

ДИНАМИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ БОРЕАЛЬНЫХ ПОЧВ ПОД ВЛИЯНИЕМ БИОУГЛЯ*

И.А. ДУБРОВИНА¹ ✉, Е.В. МОШКИНА²

Биоуголь представляет собой продукт пиролиза различных органических материалов с высоким содержанием углерода. За счет ароматической структуры, высокой пористости и емкости катионного обмена биоуголь оказывает значительное влияние на физические, химические и биологические свойства почв. Применение биоугля в сельском хозяйстве рассматривается как возможность безопасной утилизации отходов и восстановления качества почв, а также углеродной секвестрации. Изменение структуры, численности и экофизиологического статуса почвенных микроорганизмов остается одним из малоизученных последствий использования биоугля. В настоящей работе впервые установили, что биоуголь действует разнонаправленно на функционирование микробных сообществ бореальных почв. Целью работы было изучение влияния древесного биоугля на базальное дыхание, содержание углерода микробной биомассы и микробиологические коэффициенты бореальных почв различного гранулометрического состава. Исследования проводили в среднетаежной подзоне Карелии. Площадки были заложены в 2018 и 2019 годах на участках пашни с разными по гранулометрическому составу почвами и нормальным увлажнением. Почва легкого гранулометрического состава была представлена агроземом альфегумусовым иллювиально-железистым супесчаным на озерных песках (АА) (Лаборатория агротехнологий «Вилга» КарНЦ РАН, п. Виданы, Пряжинский р-н, Карелия, 61°52'22,8" N, 34°0'3,6" E), почва тяжелого гранулометрического состава — агроземом текстурно-дифференцированным типичным среднесуглинистым на морене суглинистой (АТ) (Агробиологическая станция КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, 61°45'3,6" N, 34°21'12,4" E). Участки с внесением биоугля и контрольные делянки были заложены рандомизированно в 4-кратной повторности, площадь делянок составляла 5 м². Использовали уголь древесный (ГОСТ 7657-84), марка А (Россия) в дозе 1,5 кг/м² (15 т/га), размер фракции ≤ 1 см. Уголь вносили 1-кратно и перекапывали вручную на глубину 20–25 см, дополнительные удобрения не применяли. В первый год исследования на участках выращивали картофель, во второй год — сидераты. Отбор почвенных проб проводили ежемесячно в течение вегетационных периодов 2018–2019 годов для участков с АА и 2019–2020 годов для участков с АТ. С каждого участка отбирали почву с глубины пахотного горизонта 5–20 см методом «конверта» и анализировали смешанный образец в 4-кратной повторности. Содержание общего органического углерода (С_{орг.}) определяли методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе TOC-L CPN («Shimadzu», Япония). Скорость базального (микробного) дыхания (БД) измеряли в нативной почве, которую инкубировали 24 ч при 22 °С. Содержание углерода микробной биомассы (С_{мик.}) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания, которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой (инкубация в течение 1,5–2 ч при 22 °С). Изменение концентрации CO₂ регистрировали газоанализатором NDIR-сенсор («SenseAir», Швеция). Определяли параметры экофизиологического статуса микробного сообщества: долю углерода микробной биомассы в общем органическом углероде почвы С_{мик.}/С_{орг.}, микробный метаболический коэффициент qCO₂, коэффициент микробного дыхания QR. Полевой мониторинг экофизиологических параметров микробных сообществ в почвах разного гранулометрического состава при внесении биоугля выявил многофакторные и нелинейные воздействия условий среды на динамику изученных показателей. Базальное дыхание меньше зависело от погодных условий по сравнению с углеродом микробной биомассы и связанных с ним коэффициентов, на величину которых, по-видимому, также влияло поступление органических остатков. АА изначально имеет более низкую микробную биомассу и менее зрелое микробное сообщество с меньшей устойчивостью и низким качеством органического вещества по сравнению с АТ. Внесение биоугля оказывало разнонаправленное влияние на эти почвы. Несмотря на стабильное и достоверное (p ≤ 0,05) повышение содержания общего органического углерода в обеих почвах до 20 %, показатели БД и С_{мик.} при внесении биоугля в АТ имели тенденцию к снижению, также достоверно (p ≤ 0,05) снижалась доля С_{мик.} в составе С_{орг.}, что указывало на недостаток доступного для микроорганизмов субстрата. При этом показатели qCO₂ и QR снижались незначительно и недостоверно. В АА происходило увеличение БД (недостоверное) и С_{мик.} (p ≤ 0,05 для некоторых дат), что, по-видимому, свидетельствовало о всплеске активности К-стратегов при минерализации труднодоступных соединений биоугля. Добавление биоугля не влияло на С_{мик.} в С_{орг.} почвы в АА. При этом происходило уменьшение qCO₂ и QR, то есть для микроорганизмов складывались более благоприятные условия

* Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ Карельский научный центр Российской академии наук в рамках госзадания № FMEN-2022-0012.

среды. В целом, добавление биоугля увеличивало адаптивный потенциал микробного сообщества супесчаной почвы.

Ключевые слова: биоуголь, базальное дыхание, углерод микробной биомассы, органический углерод почвы, микробный метаболический коэффициент, коэффициент микробного дыхания.

Биоуголь представляет собой продукт пиролиза различных органических материалов с высоким содержанием углерода. Сырьем для получения биоугля могут служить отходы сельскохозяйственного производства, лесной и деревообрабатывающей отрасли, а также бытовой мусор и осадок сточных вод. Биоуголь имеет высокую обменную емкость и удерживающую способность, обусловленные большой площадью поверхности и отрицательным поверхностным зарядом гидроксильных и карбоксильных групп. Пористая структура биоугля служит основным фактором, влияющим на его адсорбционную способность. В последнее время биоуголь активно исследуют и применяют в качестве мелиоранта и удобрения для почв в сельском хозяйстве. За счет ароматической структуры, высокой пористости и емкости катионного обмена биоуголь оказывает значительное влияние на физические, химические и биологические свойства почв (1).

