

Изменчивость углеродного цикла агроэкосистем в условиях обработки агротёмно-серых почв живыми культурами цианобактерий и микроводорослей

© 2025. Н. П. Неведров¹, к. б. н., доцент,
Е. Д. Будаева¹, студент, В. А. Лукьянов², к. б. н., с. н. с.,
¹Курский государственный университет,
305000, Россия, г. Курск, ул. Радищева, д. 33,
²Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 70б,
e-mail: 9202635354@mail.ru

В последние десятилетия интенсивное сельскохозяйственное освоение земель привело к значительным потерям органического углерода почвами. В условиях Курской агломерации исследовалось влияние обработки агротёмно-серой почвы (Grey-Luvic Phaeozems Hortic) биопрепаратами на основе цианобактерии *Nostoc punctiforme* Hariot и микроводоросли *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss на почвенную эмиссию диоксида углерода под различными сельскохозяйственными культурами: соей (*Glycine max* (L.) Merr.), ячменём (*Hordeum vulgare* L.), овсом (*Avena sativa* L.), озимой рожью (*Secale cereale* L.). Выявлено, что обработка почвы исследуемыми культурами цианобактерий и микроводорослей изменяет интенсивность процессов углеродного цикла. В условиях лабораторных и полевых исследований было установлено, что обработка поверхности почвы живой культурой *C. sorokiniana* способствует увеличению численности основных групп почвенных микроорганизмов (бактерий – в 25,6 раза, грибов – в 37,9 раза и актиномицетов – в 57,3 раза), а также, в зависимости от возделываемой культуры, может приводить как к росту скорости почвенной эмиссии CO₂ от 6,0 до 41,8%, так и к уменьшению скорости потоков на 6,1–50,8%. При возделывании сои, овса и ржи в условиях агротёмно-серой почвы, обработанной культурой *C. sorokiniana*, удалось снизить общее количество эмитируемого в атмосферу органического углерода на 10,8%. Вне зависимости от обработки почв биопрепаратом на основе микроводорослей в исследуемый временной период наблюдались потери почвенного органического углерода в пахотном горизонте почвы, которые под разными возделываемыми культурами составили от 0,6 до 3,4 т/га.

Ключевые слова: эмиссия CO₂, *Chlorella sorokiniana*, *Nostoc punctiforme*, соя, овёс, рожь, ячмень, почвенный органический углерод, микробиологическая активность.

Variability of agroecosystem carbon cycle in Grey-Luvic Phaeozems Hortic treated with live cultures of cyanobacteria and microalgae

© 2025. N. P. Nevedrov¹ ORCID: 0000-0003-1121-0671
E. D. Budaeva¹ ORCID: 0009-0009-0863-8686
V. A. Lukyanov² ORCID: 0000-0003-1764-4083
¹Kursk State University,
33, Radishcheva St., Kursk, Russia, 305000,
²Kursk Federal Agrarian Research Center,
70b, Karla Marksa St., Kursk, Russia, 305021,
e-mail: 9202635354@mail.ru

Agroecosystem soils contribute significantly to the variability of carbon cycling in the biosphere. Intensive agricultural development has led to historic losses of organic carbon in soils in recent decades. According to FAO, greenhouse gas emissions in the agricultural sector have doubled over the past 50 years. In the coming decades CO₂ emissions are expected to increase by another 30%. We studied the effect of treating Gray-Luvic Phaeozems Hortic with biological products based on the cyanobacterium *Nostoc punctiforme* Hariot and microalgae *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss on soil CO₂ emissions under *Glycine max* (L.) Merr., *Hordeum vulgare* L., *Avena sativa* L., and *Secale cereale* L. in the Kursk agglomeration. We revealed that the above soil treatment changes the intensity of soil carbon cycling. In laboratory and field studies we found that soil surface treatment with *C. sorokiniana* live culture increases the main groups of soil microorganisms abundance (bacteria – 25.6 times, fungi – 37.9 times and actinomycetes – 57.3 times).

In addition, it can result in both an increase in soil CO₂ emission rate of 6.0 to 41.8%, and decrease of 6.1% to 50.8% depending on the cultivated crop. Cultivating *G. max*, *A. sativa*, and *S. cereale* in Gray-Luvic Phaeozems Hortic treated with *C. sorokiniana*, reduced the total amount of organic carbon emitted into the atmosphere by 10.8%. The application of a biological product based on *C. sorokiniana* in spring and summer decreased the CO₂ emission rate, while autumn treatment, on the contrary, promoted soil CO₂ emission. Regardless of soil treatment with microalgae-based biopreparation, losses of soil organic carbon were observed in the topsoil in the studied time period, which under different cultivated crops ranged from 0.6 to 3.4 t/ha.

Keywords: CO₂ emission, *Chlorella sorokiniana*, *Nostoc punctiforme*, *Glycine max*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, *Secale cereale*, soil organic carbon, microbiological activity.

Глобальные климатические изменения во многом обусловлены изменениями биогеохимического цикла углерода [1–4]. Вклад почвы в глобальный углеродный цикл состоит в формировании почвенного органического резерва, где углерод может находиться от десятков до сотен и тысяч лет [2]. При этом жизнедеятельность почвенной биоты, а также некоторые почвенные абиотические процессы, сопровождаются выделением парниковых газов [5].

Ежегодное увеличение концентрации CO₂ в атмосфере объясняется возрастающей антропогенной активностью, обусловленной культурным и техническим развитием человечества и ростом численности населения [6–8]. При этом весомый вклад в глобальную эмиссию вносит сельскохозяйственная деятельность человека, сопровождающаяся ежегодным увеличением пахотных земель [9, 10].

В России объёмы эмитированного почвой диоксида углерода за вегетационный сезон варьируют от 500 и менее CO₂ кг/га в арктической зоне до 6000 CO₂ кг/га для чернозёмов лесостепи [11]. В регионах с интенсивной сельскохозяйственной деятельностью потери углерода почвами составляют до 800 кг C/га в год [11].

