы (С_{мик}) – самая активная и динамичная часть почвенного органического вещества (ПОВ), которая обычно не превышает 1–10% от содержания почвенного органического углерода [15, 2]. Содержание углерода микробной биомассы может быть использовано как показатель оценки продуктивности экосистем, а также в качестве раннего индикатора изменений в ПОВ. Так, отношение С_{мик}/С_{общ} служит индикатором доступности углерода почвы. Вклад углерода микробной биомассы в общее органическое вещество отличался в разные годы и составлял от 0,02 до 0,30% в органических горизонтах. В минеральных и турбированных горизонтах содержание микробного углерода в общем углероде почвы значительно выше и составляет от 0,01 до 2,57%. Закономерно, что в органических горизонтах сразу после рубки вклад микробного углерода увеличивается, на второй год уменьшается, а на третий год снова увеличивается. На начальных стадиях нарушения экосистемы часто отмечается увеличение биохимической активности, дыхания и других микробиологических и биохимических показателей [1, 30, 31]. Вклад углерода микробной биомассы в водорастворимый углерод в органогенных горизонтах составлял от 0,78 до 16,81%. В минеральных и турбированных

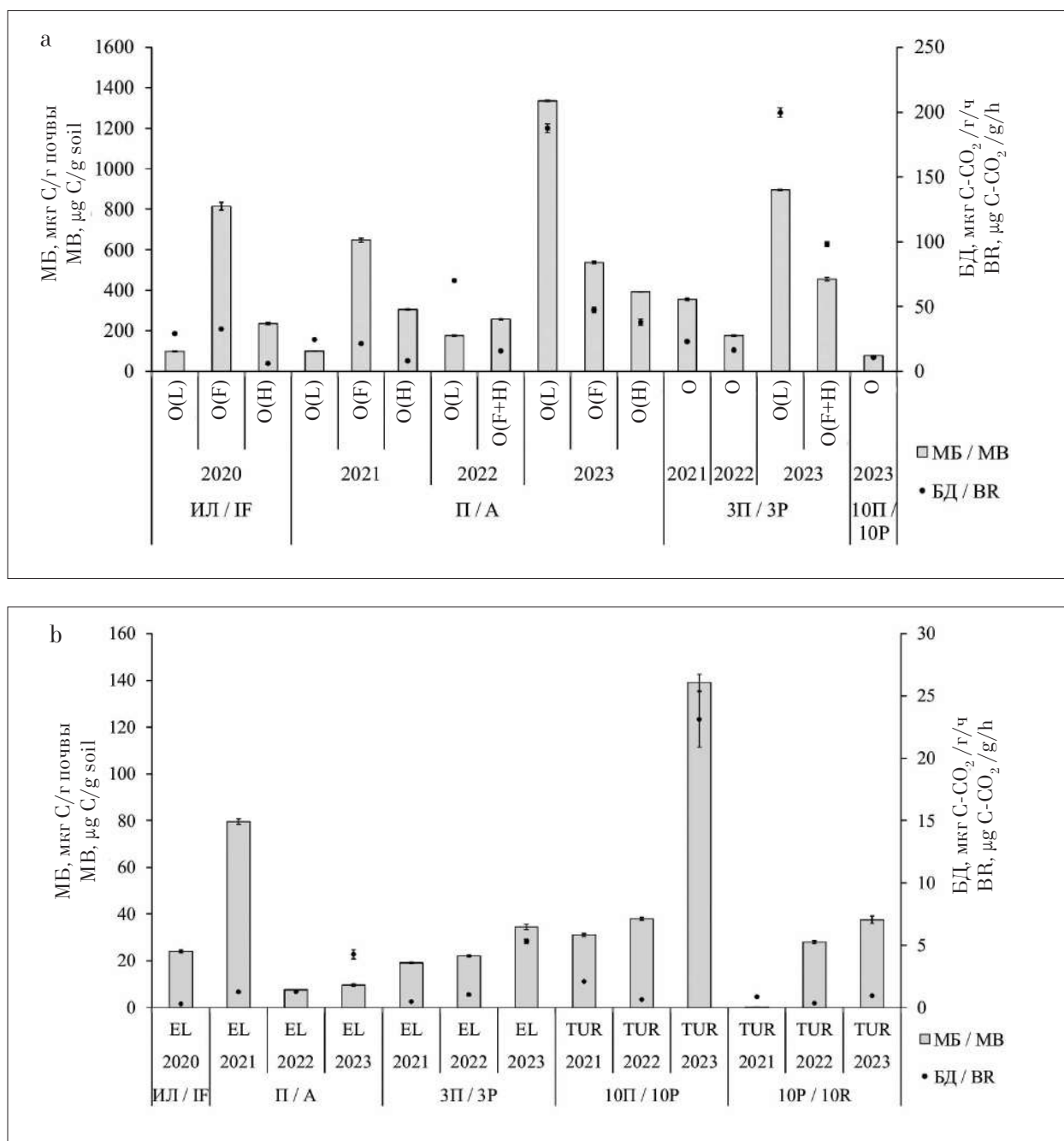


Рис. Изменение микробной биомассы (МБ) и интенсивности базального дыхания (БД) почвенных микроорганизмов на протяжении трёх лет в: а – органогенных горизонтах; б – минеральных горизонтах (приведены усреднённые значения, n=3)

Fig. Changes in microbial biomass (MB) and basal respiration (BR) of soil microorganisms over three years in: a – organogenic horizons; b – mineral horizons (averaged values, n=3)

горизонтах его содержание в водорастворимой фракции органического углерода составляет от 0,25 до 51,70%. Доля $C_{\text{мин}}$ в водорастворимой фракции почвы намного больше, чем в общем углероде почвы. Данная закономерность отмечается другими исследователями [15]. Таким образом, в почвах послерубочных ценозов возрастает доля органического и микробного углерода, что может указывать на увеличивающуюся доступность почвенного углерода.

Заключение

Микробиологическое сообщество чутко реагирует на воздействие неблагоприятных условий. Трансформация почв при вырубках влияет на интенсивность микробиологических процессов. Значения МБ в органогенных горизонтах на пасечном участке и на участке ЗП в первые годы после рубки уменьшаются в четыре раза. На третий год отмечается зна-