Применение биоугля рассматривается как возможность безопасной утилизации отходов и восстановления качества почв, а также углеродной секвестрации (2). Поскольку уголь представляет собой одну из наиболее устойчивых форм восстановленного углерода для химического окисления и остается в почве длительное время, происходит связывание биосферного углерода. Множество исследований показывают общее снижение потока углекислого газа из сельскохозяйственных почв, обогащенных биоуглем (3-6). Это свойство предлагается использовать в борьбе с глобальным потеплением климата. Значительная неопределенность влияния биоугля на изменение почвенных параметров и эмиссию парниковых газов обусловлена гранулометрическим составом почв, видом биоугля и его дозировкой, а также применением дополнительных удобрений (7-10).

Одно из малоизученных последствий применения биоугля в сельском хозяйстве — изменение структуры, численности и экофизиологического статуса почвенных микроорганизмов (11). Микробное сообщество играет важную роль в почвообразовании и круговоротах биогенных элементов, разложении органических веществ и минерализации азота, а также влияет на продуктивность экосистем (12). Поскольку гетеротрофные микроорганизмы извлекают энергию из органического вещества почв, то внесение биоугля как источника труднорастворимого углерода может иметь непредсказуемые последствия для почвенной экологии. В почвенной среде, несмотря на высокую химическую стойкость и ароматическую структуру биоугля, происходит его биохимическое разложение под воздействием микроорганизмов (13). Эти процессы связаны с активностью почвенной микробиоты и оказывают влияние на циклы элементов питания растений, от чего зависит урожайность и качество культур (14, 15).

В связи с вышеперечисленным существует необходимость полевых наблюдений и опытов с биоуглем для понимания пролонгированных эффектов его применения на эколого-физиологические параметры почвенных микробных сообществ.

В настоящей работе мы впервые установили, что биоуголь оказывает разнонаправленное действие на функционирование микробных сообществ в бореальных почвах среднетаежной подзоны Карелии.

Целью работы было изучение влияния внесения древесного биоугля на базальное дыхание, содержание углерода микробной биомассы и микробиологические коэффициенты бореальных почв различного гранулометри-

ческого состава.

Методика. Исследования проводили в среднетаежной подзоне Карелии, климат района исследования характеризовался как умеренно-холодный, переходный от морского к континентальному. Территория относится к южному агроклиматическому району со средней температурой января $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ и среднегодовым количеством осадков 650–725 мм. Продолжительность безморозного периода составляет 200–210 сут, сумма эффективных температур — 1400–1500 $^{\circ}\text{C}$ (16).

Площадки мониторинга были заложены в 2018 и 2019 годах на участках пашни с разными по гранулометрическому составу почвами и нормальным увлажнением. Почва легкого гранулометрического состава была представлена агроземом альфегумусовым иллювиально-железистым супесчаным на озерных песках (АА) (Лаборатория агротехнологий «Вилга» КарНЦ РАН, п. Виданы, Пряжинский р-н, Карелия, $61^{\circ}52'22,8''\text{ N}$, $34^{\circ}0'3,6''\text{ E}$). Почва имела развитый пахотный горизонт мощностью 46 см с содержанием физической глины 12 %, плотность сложения — $1,1\text{ г/см}^3$, рНкCl 6,1, содержание $S_{\text{орг}}$ — 3 %, $N_{\text{общ}}$ — 0,23 %, подвижного фосфора и калия (по Кирсанову) — соответственно 510 и 120 мг/кг. Почва тяжелого гранулометрического состава была представлена агроземом текстурно-дифференцированным типичным среднесуглинистым на морене суглинистой (АТ) (Агробиологическая станция КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, $61^{\circ}45'3,6''\text{ N}$, $34^{\circ}21'12,4''\text{ E}$). Почва имела пахотный горизонт мощностью 30 см, содержание физической глины составляло 31 %, плотность сложения — $1,2\text{ г/см}^3$, рНкCl 5,1, содержание $S_{\text{орг}}$ — 1,8 %, $N_{\text{общ}}$ — 0,14 %, подвижного фосфора и калия (по Кирсанову) — соответственно 310 и 150 мг/кг.

Участки с биоуглем и контрольные делянки были заложены рандомизированно в 4-кратной повторности, площадь делянок составляла 5 м^2 . Использовали уголь древесный (ГОСТ 7657-84), марка А (Россия) в дозе $1,5\text{ кг/м}^2$ (15 т/га), размер фракции $\leq 1\text{ см}$. Биоуголь имел следующие характеристики: содержание С — 81, N — 0,35, K — 0,24, P — 0,026, Ca — 0,83, Mg — 0,20, золы — 2,8 % от массы сухого вещества, рН_{H2O} 9,3, рНкCl 7,9; плотность — $0,37\text{ г/см}^3$. Уголь вносили 1-кратно и перекапывали вручную на глубину 20–25 см, дополнительные удобрения не применяли. В первый год исследования на участках выращивали картофель (*Solanum tuberosum* L.) сорта Невский, во второй год — сидераты (горчица *Sinapis alba* L.).

Почвенные пробы отбирали ежемесячно в течение вегетационных периодов 2018–2019 годов для участков с АА и 2019–2020 годов для участков с АТ. С каждого участка в 4-кратной повторности отбирали почву с глубины пахотного горизонта 5–20 см методом «конверта» и анализировали смешанный образец.

Содержание общего органического углерода ($S_{\text{орг}}$) определяли методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе ТОС-L CPN («Shimadzu», Япония).

Для определения базального дыхания (БД) и углерода микробной биомассы ($S_{\text{мик}}$) образцы почвы предварительно инкубировали 7 сут при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 60 % полной влагоемкости. Скорость базального (микробного) дыхания ($\text{мг С} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) измеряли в нативной почве, проинкубированной 24 ч при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Содержание углерода микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой (инкубация в течение 1,5–2 ч при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Изменение

концентрации CO₂ регистрировали газоанализатором NDIR-sensor («SenseAir», Швеция).

Углерод микробной биомассы (мг С/кг почвы) рассчитывали по формуле: $C_{\text{мик.}} = \text{СИД} \cdot 40,04 + 0,37$. Определяли параметры экофизиологического статуса микробного сообщества: долю углерода микробной биомассы в общем органическом углероде почвы $C_{\text{мик.}}/C_{\text{орг.}}$ (%); микробный метаболический коэффициент $q\text{CO}_2$ (мг · кг⁻¹ · ч⁻¹) рассчитывали как отношение скорости базального дыхания к величине микробной биомассы БД/ $C_{\text{мик.}}$; коэффициент микробного дыхания QR вычисляли как отношение БД/СИД (17).