Одним из способов сохранения и повышения плодородия почв, а также способов регулирования углеродного баланса в агроэкосистемах может являться внесение в почву живых культур микроводорослей и цианобактерий [12].

Цель исследования заключалась в экологической оценке влияния применяемых культур *Nostoc punctiforme* Hariot и *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss на изменчивость почвенных потоков углерода в условиях агроэкосистем Курской области.

Объекты и методы исследования

В условиях лабораторных и полевых опытов (вегетационные сезоны 2022 и 2023 гг.) исследовались живые культуры *C. sorokiniana* и *N. punctiforme* на агротёмно-серых почвах

(PU (25 см) – AEL (31 см) – BEL (72 см) – Вt (104 см)) Агробиологической станции Курского государственного университета [13].

Для проведения лабораторного опыта использовали пластиковые контейнеры размером 20×15×6 см, в которые помещали агротёмно-серую почву (горизонт PU – органическое вещество – 3,4%, рН_{KCl} – 6,1, N/P/K 98/609/524 мг/кг) массой 1 кг, предварительно высушенную до воздушно-сухого состояния. Поверхность почвы дважды обрабатывали живыми культурами *N. punctiforme* и *C. sorokiniana* (43,9 мл/м²) путём опрыскивания в первый день эксперимента и перед посевом семян ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.). Содержание *C. sorokiniana* в рабочем растворе составляло 0,55 г/л, *N. punctiforme* – 0,60 г/л, в пересчёте на абсолютно сухой вес. В контрольном варианте обработку почвы проводили водой. Повторность опыта – трёхкратная.

Количественную оценку популяций микроводорослей проводили с помощью метода стёкол обрастания. На поверхность почвы укладывали покровные стёкла по 5 штук в каждую чашку Петри (во всех вариантах опыта и в каждой повторности), поддерживали влажность почвы около 50–60%. На пятый день экспозиции опыта проводили микроскопирование при увеличении ×400. Скорость эмиссии CO₂ измеряли с помощью инфракрасного газоанализатора (газоанализатор CO₂ AZ 7752, откалиброванный по Li-820) по методу закрытых камер [13] два раза: спустя 21 день после первой обработки биопрепаратами (до посева семян) и после вегетации культур ячменя и сои (спустя 19 суток после второй обработки почвы). Объём камеры составлял 1,56 л, площадь напочвенного основания (ограничивающего кольца) – 95 см², время экспозиции при замере – 3 мин. Во время замеров осуществляли контроль температуры и влажности почвы.

Влияние обработок почвы биопрепаратами на численность основных групп микроорганизмов (бактерии, грибы, актиномицеты)

оценивали методом посева из разведений почвенных суспензий на ГМФ-агар (агар на основе гидролизата говяжьего мяса ферментативного), агаризованные среды Чапека и Гаузе I.

Полевые исследования проводили с использованием мелкоделяночного опыта, размер делянок – 1×2 м, повторность по каждой культуре – пятикратная. Проведённые в вегетационные периоды 2022 и 2023 гг. опыты отличались приёмами внесения биопрепарата. Внесения корректировали намеренно, исходя из полученных результатов в первый вегетационный сезон. В вегетационный сезон 2022 г. исследование проводилось на трёх культурах: овёс (*Avena sativa* L.), озимая рожь (*Secale cereale* L.) и соя (*Glycine max* (L.) Merr.). Почву под посевами обрабатывали одинаковой дозой (4 л/га, при содержании в пересчёте на абсолютно сухую массу *C. sorokiniana* – 0,55 г/л) суспензии микроводоросли *C. sorokiniana* путём опрыскивания поверхности почвы. Контрольные делянки обрабатывали аналогичным объёмом воды. Обработку проводили один раз за сезон при установлении среднесуточной температуры воздуха не менее 15 °С в фазу развития плодов культур. Замеры скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы осуществляли ежемесячно.

В вегетационный сезон 2023 г. под культуры сои и ячменя вносили суспензию микроводоросли *C. sorokiniana* в дозе 4 л/га ежемесячно с июня по сентябрь (всего 4 обработки). Измерения почвенной эмиссии CO₂ проводили до обработки почв биопрепаратом и спустя 3–5 суток после.

Для проведения исследований в полевых условиях применяли камерный метод, использовали инфракрасный газоанализатор CO₂ SENSIRION 1-101625-10 (SCD30), откалиброванный по Li-820 и концентрации CO₂ в нижней тропосфере – 400 ppm. Объём камеры составлял 6,7 л, площадь напочвенного основания (ограничивающего кольца) – 314 см², время экспозиции при замере – 3 мин. Параллельно с замерами скорости почвенной эмиссии CO₂ измеряли температуру (термометр Checktemp HI98501) и влажность почвы (влагомер MC-7828 SOIL) [14]. Измерения проводили в пятикратной повторности.

Для изучения динамики накопления и сезонных потерь углерода исследуемыми почвами определяли содержание органического углерода по Тюрину (ГОСТ 26213-91) в каждом варианте полевого опыта 2023 г. Пробы из горизонта PU каждой делянки отбирали в мае и октябре.

Статистическая обработка и графический дизайн выполнены с использованием средств Microsoft Excel 2007. Корреляционный анализ (корреляция Пирсона) проводили по 40 и 120 измерениям исследуемых параметров для каждого варианта опыта. Данные по потокам представлены в виде «среднее значение ± доверительный интервал» за каждый день отбора с каждого участка.

Метеорологические условия вегетационного сезона (май–октябрь) 2022 и 2023 гг. заметно различались (рис. 1).