чительный прирост микробной биомассы (до 1335 мкг С/г почвы). В элювиальных горизонтах пасечного участка значения микробного углерода в первый год возрастают в четыре раза, а затем уменьшаются в два раза по сравнению с ЕЛ исходного участка. В минеральном горизонте волокна отмечается постепенное накопление микробной биомассы. Колебательный характер изменения МБ обусловлен отложенной реакцией на внешнее воздействие. В первые годы после рубки при нарушении целостности почвенных горизонтов возрастает содержание доступного органического вещества. При нарушении целостности почвенных горизонтов становится доступным большой пул органических веществ в первые годы после рубки. В дальнейшем постепенно восстанавливающая растительность начинает оказывать влияние на содержание углерода. На турбированных участках значения микробного углерода постепенно увеличиваются, так как ввиду сильных нарушений численность микробного сообщества увеличивается с течением времени. Интенсивность базального дыхания в турбированных горизонтах на всех участках значительно возрастает (до 20 раз), что выражает сильный стресс сообщества. Пул микробного углерода в целом выше в органогенных горизонтах изменённых почв по сравнению с исходной почвой.

В целом, на первых этапах сукцессионных процессов баланс углерода ожидаемо сдвигается в сторону его активного накопления в минеральных и турбированных горизонтах. Углерод микробного происхождения составляет основу водорастворимых органических соединений. Такая закономерность сохраняется и для естественных, и для изменённых почв. Микробиологическая трансформация углерода даёт возможность оценить динамику и направленность потоков углерода в почве при изменяющихся экологических факторах.

Работа выполнена в рамках ГБ темы «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» (рег. номер 125021902454-1).

Литература

1. Медведева М.В., Мамай А.В., Бахмет О.Н., Мошкина Е.В. Микробиологические основы трансформации азот- и углеродсодержащих соединений в почвах урбанизированных территорий // Ученые записки Петро-

заводского государственного университета. 2018. № 3. С. 20–27. doi: 10.15393/uchz.art.2018.122

2. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095

3. Панов А.В., Онучин А.А., Зражевская Г.К., Шибистова О.Б. Структура и динамика пулов органического вещества на вырубках в сосняках лишайниковых среднетаёжной подзоны Приенисейской Сибири // Изв. РАН. Сер. биол. 2012. № 6. С. 658–666.

4. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых её показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

5. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор литературы) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. doi: 10.7868/S0032180X17070024

6. Ларин В.Б., Паутов Ю.А. Формирование хвойных молодняков на вырубках северо-востока Европейской части СССР. Л.: Наука, 1989. 142 с.

7. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаёжных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.

8. Ильинцев А.С., Богданов А.П., Быков Ю.С. Динамика физических свойств подзолистой почвы на вырубках при естественном зарастании // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 70–82. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.70

9. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с.

10. Паутов Ю.А., Ильчуков С.В. Пространственная структура производных насаждений на сплошных концентрированных вырубках в Республике Коми // Лесоведение. 2001. № 2. С. 27–32.

11. Катаров В.К., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почвогрунты // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9. № 2. С. 73–81.

12. Семёнов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.

13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of clear-cutting on soil CO₂ emission // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2017. V. 44. No. 2. P. 218–223. doi: 10.1134/S1062359016060121

14. Благодатская Е.В., Семёнов М.В., Якушев А.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 243 с.

15. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольников Е.В. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.

16. Сорокин Н.Д., Александров Д.Е., Гродницкая И.Д., Евграфова С.Ю. Микробиологическая трансформация соединений углерода и азота в лесных почвах Центральной Эвенкии // Почвоведение. 2017. № 4. С. 490–496. doi: 10.7868/S0032180X17040128

17. Grodnitskaya I.D., Sorokin N.D. Evaluation of the state of soil microbial communities in two types of Siberian forest ecosystems // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2007. V. 34. No. 6. P. 564–568. doi: 10.1134/S1062359007060052

18. Dobrovolskaya 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. The role of microorganisms in the ecological functions of soils // Eurasian Soil Sc. 2015. V. 48. No. 9. P. 959–967. doi: 10.1134/S1064229315090033

19. 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 // Eurasian Soil Sc. 2020. V. 53. No. 1. P. 126–136. doi: 10.1134/S1064229320010056

20. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Sc. 2022. V. 55. No. 11. P. 1633–1646. doi: 10.1134/S1064229322110023

21. Огородняя С.А., Бутылкина М.А., Красиков С.Р., Дымов А.А. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республика Коми) // Вестник Московского университета. Почвоведение. 2024. Серия 17. № 2. С. 15–25. doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25

22. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

23. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьёвой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

24. 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. No. 3. P. 215–221. doi: 10.1016/0038-0717(78)90099-8

25. West A.W., Sparling G.P. Modifications to the substrate-induced respiration method to permit measurement of microbial biomass in soils of differing water contents // J. Microb. Method. 1986. V. 5. P. 177–189

26. Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.

27. Startsev V.V., Yakovleva E.V. Kutuyavin I.N., Dymov A.A. Fire impact on carbon pools and basic properties of Retisols in native spruce forests of the European North and Central Siberia of Russia // Forests. 2022. V. 13. No. 7. Article No. 1135. doi: 10.3390/f13071135

28. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // Eurasian Soil Sc. 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064

29. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 91–100. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100

30. Стольникова Е.В., Ананьева Н.Д., Чернова О.В. Микробная биомасса, её активность и структура в почвах старовозрастных лесов европейской территории России // Почвоведение. 2011. № 4. С. 470–494.

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

References

1. Medvedeva M.V., Mamai A.V., Bakhmet O.N., Moshkina E.V. The microbiological background of nitrogen- and carbon-bearing compounds' transformations in urban soils // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2018. No. 3. P. 20–27 (in Russian). doi: 10.15393/uchz.art.2018.122

2. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological indicators ecological functions of soils // Pochvovedenie. 2022. No. 2. P. 228–243 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22020095

3. Panov A.V., Onuchin A.A., Zrazhevskaya G.K., Shibistova O.B. Structure and dynamics of organic matter pools at clearings in the lichen pine forests of the middle taiga subzone of Yenisei Siberia // Proceedings of the Russian academy of sciences. Biological series. 2012. No. 6. P. 658–666 (in Russian).

4. Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators // Pochvovedenie. 1978. No. 6. P. 48–54 (in Russian).

5. Dymov A.A. The impact of clear-cutting in boreal forests of Russia on soils: A review // Pochvovedenie. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17070024

6. Larin V.B., Pautov Yu.A. Formation of coniferous young stands on clearcuts in the north-east of the European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1989. 142 p. (in Russian).

7. Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A. Nutrient regime of soils of northern taiga forests. Moskva: Nauka, 2008. 342 p. (in Russian).