Статистическую обработку данных проводили с использованием *t*-теста Стьюдента для анализа различий средних значений на контрольных участках и участках с биоуглем при $p \leq 0,05$. Рассчитывали средние значения (M) и стандартные отклонения ($\pm\text{SEM}$). В работе использовали пакеты анализа PAST Statistics и Microsoft Excel.

Результаты. В годы проведения исследований метеорологические условия характеризовались как неравномерные. Вегетационный период 2018 года отличался повышенным температурным фоном, фактические значения среднемесячных температур превышали средние многолетние значения на 1,4–3,5 °С. В начале сезона зафиксировано небольшое количество осадков, в среднем на 26 мм ниже нормы, при этом в августе наблюдался избыток увлажнения. В 2019 году в начале вегетации в мае и июне отмечался повышенный температурный фон, в июле и августе, напротив, среднемесячная температура была ниже на 1,6–3,6 °С средних многолетних значений. В июле было зафиксировано превышение среднего многолетнего уровня осадков на 51 мм, в июле, августе и сентябре отмечался дефицит осадков. В 2020 году температурный фон был ниже нормы на 1,5 °С в мае, превышал средние значения на 1,3–2,0 °С в июне и сентябре, в остальные месяцы соответствовал климатической норме. В течение сезона наблюдался дефицит осадков в среднем на 23 мм, в сентябре отмечалось небольшое превышение нормы осадков (18). Показатели гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова (ГТК) в период в 2018–2020 годах были несколько ниже или близки к норме, которая составляла 1,5 для периода вегетации (16). В месяцы с избыточным увлажнением ГТК превышал норму в 1,5–2 раза. Во все годы наблюдений в июне была отмечена засуха при показателях ГТК ниже единицы.

Интенсивность базального дыхания АА в течение вегетационных периодов 2018–2019 годов варьировала в небольших пределах и составляла 47,5–61,8 мг С · кг⁻¹ · сут⁻¹ в контроле и 47,9–65,1 мг С · кг⁻¹ · сут⁻¹ в вариантах с биоуглем (рис. 1, А). Статистически значимых различий в величине БД между вариантами мы не выявили, при этом отмечалась общая тенденция к увеличению БД в образцах с биоуглем. В АТ в 2019–2020 годах интенсивность БД была в 2 раза ниже, чем в супесчаной почве, и составляла 20,2–36,6 мг С · кг⁻¹ · сут⁻¹ в контроле и 19,9–36,1 мг С · кг⁻¹ · сут⁻¹ в вариантах с биоуглем (см. рис. 1, Б). Изменчивость БД в двух вариантах опыта также была незначительной и недостоверной, но практически для всех дат отбора имела противоположную тенденцию и оказалась выше в контроле.

Содержание углерода микробной биомассы в АА показывало значительные сезонные и межвариантные колебания и находилось в пределах 62,3–135,9 мг С/кг в контроле и 74,4–178,5 мг С/кг в вариантах с биоуглем (см. рис. 1, В). Для всех дат отбора были характерны более высокие показатели $C_{\text{мик.}}$ в образцах с биоуглем, в некоторых случаях разница с контро-

лем оказалась достоверной ($p \leq 0,05$). В АТ содержание $S_{\text{мик}}$ в среднем было выше, чем в супесчаной почве, и составляло 92,9-230,3 мг С/кг в контроле и 91,5-258,2 мг С/кг в вариантах с биоуглем (см. рис. 1, Г). Колебания показателя между вариантами опыта были невелики и недостоверны, но в большинстве случаев содержание $S_{\text{мик}}$ имело тенденцию к снижению в вариантах с биоуглем.