Количество осадков, выпавших с мая по октябрь 2022 г., было на 16% меньше, чем в 2023 г. Наиболее значительная разница была характерна для июля – 128,8 мм и сентября – 140,9 мм. Также в сентябре сумма выпавших осадков диаметрально противоположно отклонялась от нормы, превосходя её в 2022 г. в 2,4 раза и снижаясь в 2023 г. – в 57,3 раза. Наиболее обильные осадки наблюдали в июле 2023 г. – 196,5 мм. В целом, рассматриваемые вегетационные сезоны характеризовались контрастными погодными условиями, что позволяло установить изменчивость углеродного цикла в определённые временные периоды при разных климатических сценариях.

Результаты и обсуждение

Лабораторные опыты. Обработка почв биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* приводила к увеличению численности этой водоросли в 1,6 раза по сравнению с контрольным вариантом и в 1,47 раза по сравнению с вариантом, где почва была обработана *N. punctiforme* ($p \leq 0,05$).

Обработка *N. punctiforme* приводила к увеличению количества этой цианобактерии в 10,4 раза по сравнению с контролем и в 8,2 раза по сравнению почвой, обработанной *C. sorokiniana* ($p \leq 0,05$).

Обработка пара (варианта опыта без высева культур) суспензиями цианобактерий и микроводорослей приводила к достоверному ($p \leq 0,05$) увеличению эмиссии диоксида углерода в 1,28–1,75 раза по сравнению со значениями, полученными на почве без обработки (рис. 2).

В варианте с культурой сои обработка почвы такими биопрепаратами значимо снижала почвенную эмиссию CO₂ по сравнению с контролем: *C. sorokiniana* – в 1,8 раза, *N. punctiforme* – в 2,25 раза. В опытах с культурой ячменя внесение суспензии *C. sorokiniana* приводило к увеличению почвенной эмиссии

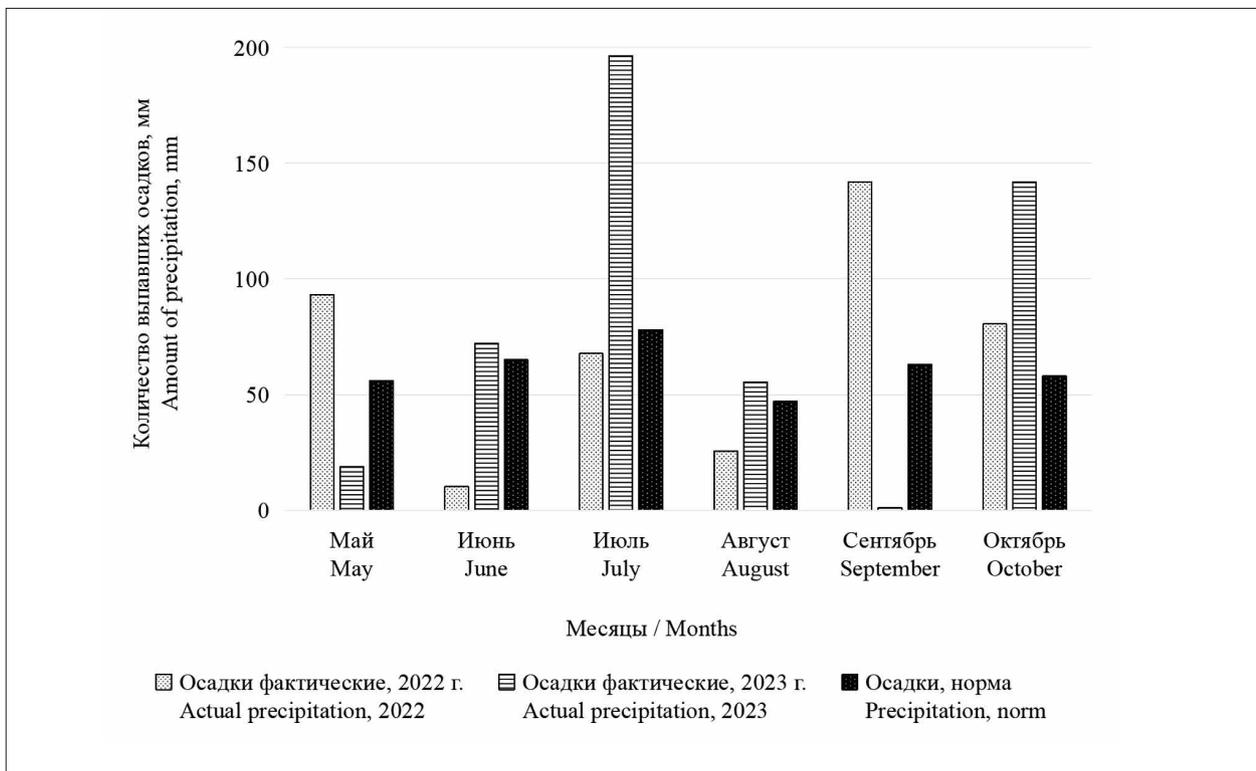


Рис. 1. Количество выпавших осадков за вегетационные периоды 2022 и 2023 гг. в городе Курске
 Fig. 1. The amount of monthly precipitation for 2022 and 2023 growing seasons in Kursk