8. Ilintsev A.S., Bogdanov A.P., Bykov Yu.S. Physical properties dynamics of podzolic soil in the naturally regenerated cutover areas // Lesnoy Zhurnal. 2019. No. 5. P. 70–82 (in Russian). doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.70

9. Dymov A.A. Soil successions in boreal forests of the Komi Republic. Moskva: GEOS, 2020. 336 p. (in Russian).

10. Pautov Yu.A., Ilchukov S.V. Spatial structure of derived plantations on continuous concentrated clearcuts in the Komi Republic // Lesovedenie. 2001. No. 2. P. 27–32 (in Russian).

11. Katarov V.K., Syunev V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of wood forwarding on forest soils // *Trudy lesoinzhenerenogo fakulteta PetrGU*. 2012. V. 9. No. 2. P. 73–81 (in Russian).
12. Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moskva: GEOS, 2015. 233 p. (in Russian).
13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of clear-cutting on soil CO₂ emission // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2017. V. 44. No. 2. P. 218–223. doi: 10.1134/S1062359016060121
14. Blagodatskaya E.V., Semenov M.V., Yakushev A.V. Activity and biomass of soil microorganisms under changing environmental conditions. Moskva: *Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK*, 2016. 243 p. (in Russian).
15. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Stolnikova E.V., Ryzhova I.M., Bocharnikova E.O. Microbial biomass carbon and the microbial carbon dioxide production by soddy-podzolic soils in postagrogenic biogeocenoses and in native spruce forests of the southern taiga (Kostroma oblast) // *Pochvovedenie*. 2009. No. 9. P. 1108–1116 (in Russian).
16. Sorokin N.D., Aleksandrov D.E., Grodnitskaya I.D., Evgrafova S.Y. Microbiological transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils of Central Evenkia // *Pochvovedenie*. 2017. No. 4. P. 490–496 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17040128
17. Grodnitskaya I.D., Sorokin N.D. Evaluation of the state of soil microbial communities in two types of Siberian forest ecosystems // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2007. V. 34. No. 6. P. 564–568. doi: 10.1134/S1062359007060052
18. Dobvol'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. The role of microorganisms in the ecological functions of soils // *Eurasian Soil Sc.* 2015. V. 48. No. 9. P. 959–967. doi: 10.1134/S1064229315090033
19. 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 // *Eurasian Soil Sc.* 2020. V. 53. No. 1. P. 126–136. doi: 10.1134/S1064229320010056
20. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // *Eurasian Soil Sc.* 2022. V. 55. No. 11. P. 1633–1646. doi: 10.1134/s1064229322110023
21. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties of upper mineral horizons of cutting area (Middle Taiga, Komi Republic) // *Lomonosov Soil Science Journal*. 2024. V. 79. No. 2. P. 15–25 (in Russian). doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25
22. Field identifier Russian soils. Moskva: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
23. Theory and practice of soil chemical analysis / Ed. L.A. Vorobyova. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
24. 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. No. 3. P. 215–221. doi: 10.1016/0038-0717(78)90099-8
25. West A.W., Sparling G.P. Modifications to the substrate-induced respiration method to permit measurement of microbial biomass in soils of differing water contents // *J. Microb. Method.* 1986. V. 5. P. 177–189.
26. Ananyeva N.D. Microbiological aspects of soil self-purification and sustainability. Moskva: Nauka, 2003. 223 p. (in Russian).
27. Startsev V.V., Yakovleva E.V., Kutuyavin I.N., Dymov A.A. Fire impact on carbon pools and basic properties of Retisols in native spruce forests of the European North and Central Siberia of Russia // *Forests*. 2022. V. 13. No. 7. Article No. 1135. doi: 10.3390/f13071135
28. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // *Eurasian Soil Sc.* 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064
29. Likhanova N.V., Bobkova K.S. Pools and carbon fluxes in felling ecosystems spruce forests of the middle taiga of the Komi Republic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 91–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100
30. 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 // *Pochvovedenie*. 2011. V. 44. No. 4. P. 470–494 (in Russian).
31. Grodnitskaya I.D., Senashova V.A., Antonov G.I., Pashkeeva O.E. Soils' microbiological indication in forest plantations of the Shirinskaya steppe // *Lesovedenie*. 2022. No. 3. P. 270–284 (in Russian). doi: 10.31857/S002411482203007X