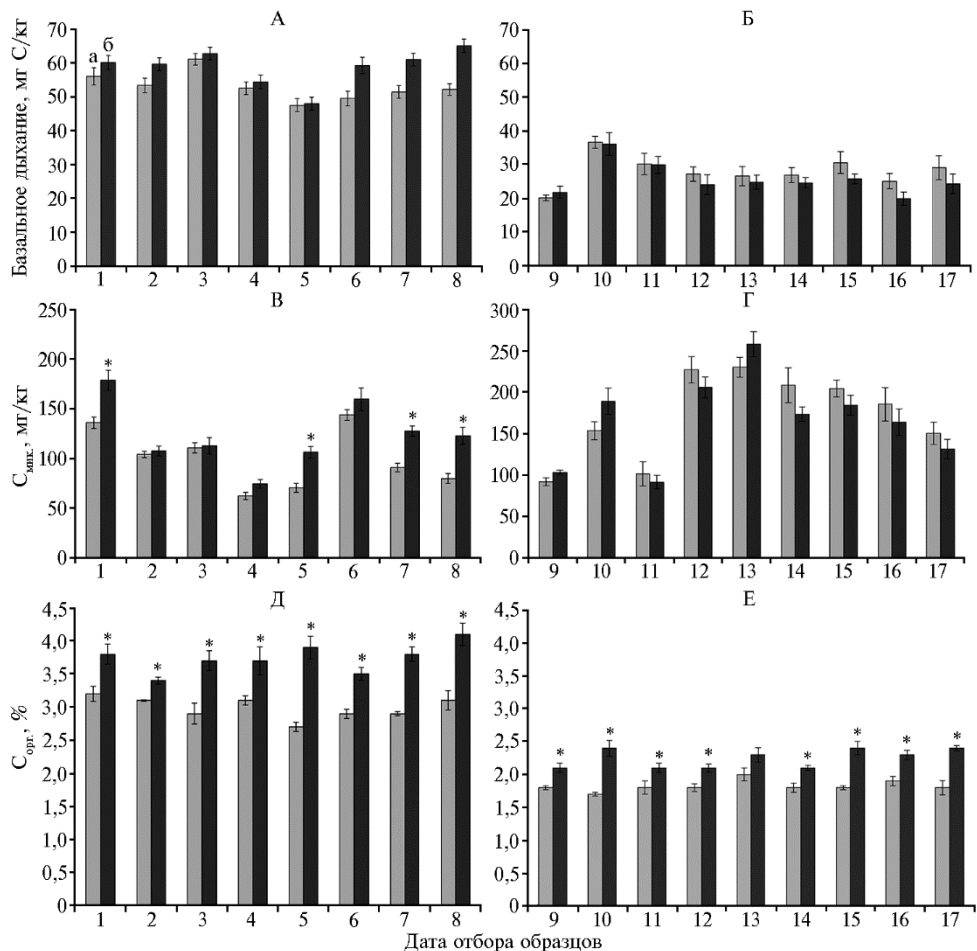


Рис. 1. Показатели базального дыхания (А, Б), углерода микробной биомассы (В, Г) и органического углерода (Д, Е) для агрозема альфегумусового (А, В, Д) и агрозема текстурно-дифференцированного (Б, Г, Е) в контроле (а) и при внесении биоугля (б) ($n = 4$, $M \pm SEM$). Даты отбора образцов: 1 — 15.07.2018, 2 — 15.08.2018, 3 — 19.09.2018, 4 — 14.05.2019, 5 — 19.06.2019, 6 — 16.07.2019, 7 — 19.08.2019, 8 — 17.09.2019 (Лаборатория агротехнологий «Вилга» КарНЦ РАН, п. Виданы, Пряжинский р-н, Карелия); 9 — 26.06.2019, 10 — 25.07.2019, 11 — 30.08.2019, 12 — 20.09.2019, 13 — 29.05.2020, 14 — 30.06.2020, 15 — 27.07.2020, 16 — 25.08.2020, 17 — 23.09.2020 (Агробиологическая станция КарНЦ РАН, г. Петрозаводск). * Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

Многочисленные наблюдения за почвенными микробиологическими процессами свидетельствуют об их обусловленности метеорологическими факторами и поступлением доступного органического субстрата (19-21). Наши исследования показали, что влияние погодных условий на БД было менее заметным, чем на $S_{\text{мик}}$ и связанные с ним коэффициенты. Базальное дыхание характеризует доступность органического углерода в почве и отражает интенсивность минерализации органических веществ почвенными микроорганизмами. Различие в содержании $S_{\text{орг}}$, количество которого в АА

было в 1,5 раза выше, чем в АТ, объясняет существенную разницу в интенсивности БД этих двух почв. Добавление глюкозы не вызывало значительного всплеска СИД в АА, и содержание $S_{\text{мик}}$ в этой почве было в среднем в 1,5-1,7 раз ниже, чем в АТ. Известно, что содержание $S_{\text{мик}}$ в пахотных почвах сильнее зависит от доступного для минерализации пула углерода, чем от общего содержания в почве. В целом, суглинистые почвы имеют большую микробную биомассу по сравнению с почвами легкого гранулометрического состава. Это связано с мелкими размерами пор суглинистых почв, обеспечивающих лучшее питание и защиту микроорганизмов (22).

Высокие показатели БД в сочетании с небольшим содержанием $S_{\text{мик}}$ могут указывать на интенсивный круговорот углерода и низкую устойчивость микробного сообщества супесчаной почвы (23). При внесении биоугля в почвах наблюдались противоположные тенденции: в АА происходило увеличение БД и $S_{\text{мик}}$, в АТ, напротив, снижение. Применение биоугля значительно улучшает питательный режим и условия для роста микроорганизмов, что особенно характерно для почв легкого гранулометрического состава и отмечено многими исследователями (24-26). В то же время интенсивность БД и содержание $S_{\text{мик}}$ зависят от доступных азотистых соединений (27, 28). Поскольку биоуголь представляет собой высокоуглеродистое соединение с индексом C/N больше 20, при его применении метаболические возможности микроорганизмов лимитируются доступным азотом (29). Как было показано ранее (8), в исследованных нами почвах биоуголь по-разному влияет на содержание доступного азота, увеличивая его в АА и снижая — в АТ, что прослеживается и в микробиологических показателях. Эта особенность может быть обусловлена усилением минерализации в почвах легкого гранулометрического состава в присутствии биоугля (30, 31).

Содержание органического углерода в АА колебалось в пределах 2,7-3,2 % в контрольных вариантах и возрастало при внесении биоугля до 3,4-4,1 % ($p \leq 0,05$ для всех дат сбора) (см. рис. 1, Д). При этом доля $S_{\text{мик}}$ в $S_{\text{орг}}$ имела незначительную сезонную динамику и изменялась в пределах 0,20-0,50 % во всех вариантах, не показывая между ними различий (рис. 2, А). В АТ содержание $S_{\text{орг}}$ статистически значимо ($p \leq 0,05$) изменялось с 1,7-2,0 % в контроле до 2,1-2,4 % в вариантах с биоуглем (см. рис. 1, Е). Показатель $S_{\text{мик}}/S_{\text{орг}}$ имел заметную сезонную динамику и тенденцию снижения с 0,51-1,26 % в контроле до 0,44-1,12 % в вариантах с биоуглем (см. рис. 2, Б).

Доля $S_{\text{мик}}$ в составе $S_{\text{орг}}$ в АА оказалась значительно ниже, чем в АТ, что диагностирует микробное сообщество супесчаной почвы как недостаточно зрелое с низким качеством органического вещества. При этом добавление биоугля практически не влияло на показатель $S_{\text{мик}}/S_{\text{орг}}$ в АА, значительно снижая его в АТ. Эта особенность объясняется тем, что биоуголь вызывал достоверное ($p \leq 0,05$) увеличение общего органического углерода обеих почв до 20 %, при этом $S_{\text{мик}}$ в АТ снижался, отражая недостаток доступного субстрата в суглинистой почве. В АА, напротив, происходил рост содержания $S_{\text{мик}}$, что, по-видимому, отражало всплеск активности К-стратегов при минерализации труднодоступных соединений биоугля (32-34). Так, в исследовании В.Ю. Шахназаровой с соавт. (35) при добавлении биоугля в супесчаную почву возрастало количество олиготрофных бактерий. В некоторых случаях при внесении в почву древесного биоугля отмечено увеличение числа микроскопических грибов, утилизирующих более прочно связанные соединения углерода (36, 37).