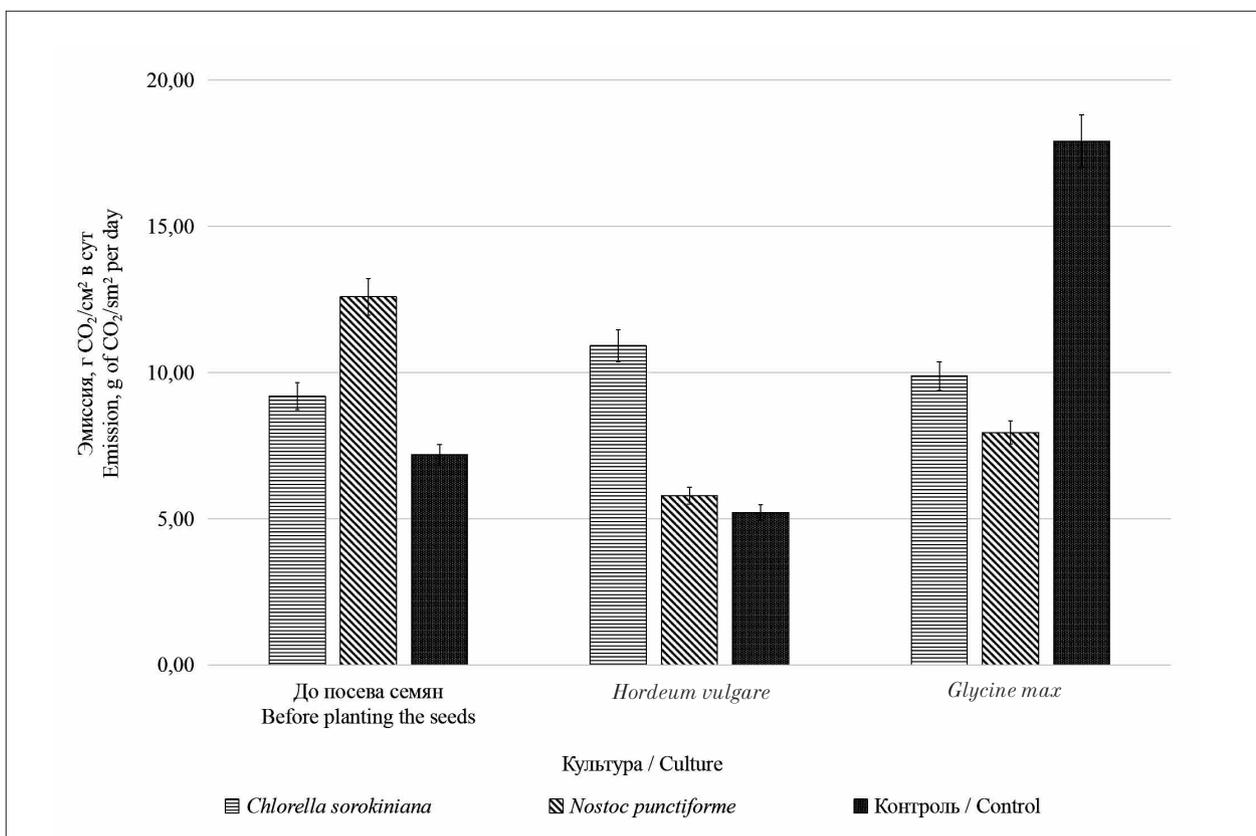


Рис. 2. Зависимость скорости эмиссии CO₂ с поверхности почв от обработки культурами цианобактерий и микроводорослей при возделывании сои и ячменя
 Fig. 2. Dependence of CO₂ emission rate from topsoil on treatment with *Nostoc punctiforme* and *Chlorella sorokiniana* under *Glycine max* and *Hordeum vulgare* cultivation

Таблица 2 / Table 2

Количество почвенных микроорганизмов при обработке почвы живыми культурами цианобактерий и микроводорослей / The number of soil microorganism major groups in soil treatment with *Nostoc punctiforme* and *Chlorella sorokiniana* live cultures

Биопрепарат Biopreparation	Количество почвенных микроорганизмов, КОЕ/г почвы Soil microorganism number, CFU/g of soil		
	Бактерии Bacteria	Грибы Fungus	Актиномицеты Actinomycetes
<i>C. sorokiniana</i>	$(29 \pm 5) \cdot 10^5$	$(16 \pm 7) \cdot 10^5$	$(39,6 \pm 0,8) \cdot 10^5$
<i>N. punctiforme</i>	$(62 \pm 14) \cdot 10^3$	$(69 \pm 14) \cdot 10^3$	$(59 \pm 4) \cdot 10^3$
Контроль / Control	$(11,5 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(4,1 \pm 1,1) \cdot 10^4$	$(6,9 \pm 0,9) \cdot 10^4$

CO₂ по сравнению с контролем в 2,1 раза и по сравнению с вариантом, обработанным суспензией *N. punctiforme*, в 1,9 раза. В свою очередь, обработка биопрепаратом на основе *N. punctiforme* не приводила к значительным изменениям почвенной эмиссии CO₂ по сравнению с контролем.

Также было проведено исследование влияния обработки биопрепаратами на численность почвенных микроорганизмов (табл. 2).

Внесение *C. sorokiniana* способствовало увеличению численности всех исследуемых групп: бактерий, грибов и актиномицетов – в 25,6, 37,9 и 57,3 раза относительно контрольного варианта без обработки почвы. Обработка почвы биопрепаратом на основе *N. punctiforme* снизила количество бактерий в 1,8 раза и актиномицетов в 1,2 раза, увеличила численность грибов в 1,7 раза относительно контрольного варианта.

Полевые опыты. В вегетационный период 2022 г. внесение суспензии микроводоросли *C. sorokiniana* под культуру овса снизило скорость почвенных потоков диоксида углерода в летние месяцы на 26,6–50,8% относительно значений контрольных делянок, однако в октябре и ноябре после уборки урожая значения скорости эмиссии CO₂ заметно повышались и превосходили таковые для необработанных почв в 3,3–3,8 раза соответственно (рис. 3).

Под культурой озимой ржи в июле в варианте опыта с обработкой почв биопрепаратом значения скорости эмиссии CO₂ были выше, чем в контрольном варианте. Однако в августе скорость потоков CO₂ с поверхности почвы на опытном участке снижалась в 1,3–1,5 раза относительно контрольного.

В осенние месяцы существенных различий в скорости эмиссии между контрольным вариантом и вариантом с обработанной *C. sorokiniana* почвой не наблюдалось (рис. 3).

Внесение живой культуры микроводоросли в почву под сою не приводило к изменениям скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы.

Почвенная эмиссия CO₂ коррелировала с температурой почвы ($r=0,65$, $t=11,93$ при $n=120$) и влажностью почвы ($r=-0,19$, $t_p=2,29$ при $n=120$).