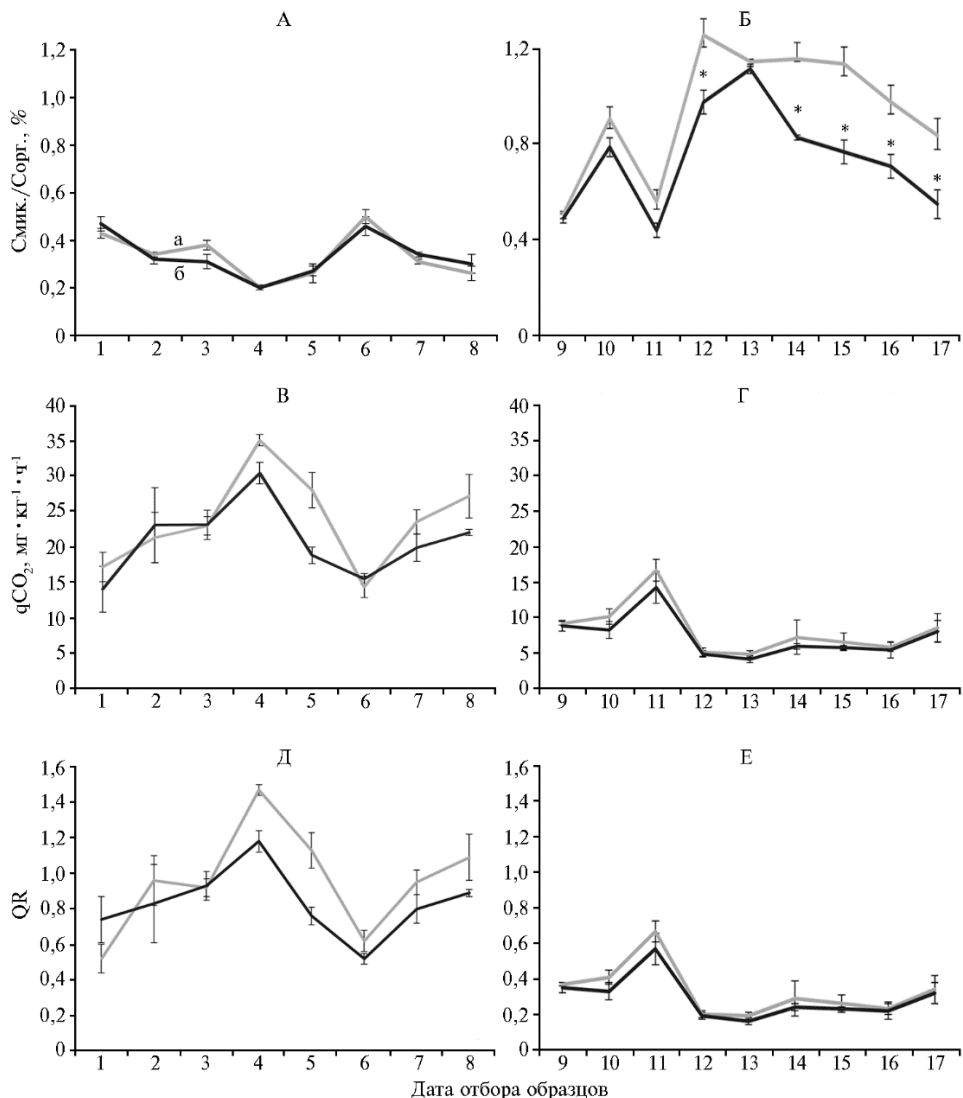


Рис. 2. Показатели $S_{\text{мик.}}/S_{\text{орг.}}$ (А, Б), микробного метаболического коэффициента (В, Г) и коэффициента микробного дыхания (Д, Е) для агроэкоза альфегумусового (А, В, Д) и агроэкоза текстурно-дифференцированного (Б, Г, Е) в контроле (а) и при внесении биоугля (б) ($n = 4$, $M \pm \text{SEM}$). Даты отбора образцов: 1 — 15.07.2018, 2 — 15.08.2018, 3 — 19.09.2018, 4 — 14.05.2019, 5 — 19.06.2019, 6 — 16.07.2019, 7 — 19.08.2019, 8 — 17.09.2019 (Лаборатория агротехнологий «Вилга» КарНЦ РАН, п. Виданы, Пряжинский р-н, Карелия); 9 — 26.06.2019, 10 — 25.07.2019, 11 — 30.08.2019, 12 — 20.09.2019, 13 — 29.05.2020, 14 — 30.06.2020, 15 — 27.07.2020, 16 — 25.08.2020, 17 — 23.09.2020 (Агробиологическая станция КарНЦ РАН, г. Петрозаводск).
* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

Микробный метаболический коэффициент $q\text{CO}_2$ для АА охватывал широкий диапазон — от 14,1 до 35,2 мг·кг⁻¹·ч⁻¹ и имел значительную сезонную динамику с тенденцией снижения в вариантах с биоуглем (см. рис. 2, В). Коэффициент микробного дыхания QR находился в пределах 0,52-1,47, также показывал сезонную динамику и снижался в вариантах с биоуглем (см. рис. 2, Д). Для АТ $q\text{CO}_2$ заметно изменялся по сезонам в пределах 4,1-16,6 мг·кг⁻¹·ч⁻¹ в обоих вариантах и был несколько ниже в образцах с биоуглем (см. рис. 2, Г). QR имел схожую динамику и значения 0,16-0,67 (см. рис. 2, Е).

Показатели $q\text{CO}_2$ для АА были значительно выше, чем для АТ, что указывает на более низкую микробную биомассу и в целом менее стабиль-

ное микробное сообщество в супесчаной почве. Подобная закономерность отмечена в супесчаных почвах по сравнению с суглинистыми (38, 39). Сезонные всплески qCO_2 могут быть вызваны поступлением легко-минерализуемых растительных остатков и развитием г-стратегов, специализирующихся на их утилизации (40, 41). При применении биоугля qCO_2 имел тенденцию к снижению, особенно для АА, отмеченную другими исследователями (9, 42, 43). Следовательно, в этом случае создаются более благоприятные условия среды и снижаются затраты энергии на формирование единицы биомассы микроорганизмов. Известно, что добавление щелочного биоугля в почвы с низкими значениями рН среды улучшает рост микроорганизмов и увеличивает эффективность использования углерода (11).

Величина коэффициента микробного дыхания QR отражает воздействие антропогенных или климатических факторов на почвенное микробное сообщество и считается интегральным показателем экологического состояния почв (44). Величина QR была меньше для АТ по сравнению с АА, отражая большую устойчивость и экологическое благополучие микробного сообщества суглинистой почвы. Внесение биоугля несколько снижало QR в почвах, этот эффект был более выражен для АА, аналогичную закономерность отмечали и другие исследователи (45).

Таким образом, полевой мониторинг экофизиологических параметров микробных сообществ в почвах разного гранулометрического состава при внесении биоугля выявил многофакторные и нелинейные воздействия условий среды на динамику исследованных показателей. Базальное дыхание меньше зависело от погодных условий по сравнению с углеродом микробной биомассы и связанными с ним коэффициентами, на величину которых, по-видимому, также влияло поступление органических остатков. В агроземе альфегумусовом супесчаном микробная биомасса, зрелость и устойчивость микробного сообщества, как и качество органического вещества, изначально ниже, чем в агроземе текстурно-дифференцированном суглинистом. Внесение биоугля оказывало противоположный эффект на эти почвы. Несмотря на стабильное повышение уровня общего органического углерода в обеих почвах, показатели базального дыхания и содержания углерода микробной биомассы при внесении биоугля в агрозем текстурно-дифференцированный имели тенденцию к снижению, также достоверно ($p \leq 0,05$) снижалась доля $S_{мик}$ в составе органического углерода, что свидетельствует о недостатке доступного для микроорганизмов субстрата. При этом микробный метаболический коэффициент qCO_2 и коэффициент микробного дыхания QR снижались незначительно и недостоверно. В агроземе альфегумусовом происходило недостоверное увеличение коэффициента базального дыхания и статистически значимое ($p \leq 0,05$) для некоторых дат отбора образцов повышение $S_{мик}$, что, по-видимому, указывало на всплеск активности К-стратегов. Добавление биоугля не влияло на долю $S_{мик}$ в общем органическом углероде агрозема альфегумусового. При этом микробный метаболический коэффициент и коэффициент микробного дыхания уменьшались, то есть для микроорганизмов складывались более благоприятные условия среды. В целом добавление биоугля увеличивало адаптивный потенциал микробного сообщества супесчаной почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gul S., Whalen J.K., Thomas B.W., Sachdeva V., Deng H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 206: 46-59 (doi: 10.1016/j.agee.2015.03.015).
2. Kuppusamy S., Thavamani P., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Agronomic and

- remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. *Environment International*, 2016, 87: 1-12 (doi: 10.1016/j.envint.2015.10.018).
3. Hawthorne I., Johnson M.S., Jassal R.S., Black T.A., Grant N.J., Smukler S.M. Application of biochar and nitrogen influences fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a forest soil. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192: 203-214 (doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.066).
 4. Liu X., Zheng J., Zhang D., Cheng K., Zhou H., Zhang A., Li L., Joseph S., Smith P., Crowley D., Kuzyakov Y., Pan G. Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 259-265 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.179).
 5. Šlapakova B., Jeřábková J., Voříšek K., Tejnecký V., Drabek O. The biochar effect on soil respiration and nitrification. *Plant, Soil and Environment*, 2018, 64(3): 114-119 (doi: 10.17221/13/2018-PSE).
 6. Walkiewicz A., Kalinichenko K., Kubaczyński A., Brzezińska M., Bieganski A. Usage of biochar for mitigation of CO₂ emission and enhancement of CH₄ consumption in forest and orchard Haplic Luvisol (Siltic) soils. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156: 103711 (doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103711).
 7. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Шимански В., Игаз Д., Хорак Я. Изменение биологических и физических параметров почв разного гранулометрического состава после внесения биоугля. *Сельскохозяйственная биология*, 2017, 52(3): 471-477 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.471rus).
 8. Дубровина И.А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии. *Почвоведение*, 2021, 12: 1523-1534 (doi: 10.31857/S0032180X21120054).
 9. Khadem A., Raiesi F. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 16-27 (doi: 10.1016/j.apsoil.2017.02.018).
 10. Wu D., Senbayram M., Zang H., Ugurlar F., Aydemir S., Вггегemann N., Kuzyakov Y., Bol R., Blagodatskaya E. Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions from sandy and clay soils. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 121-127 (doi: 10.1016/j.apsoil.2018.05.009).
 11. Zhou H., Zhang D., Wang P., Liu X., Cheng K., Li L., Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Van Zwieten L., Pan G. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 239: 80-89 (doi: 10.1016/j.agee.2017.01.006).
 12. Wang Z., Zhao M., Yan Z., Yang Y., Niklas K.J., Huang H., Mipam T.D., He X., Hu H., Wright S.J. Global patterns and predictors of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Catena*, 2022, 211: 106037 (doi: 10.1016/j.catena.2022.106037).
 13. Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Вертебный В.Е., Хорак Я., Москвин М.А., Дубовицкая В.И., Хомяков Ю.В. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агро-дерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем. *Сельскохозяйственная биология*, 2022, 57(3): 476-485 (doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus).
 14. Oladele S.O., Adetunji A.T. Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO₂-C emission and stabilized soil organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 76-86 (doi: 10.1016/j.iswcr.2020.09.002).
 15. Sorrenti G., Buriani G., Gaggna F., Baffoni L., Spinelli F., Gioia D., Toselli M. Soil CO₂ emission partitioning, bacterial community profile and gene expression of *Nitrosomonas* spp. and *Nitrobacter* spp. of a sandy soil amended with biochar and compost. *Applied Soil Ecology*, 2017, 112: 79-89 (doi: 10.1016/j.apsoil.2017.01.003).
 16. *Атлас Карельской АССР* /Под ред. А.Г. Дурова. М., 1989.
 17. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1978, 10(3): 215-221 (doi: 10.1016/0038-0717(78)90099-8).
 18. Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. *Информационно-аналитический обзор гидрометеорологических условий на территории Республики Карелия*. Режим доступа: <https://www.kareliameteo.ru/press-center.html>. Дата обращения: 02.02.2021.
 19. Xu X., Thornton P.E., Post W.M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749 (doi: 10.1111/geb.12029).
 20. Zhu L.-X., Xiao Q., Cheng H.-Y., Shi B.-J., Shen Y.-F., Li S.-Q. Seasonal dynamics of soil microbial activity after biochar addition in a dryland maize field in North-Western China. *Ecological Engineering*, 2017, 104(Part A): 141-149 (doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.026).
 21. Wang Y., Liu X., Chen F., Huang R., Deng X., Jiang Y. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* forests with different ages. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31: 2377-2384 (doi: 10.1007/s11676-019-01058-w).
 22. Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(4): 641-652 (doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x).