В целом объём эмитируемого за период исследования CO₂ из обработанных *C. sorokiniana* почв был ниже, чем из необработанных под всеми исследуемыми культурами. Наибольшее количество CO₂, вне зависимости от обработки почв *C. sorokiniana*, эмитировали почвы в варианте опыта с культурой сои: в 1,2–1,4 раза больше, чем в варианте с культурой овса, и в 1,3 раза больше, чем в варианте с культурой озимой ржи.

Ежемесячное внесение живой культуры *C. sorokiniana* на поверхность агротёмно-серой почвы при выращивании сои, как правило, способствовало снижению скорости почвенной эмиссии CO₂ (рис. 4).

В отдельные месяцы скорость почвенных потоков CO₂ после внесения биопрепарата снижалась (на 4,0–18,8%) ($p \leq 0,05$) относительно значений этого показателя до внесения (рис. 4).

Внесение культуры *C. sorokiniana* в агротёмно-серую почву при возделывании сои позволило сократить количество эмитируемого почвой углерода на 10,8% (с 4,1 до 3,7 кг С/м²).

Под культурой ячменя значения скорости почвенных потоков CO₂ перед внесением суспензии *C. sorokiniana* значимо отличались: на опытных делянках значения эмиссии были ниже в 1,37 раза. Внесение биопрепарата на основе микроводоросли в первый месяц привело к увеличению значений почвенной эмиссии до уровня интенсивности потоков газа с поверхности почв контрольных делянок. Дальнейшее внесение микроводоросли поддерживало значения в течение июля на уровне 32–33 г CO₂/м² в сут. В сентябре на

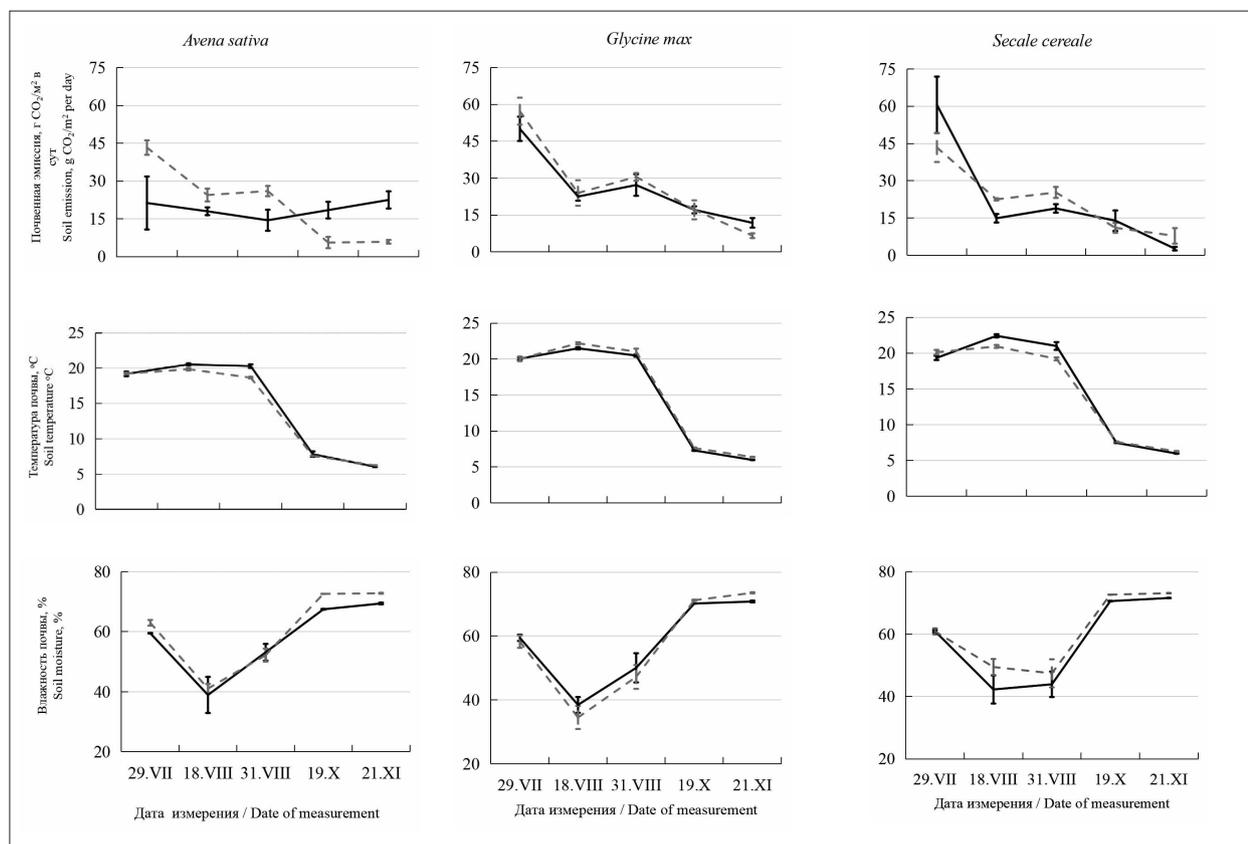


Рис. 3. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ и гидротермических условий при обработке агротёмно-серой почвы биопрепаратом *Chlorella sorokiniana* под разными культурами в 2022 г.: сплошная линия – с применением *C. sorokiniana*; пунктирная линия – контроль
Fig. 3. Grey-Luvic Phaeozems Hortic under different crops treated with *Chlorella sorokiniana* biopreparation (solid line) in 2022: seasonal dynamics of soil CO₂ emission and hydrothermal conditions; dotted line – control

обработанных почвах наблюдалось резкое увеличение скорости почвенной эмиссии, превышающее контроль в 1,4 раза. К ноябрю значения почвенной эмиссии на опытных и контрольных делянках упали до 13,4 и 12,4 г CO₂/m² в сутки соответственно и статистически не различались.