23. Помазкина Л.В., Семенова Ю.В. Воздействие климатических изменений и загрязнения тяжелыми металлами разных типов почв на трансформацию соединений углерода в агроэкосистемах лесостепи Прибайкалья. *Почвоведение*, 2018, 5: 617-629 (doi: 10.7868/S0032180X18050106).
24. Liu S., Zhang Y., Zong Y., Hu Z., Wu S., Zhou J., Jin Y., Zou J. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*, 2016, 8(2): 392-406 (doi: 10.1111/gcbb.12265).
25. Palansooriya K.N., Wong J.T.F., Hashimoto Y., Huang L., Rinklebe J., Chang S.X., Bolan N., Wang H., Ok Y.S. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 2019, 1: 3-22 (doi: 10.1007/s42773-019-00009-2).
26. Deshoux M., Sadet-Bourgeteau S., Gentil S., Prévost-Bouré N.C. Effects of biochar on soil microbial communities: a meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 2023, 902: 166079 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166079).
27. Мухина И.М., Дурова А.С. Влияние биоугля на биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и эффективность использования растениями питательных веществ. *Агрофизика*, 2017, 1: 26-35.
28. Lavoie M., Mack M., Schuur E. Effects of elevated nitrogen and temperature on carbon and nitrogen dynamics in Alaskan arctic and boreal soils. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G3): G03013 (doi: 10.1029/2010jg001629).
29. Laghari M., Mirjat M.S., Hu Z., Fazal S., Xiao B., Hu M., Chen Z., Guo D. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena*, 2015, 135: 313-320 (doi: 10.1016/j.catena.2015.08.013).
30. Рижия Е.Я., Мухина И.М., Вертебный В.Е., Хорак Я., Конончук П.Ю., Хомяков Ю.В. Ферментативная активность и эмиссия закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы с биоуглем. *Сельскохозяйственная биология*, 2017, 52(3): 464-470 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.464rus).
31. Qayyum M.F., Steffens D., Reisenauer H.P., Schubert S. Kinetics of carbon mineralization of biochars compared with wheat straw in three soils. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1210-1220 (doi: 10.2134/jeq2011.0058).
32. Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В. *Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды*. М., 2016.
33. Журавлева А.И., Мякшина Т.Н., Благодатская Е.В. Влияние пирогенно-измененных субстратов на минерализационную активность и стратегии роста микроорганизмов серой лесной почвы. *Микробиология*, 2011, 80(2): 207-218.
34. Shang W., Razavi B.S., Yao S., Hao C., Kuzyakov Y., Blagodatskaya E., Tian J. Contrasting mechanisms of nutrient mobilization in rhizosphere hotspots driven by straw and biochar amendment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 187: 109212 (doi: 10.1016/j.soilbio.2023.109212).
35. Шахназарова В.Ю., Орлова Н.Е., Орлова Е.Е., Банкина Т.А., Якконен К.Л., Рижия Е.Я., Кичко А.А. Изменения таксономического состава и структуры прокариотного сообщества агродерново-подзолистой почвы при внесении биоугля. *Сельскохозяйственная биология*, 2020, 55(1): 163-173 (doi: 10.15389/agrobiology.2020.1.163rus).
36. Guo X.F., Li H.S., Hu Y.M. Effects of biochar on the diversity and community structure of soil fungi in intercropping system. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4): 8817-8834 (doi: 10.15666/aeer/1704_88178834).
37. Tarin M.W.K., Fan L., Xie D., Tayyab M., Rong J., Chen L., Muneer M.A., Zheng Y. Response of soil fungal diversity and community composition to varying levels of bamboo biochar in red soils. *Microorganisms*, 2021, 9(7): 1385 (doi: 10.3390/microorganisms9071385).
38. Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв Южного Подмосковья. *Почвоведение*, 2011, 10: 1231-1245.
39. Winter K., Beese F. The spatial distribution of soil microbial biomass in a permanent row crop. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 322-326 (doi: 10.1007/BF00336102).
40. Маслов М.Н., Токарева О.А., Караванова Е.И., Маслова О.А., Копейна Е.И. Динамика биологической активности и водорастворимого органического вещества в почвах горной тундры Хибин на склонах разной экспозиции. *Почвоведение*, 2021, 4: 436-450 (doi: 10.31857/S0032180X21040110).
41. Thiffault E., Hannam K.D., Quideau S.A., Paré D., Bélanger N., Oh S.-W., Munson A.D. Chemical composition of forest floor and consequences for nutrient availability after wildfire and harvesting in the boreal forest. *Plant and Soil*, 2008, 308: 37-53 (doi: 10.1007/s11104-008-9604-6).
42. Рижия Е.Я., Хомяков Ю.В., Мухина И.М., Москвин М.А., Гурова Т.А. Почвенно-биологические процессы в дерново-подзолистой супесчаной почве с биоуглем. *Агрофизика*, 2019, 3: 26-32 (doi: 10.25695/AGRPH.2019.03.05).
43. Zheng J., Chen J., Pan G., Liu X., Zhang X., Li L., Bian R., Cheng K., Zheng J. Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 206-217 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.135).