В ходе корреляционного анализа данных, полученных в 2023 г., снова удалось установить положительную корреляционную связь между показателем почвенной эмиссии CO₂ и температурой почвы ($r=0,40$, $t_p=3,18$ при $n=40$) и отрицательную корреляционную связь с влажностью почвы ($r=-0,57$, $t_p=5,35$ при $n=40$).

Содержание почвенного органического углерода в разрезе сезонной динамики снижалось во всех вариантах опыта с обработкой почвы (табл. 3).

Запасы углерода в пахотном горизонте исследуемых агротёмно-серых почв также уменьшались на 2,3–3,4 т/га в условиях обработки почв биопрепаратом. При отсутствии обработки весенние и осенние запасы почвен-

ного органического углерода существенно не различались.

Обработка почв живой культурой микроводоросли *C. sorokiniana* приводила к изменениям сезонной динамики скорости потоков CO₂ с поверхности агротёмно-серой почвы, что обусловлено одновременным внесением секвестратора CO₂ и дополнительного органического вещества, что также отмечалось в работе [15]. Направленность изменений показателя находилась в зависимости от возделываемой культуры и способа обработки почвы. При ежемесячной обработке почв под культурой сои биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* скорость почвенных потоков CO₂, как правило, снижалась на 6,1–24,7%, при общем за сезон уменьшении количества эмитируемого в атмосферу углерода на 10,8%. При однократной за вегетационный сезон обработке агротёмно-серых почв под соей внесение *C. sorokiniana* не вызвало существенных изменений в скорости потоков CO₂, что можно объяснить относительно низкой дозой на фоне изменяющихся погодных условий.

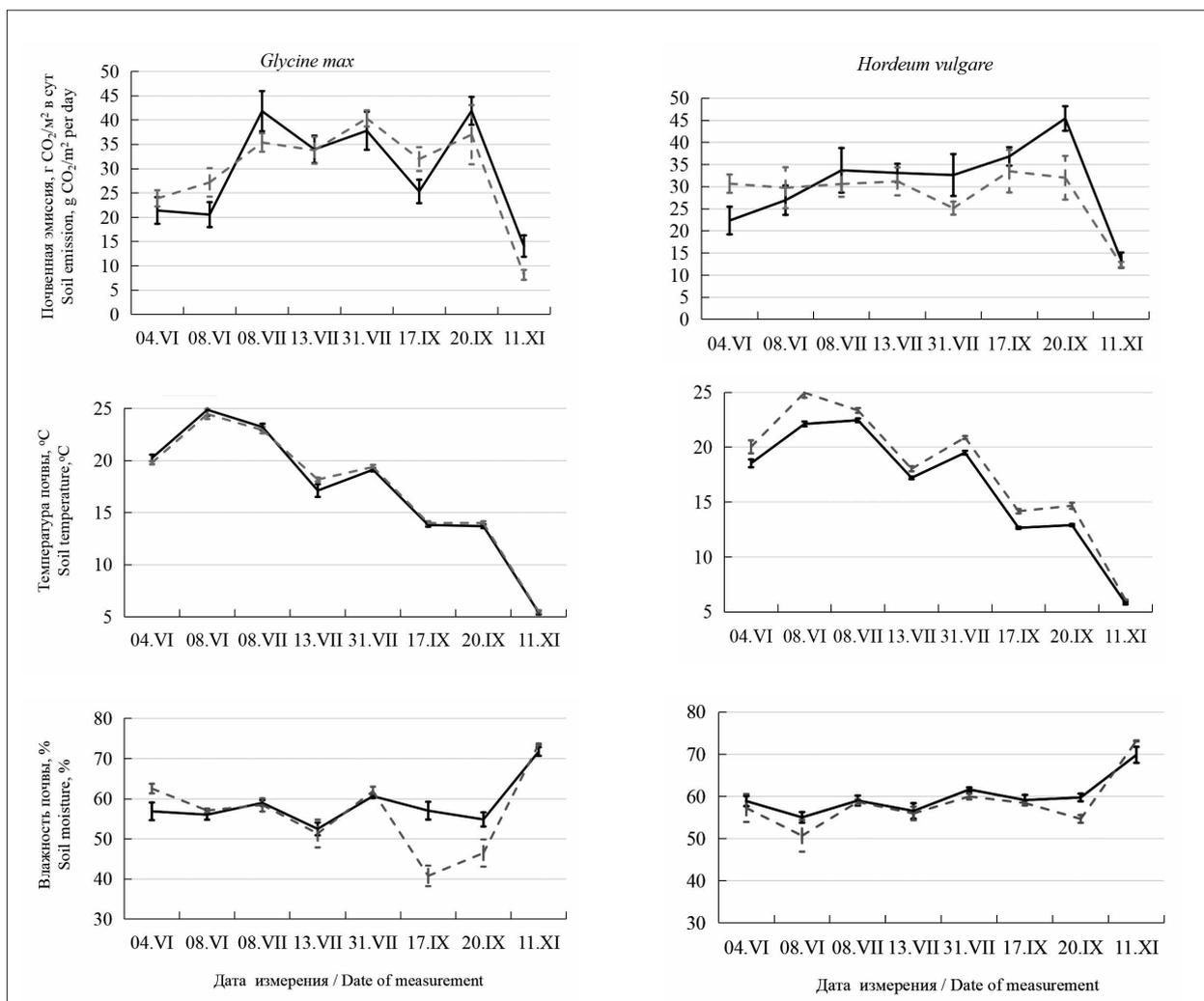


Рис. 4. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ при обработке агротёмно-серой почвы биопрепаратом *C. sorokiniana* под разными культурами в 2023 г.: сплошная линия – с применением *C. sorokiniana*; пунктирная линия – контроль
Fig. 4. Grey-Luvic Phaeozems Hortic under different crops treated with *C. sorokiniana* biopreparation (solid line) in 2023: seasonal dynamics of soil CO₂ emission and hydrothermal conditions; dotted line – control