44. Завьялова Н.Е., Ковалевская Н.П., Шаравин Д.Ю. Влияние длительного применения минеральных удобрений на экофизиологические показатели микробсообществ дерново-подзолистой почвы Предуралья. *Агрохимия*, 2020, 1: 3-8 (doi: 10.31857/S0002188120010147).
45. Ma R., Wu X., Liu Z., Yi Q., Xu M., Zheng J., Bian R., Zhang X., Pan G. Biochar improves soil organic carbon stability by shaping the microbial community structures at different soil depths four years after an incorporation in a farmland soil. *Current Research in Environmental Sustainability*, 2023, 5: 100214 (doi: 10.1016/j.crsust.2023.100214).

¹Институт биологии ФИЦ Карельский научный центр РАН,

185910 Россия, г. Петрозаводск, Пушкинская, 11,
e-mail: vorgo@mail.ru ✉;

²Институт леса ФИЦ Карельский научный центр РАН,

185910 Россия, г. Петрозаводск, Пушкинская, 11,
e-mail: lena_moshkina@mail.ru

Поступила в редакцию
15 ноября 2023 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2024, V. 59, № 5, pp. 943-954

IMPACT OF BIOCHAR ON FUNCTIONAL ACTIVITY DYNAMICS OF MICROBIAL COMMUNITIES IN BOREAL SOILS

I.A. Dubrovina¹ ✉, E.V. Moshkina²

¹Institute of Biology, Karelian Research Centre RAS, 11, Pushkinskaya, Petrozavodsk, 185910 Russia, e-mail vorgo@mail.ru (✉ corresponding author);

²Forest Research Institute, Karelian Research Centre RAS, 11, Pushkinskaya, Petrozavodsk, 185910 Russia, e-mail lena_moshkina@mail.ru

ORCID:

Dubrovina I.A. orcid.org/0000-0001-7229-6611

Moshkina E.V. orcid.org/0000-0003-3752-4126

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Performed using analytical equipment of Core Facility of the Karelian Research Center RAS within the framework of state task No. FMEN-2022-0012.

Final revision received November 15, 2023

doi: 10.15389/agrobiology.2024.5.943eng

Accepted January 11, 2024

Abstract

Biochar is the product of the pyrolysis of various organic materials with high carbon contents. Owing to its aromatic structure, high porosity, and cation exchange capacity, biochar has a significant impact on the physical, chemical, and biological properties of soils. The use of biochar in agriculture provides an opportunity for safe waste disposal, soil quality, and carbon sequestration. One of the few studied consequences of biochar application is the change in the structure, abundance, and ecophysiological status of soil microorganisms. In this study, we established for the first time that biochar has a multidirectional effect on the functioning of boreal soil microbial communities. The purpose of this study was to study the effects of wood biochar on basal respiration, microbial biomass carbon, and the microbiological quotients of boreal soils of various textures. The studies were conducted in the middle taiga subzone of Karelia. The sites were laid out in 2018 and 2019 on arable land plots with soils of different textures and normal moisture. The coarse soil texture was represented by the loamy sand Umbric Podzol on lake sands (UP) (Laboratory of Agrotechnology Vilga, Karelian Research Center RAS, Vidany settlement, Pryazhinsky District, Karelia, 61°52'22.8" N, 34°0'36" E). The fine soil texture was represented by the clay loam Umbric Retisol on loamy moraine (UR) (Agrobiological Station, Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, 61°45'3.6" N, 34°21'12.4" E). Plots of biochar and control sites with areas of 5 m² were laid out randomly in four replicates. Birch biochar (GOST 7657-84), grade A (Russia) at a dose of 1.5 kg/m² (15 t/ha) with a fraction size ≤ 1 cm was used in the study. Biochar was applied once and dug manually to a depth of 20-25 cm. No additional fertilizers were used. Potatoes were grown in the first year, and green manure was grown in the second year. Soil samples were collected monthly during the vegetation periods of 2018-2019 for plots with UP and 2019-2020 for plots with UR. Soil was collected from a depth of 5-20 cm in the arable horizon using the "envelope" method from each plot, and the mixed samples were analyzed in four replicates. The content of organic carbon (C_{org.}) by high-temperature catalytic combustion in a TOC-L CPN ("Shimadzu", Japan) analyzer was determined. The rate of basal (microbial) respiration (BR) was measured in native soil incubated for 24 h at 22 °C. The content of microbial biomass carbon (C_{mic.}) was determined using the substrate-induced respiration method and was estimated using the rate of initial maximum respiration of microorganisms after enrichment of the soil with glucose (incubation for 1.5-2 h at 22 °C). Changes in CO₂ concentration was recorded with a NDIR gas analyzer (SenseAir, Sweden). The parameters of the ecophysiological status of the microbial community were determined:

the share of microbial biomass carbon in soil organic carbon $C_{mic.}/C_{org.}$, the metabolic quotient qCO_2 , and microbial respiration quotient QR . A study of the functional activity of microbial communities revealed the multifactorial and nonlinear effects of environmental conditions on the dynamics of the studied indicators at two-year monitoring sites in soils of different textures. Basal respiration was less dependent on weather conditions than microbial biomass carbon and related quotients, the magnitude of which was also influenced by organic residue supply. UP had lower microbial biomass, a less mature microbial community, lower stability, and lower organic matter quality than UR. The application of biochar has different effects on these soils. Despite the stable and reliable increase ($p \leq 0,05$) in the total organic carbon of both soils (up to 20 %), when BC was added to UR, the BR , $C_{mic.}$, and microbial quotients tended to significantly decrease ($p \leq 0,05$), reflecting the lack of substrates available for microorganisms. At the same time, the qCO_2 and QR indicators decreased slightly but nonsignificantly. There was an increase in BR (not statistically significant) and $C_{mic.}$ (significant at $p \leq 0.05$ for some dates) in UP, apparently reflecting a surge in K-strategist activity during the mineralization of hard-to-reach biochar compounds. The addition of biochar did not affect the microbial quotient of UP. At the same time, a decrease in the metabolic and microbial respiration quotients indicated that more favorable environmental conditions were being developed for microorganisms. Overall, biochar supplementation increased the adaptive potential of UP microbial communities.

Keywords: biochar, basal respiration, microbial biomass carbon, soil organic carbon, microbial quotient, metabolic quotient, microbial respiration quotient.