Таблица 3 / Table 3
 Изменение содержания органического углерода в пахотном горизонте (20 см) в вегетационный сезон 2023 года / Changes in the topsoil (20 cm) organic carbon content during the 2023 growing season

Культура Crops	Содержание углерода, % / The gross organic carbon content, %			
	Почва, обработанная <i>C. sorokiniana</i> Soil treated with <i>C. sorokiniana</i>		Почва без обработки Soil without treatment	
	Май / May	Октябрь / October	Май / May	Октябрь / October
Соя <i>Glycine max</i>	2,49±0,09	2,32±0,03*	2,49±0,17	2,41±0,03
Ячмень <i>Hordeum vulgare</i>	2,49±0,03	2,38±0,03*	2,47±0,09	2,44±0,12

Примечание: *содержание почвенного органического углерода в мае и октябре достоверно различается при $p \leq 0,05$.
 Note: * soil organic carbon content in May and October differ significantly ($p \leq 0,05$).

Отмечалось разнонаправленное воздействие микроводоросли *C. sorokiniana* на показатель почвенной эмиссии CO₂ при её внесении в агротёмно-серые почвы под злаковые культуры. При обработке почв в варианте с ячменём скорость эмиссии CO₂ увеличивалась, под культурами овса и ржи, как правило, снижалась. Это можно объяснить как различиями в интенсивности корневого дыхания и составе микробиома [16], так и различиями в проективном покрытии исследуемых культур. По-видимому, именно поэтому эффективность биопрепарата преимущественно проявлялась в первой половине лета, когда площадь листовых пластинок ещё не достигла своего максимума.

Стоит отметить, что полученные результаты полевых и лабораторных испытаний по культурам сои и ячменя схожи по общей тенденции, направленной на увеличение скорости потоков под ячменём и снижением – под соей, что свидетельствует о перспективности применения биопрепаратов на основе микроводорослей в целях снижения углеродоёмкости процесса выращивания сои. Использование *C. sorokiniana* для снижения эмиссии CO₂ с поверхности агротёмно-серых почв под культурой сои целесообразно в ранние периоды вегетации, когда растения имеют низкое проективное покрытие.

Обработка почв биопрепаратом в конце вегетационного сезона после уборки урожая способствовала увеличению скорости почвенных потоков CO₂ относительно необработанных *C. sorokiniana* вариантов опыта, что также отмечалось в работе [15]. Это можно объяснить стимуляцией микробиологической активности почв в целом и активности ризосферной микробиоты в частности [15]. Полученные результаты позволили установить, что при внесении *C. sorokiniana* значительно увеличивалось количество почвенных бактерий, микромицетов и актиномицетов (до 57,3 раза), что, в свою очередь, приводило к интенсификации процессов биодеструкции пожнивных остатков и почвенного органического вещества. Стоит отметить, что повышение интенсивности биодеструкции пожнивных остатков в осеннее время может стимулировать гумификацию и способствовать запасанию органического углерода в почве [17].

Тем не менее, снижение скорости потоков CO₂ из исследуемых агротёмно-серых почв в течение рассматриваемого временного периода не приводило к накоплению органического углерода в пахотном горизонте (PU) ни в одном из вариантов опыта. Это обусловлено

особенностью баланса углерода в агроэкосистемах, где в связи с агротехнической обработкой почвы и выносом биомассы (основная сельскохозяйственная продукция) преимущественно имеют место потери органического углерода почвами [18, 19].

Выводы

Обработка агротёмно-серых почв культурой *C. sorokiniana* может приводить как к снижению скорости почвенных потоков CO₂ на 6,1–50,8% (под культурами сои, овса, озимой ржи), так и к увеличению на 6,0–23,3% (под культурой ячменя) по сравнению с необработанными почвами.

Обработка агротёмно-серых почв биопрепаратом *C. sorokiniana* способствовала увеличению численности бактерий, грибов и актиномицетов – в 25,6, 37,9 и 57,3 раза соответственно, что позволяет интенсифицировать процессы биодеструкции пожнивных остатков, стимулировать гумификацию и запастись органический углерод в почвах агроэкосистем. В свою очередь, обработка почв цианобактерией *N. punctiforme* приводила к уменьшению численности бактерий и актиномицетов в 1,8 и 1,2 раза соответственно, что может приводить к увеличению углеродоёмкости агротехнологий.

Для снижения углеродоёмкости процессов выращивания сои, озимой ржи и овса возможно проводить обработку почв биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* в весеннее и летнее время, так как в осенний период отмечено ускорение почвенных потоков CO₂ (до 41,8% при выращивании сои и до 3,8 раза при выращивании овса).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «УМНИК» Фонда содействия инновациям, договор № 17460ГУ/2022.

Литература

1. Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14. № 5. С. 771–779.
2. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // Наука в России. 2012. № 5. С. 25–32.
3. Piao S., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // Nature. 2009. V. 458. No. 7241. P. 1009–1013. doi: 10.1038/nature07944

4. Baldocchi D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. No. 4. P. 479–492. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

5. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // *Aust. J. Bot.* 2008. V. 56. No. 5. P. 369–407. doi: 10.1071/BT07128

6. Aresta M., Dibenedetto A. The carbon dioxide revolution: Challenges and perspectives for a global society. Springer, Cham, 2021. 262 p. doi: 10.1007/978-3-030-59061-1

7. Буквич Р.М., Петрович Д.Р. Парниковый эффект и рыночные механизмы Киотского протокола // *Вестник НГИЭИ.* 2017. № 1 (68). С. 139–158.

8. Hofmann D.J., Butler J.H., Tans P.P. A new look at atmospheric carbon dioxide // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. No. 12. P. 2084–2086. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028

9. Bennetzen E.H., Smith P., Porter J.R. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions – The major trends over 40 years // *Global Environ. Change.* 2016. V. 37. P. 43–55. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.12.004

10. Lal R., Negassa W., Lorenz K. Carbon sequestration in soil // *Curr. Opin. Environ. Sustainability.* 2015. V. 15. P. 79–86. doi: 10.1016/j.cosust.2015.09.002

11. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под общ. ред. С.А. Шобы. М.: Астрель, 2011. 632 с.

12. Лукьянов В.А., Стифеев А.И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. Курск: Изд-во КГСХА, 2014. 182 с.

13. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Seasonal dynamics of CO₂ emission from soils of Kursk // *Eurasian Soil Sc.* 2021. V. 54. P. 80–88. doi: 10.1134/S1064229321010117

14. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Spatial and temporal dynamics of carbon dioxide emission from Al-Fe-humus sandy soils in the forest-steppe zone // *Eurasian Soil Sc.* 2022. V. 55. P. 1546–1555. doi: 10.1134/S1064229322110096

15. Кублановская А.А., Хапчаева С.А., Зотов В.С., Зайцев П.А., Лобакова Е.С., Соловченко А.Е. Влияние суспензии клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* IPPAS C-1 (*Chlorophyceae*) на биологическую активность и микробиом почвы при возделывании фасоли // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология.* 2019. Т. 74. № 4. С. 284–293.

16. Гажеева Т.П., Гордеева Т.Х., Масленникова С.Н. Динамика численности и состава микроорганизмов ризосферы некоторых злаковых растений в процессе их роста и развития // *Вестник ОГУ.* 2011. № 12 (131). С. 328–330.

17. Петров В.Б., Чеботарь В.К. Управление деструкцией и гумификацией пожнивных остатков зерновых культур с использованием микробиологического пре-

парата Экстрасол // *Сельскохозяйственная биология.* 2012. Т. 47. № 3. С. 103–108.

18. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современной земледелии России // *Агрохимия.* 2019. № 12. С. 3–15. doi: 10.1134/S000218811912007X

19. Самбуу А.Д., Дапылдай А.Б., Куулар А.Н. Пул углерода в травяных экосистемах и агроценозах Тувы // *Вестник КрасГАУ.* 2009. № 12. С. 50–56.

References

1. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Carbon balance in peat bog ecosystems of Western Siberia // *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal.* 2007. V. 14. No. 5. P. 771–779 (in Russian).

2. Kurganova I.N., Kudayarov V.N. Ecosystems of Russia and the global carbon budget // *Nauka v Rossii.* 2012. No. 5. P. 25–32 (in Russian).

3. Piao S., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // *Nature.* 2009. V. 458. No. 7241. P. 1009–1013. doi: 10.1038/nature07944

4. Baldocchi D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. No. 4. P. 479–492. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

5. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // *Aust. J. Bot.* 2008. V. 56. No. 5. P. 369–407. doi: 10.1071/BT07128

6. Aresta M., Dibenedetto A. The carbon dioxide revolution: Challenges and perspectives for a global society. Springer, Cham, 2021. 262 p. doi: 10.1007/978-3-030-59061-1

7. Bukvić R.M., Petrović D.R. Greenhouse effect and mechanisms of Kyoto Protocol // *Vestnik NGIEI.* 2017. No. 1 (68). P. 139–158 (in Russian).

8. Hofmann D.J., Butler J.H., Tans P.P. A new look at atmospheric carbon dioxide // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. No. 12. P. 2084–2086. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028

9. Bennetzen E.H., Smith P., Porter J.R. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions – The major trends over 40 years // *Global Environ. Change.* 2016. V. 37. P. 43–55. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.12.004

10. Lal R., Negassa W., Lorenz K. Carbon sequestration in soil // *Current Opin. Environ. Sustainability.* 2015. V. 15. P. 79–86. doi: 10.1016/j.cosust.2015.09.002

11. National soil atlas of the Russian Federation / Ed. S.A. Shoba. Moskva: Astrel, 2011. 632 p. (in Russian).

12. Lukyanov V.A., Stifeev A.I. Applied aspects of the use of microalgae in agroecosystem. Kursk: Izdatelstvo Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii, 2014. 182 p. (in Russian).

13. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Seasonal dynamics of CO₂ emission from soils of Kursk // *Eurasian Soil Sc.* 2021. V. 54. P. 80–88. doi: 10.1134/S1064229321010117
14. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Spatial and temporal dynamics of carbon dioxide emission from Al-Fe-humus sandy soils in the forest-steppe zone // *Eurasian Soil Sc.* 2022. V. 55. P. 1546–1555. doi: 10.1134/S1064229322110096
15. Kublanovskaya A.A., Khapchaeva S.A., Zotov V.S., Zaytsev P.A., Lobakova E.S., Solovchenko A.E. The effect of the microalgae *Chlorella vulgaris* IPPAS C-1 (Chlorophyceae) biomass application on yield, biological activity, and the microbiome of the soil during bean grown // *Herald of Moscow University. Series 16. Biology.* 2019. V. 74. No. 4. P. 284–293 (in Russian).
16. Gazheeva T.P., Gordeeva T.Kh., Maslennikova S.N. The dynamics of the size and composition microorganisms in the rhizosphere of some cereals during their growth and development // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2011. No. 12 (131). P. 328–330 (in Russian).
17. Petrov V.B., Chebotar' V.K. Management of destruction and humification of the post-harvest rests of cereal crops using microbiological preparation Extrasol // *Agricultural Biology.* 2012. No. 3. P. 103–108 (in Russian).
18. Kudeyarov V.N. The agrobiogeochemical cycles of carbon and nitrogen of Russian croplands // *Agrochemistry.* 2019. No. 12. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.1134/S000218811912007X
19. Sambuu A.D., Dapylday A.B., Kuular A.N. Carbon pool in the herbal ecosystems and agrocenoses of Tuva // *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2009. No. 12. P. 50–56 (in Russian).