

Евгений Александрович Демин¹, Ольга Александровна Шахова², Елена Ивановна Миллер³, Анатолий Юрьевич Першаков⁴,

^{1,2,3,4}Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹gambitn2013@yandex.ru

²olshakhova@rambler.ru

³e.i.miller@utmn.ru

⁴a.i.pershakov@utmn.ru

ДИНАМИКА ЭМИССИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОСЕВАХ КУКУРУЗЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

Цель исследования – установить влияние уровня внесенных органических удобрений на изменение интенсивности эмиссии углекислого газа с поверхности почвы под посевами кукурузы. Исследования проведены в течение 2024–2025 гг. на черноземе выщелоченном. Схема опыта предусматривала варианты с внесением органических удобрений в дозах 30, 60 и 90 т/га. В качестве контроля использовали вариант с естественным плодородием почвы. Органические удобрения вносили осенью разбрасывателем РОУ-6 перед проведением основной отвальной обработки почвы на глубину 20–22 см. Под контрольный вариант удобрения не вносили. Весной проводили боронование в два следа, в дальнейшем – культивацию на глубину 8–10 см и посев кукурузы сеялкой точного высева. После этого прикатывали кольчато-шпоровыми катками. Норма высева семян составляла 80 тыс./га. В период теплого времени (май – октябрь) проводили измерения эмиссии углекислого газа каждые 10–16 сут. Эмиссия диоксида углерода в течение вегетации кукурузы с мая по июль увеличивалась на контроле с 36,2–50,5 до 183,0–197,2 кг CO₂/га в сутки и в дальнейшем снижалась к середине осени до 6,5–8,3 кг CO₂/га в сутки. На удобренных вариантах динамика почвенного дыхания имела схожую направленность, однако была с мая по сентябрь на 21–149 кг CO₂/га в сутки выше. В избыточно увлажненный год при ГТК, равном 1,4 ед., скорость продуцирования CO₂ на исследуемых вариантах была выше в июне на 31,1–90,4 кг/га, а в августе и сентябре – ниже на 21,2–48,2 кг/га в сравнении с периодом при ГТК = 1,2 ед. Коэффициент сезонного варьирования эмиссии углекислого газа в течение вегетации составлял 56,4–62,0 % и практически не отличался за годы исследований.

Ключевые слова: диоксид углерода, статистические данные, навоз, вариация, дозы удобрений

Для цитирования: Демин Е.А., Шахова О.А., Миллер Е.И., и др. Динамика эмиссии углекислого газа в посевах кукурузы при внесении различных доз органических удобрений // Вестник КрасГАУ. 2026. № 6. С. 91–102. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-91-102.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10005.

Evgeny Aleksandrovich Demin¹, Olga Aleksandrovna Shakhova², Elena Ivanovna Miller³, Anatoly Yuryevich Pershakov⁴

^{1,2,3,4}Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹gambitn2013@yandex.ru

²olshakhova@rambler.ru

³e.i.miller@utmn.ru

⁴a.i.pershakov@utmn.ru

CARBON DIOXIDE EMISSION DYNAMICS IN CORN CROPS WHEN APPLYING VARIOUS DOSES OF ORGANIC FERTILIZERS

The objective of the study is to determine the effect of applied organic fertilizers on changes in the intensity of carbon dioxide emissions from the soil surface under corn crops. The studies were conducted in 2024–2025 on leached chernozem. The experimental design included variants with organic fertilizer application at rates of 30, 60, and 90 t/ha. A variant with natural soil fertility was used as a control. Organic fertilizers were applied in the fall with a ROU-6 spreader before the main moldboard tillage to a depth of 20–22 cm. Fertilizers were not applied under the control variant. In the spring, harrowing was carried out in two passes, followed by cultivation to a depth of 8–10 cm and sowing of corn with a precision seeder. After this, the soil was rolled with ring-spur rollers. The seeding rate was 80,000 seeds per hectare. During the warm season (May–October), carbon dioxide emissions were measured every 10–16 days. Carbon dioxide emissions during the corn growing season from May to July increased in the control group from 36.2–50.5 to 183.0–197.2 kg CO₂/ha per day and then decreased by mid-autumn to 6.5–8.3 kg CO₂/ha per day. In the fertilized variants, the dynamics of soil respiration had a similar trend, but was higher by 21–149 kg CO₂/ha per day from May to September. In an excessively wet year with an HTC of 1.4 units, the rate of CO₂ production in the studied variants was higher in June by 31.1–90.4 kg/ha, and lower by 21.2–48.2 kg/ha in August and September compared to the period with an HTC of 1.2 units. The coefficient of seasonal variation in carbon dioxide emissions during the growing season ranged from 56.4 to 62.0% and remained virtually constant over the years of study.

Keywords: carbon dioxide, statistical data, manure, variation, fertilizer rates

For citation: Demin EA, Shakhova OA, Miller EI, et al. Carbon dioxide emission dynamics in corn crops when applying various doses of organic fertilizers. *Bulletin of KSAU*. 2026;(6):91-102. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-91-102.

Funding: this study was supported by grant № 23-76-10005 from the Russian Science Foundation.

Введение. Наблюдение за изменением климата и факторов, влияющих на него, происходит достаточно давно, однако в последнее десятилетие отмечается существенное повышение температуры земного шара [1, 2]. Связывают это с повышением уровня концентрации парниковых газов в слоях атмосферы из-за увеличения антропогенных выбросов в результате интенсификации производств, сжигания и добычи ископаемых, а также из-за активно развивающегося сельского хозяйства [3]. По мнению некоторых исследователей, сельское хозяйство действительно оказывает существенный вклад в глобальную картину эмиссии парниковых газов антропогенного характера, где доля отрасли АПК достигает более четверти [4]. Особое внимание уделяется отрасли растениеводства, а именно дыханию почвы, которая при нарушении естественного процесса почвообразования в результате введения почв в сельскохозяйственный оборот приводит к нарушению естественно сложившегося баланса углерода в почве в сторону его снижения [5, 6]. По некоторым данным от 40 до 50 % всех выбросов диоксида углерода в мире связывают с почвенным дыханием агрогенных почв [4]. Однако полученные подсчеты

крайне грубые и получены расчетным методом с учетом среднестатистических мировых значений, без акцента на зональные особенности региона, погодных условий, типов почвы, уровня агротехники, интенсивности использования пашни, структуры севооборотов и т. д., которые, как показывают исследования, оказывают весомый вклад в интенсивность почвенного дыхания [7, 8]. В связи с этим для получения уточненных данных необходимо проведение исследований с учетом зональности и особенностей ведения сельского хозяйства в конкретных условиях. Изменение интенсивности дыхания почвы также существенно зависит от используемых видов удобрений и их норм [9]. Влияние различных видов минеральных удобрений и норм на изменение интенсивности эмиссии диоксида углерода неплохо изучены как в мире [10, 11], так и в России [12–14], хотя имеют ряд недостаточных сведений по зональному принципу. Исследований по влиянию различных видов и норм внесения органических удобрений в мировой литературе присутствует достаточно [15–17], однако отечественных исследований крайне мало. Связано это с тем, что минеральные удобрения используются повсеместно практически под все

сельскохозяйственные культуры, применение органических удобрений ограничено лишь определенными культурами. С учетом набирающего тренда перехода на органическое (биологическое) сельское хозяйство для получения органической продукции или продукции с улучшенными характеристиками начинает проявляться интерес по использованию органических удобрений [18, 19]. При дальнейшем развитии тренда существует реальный переход на органическую систему земледелия в большинстве регионов страны. Однако скудные отечественные данные вклада органических удобрений в глобальную эмиссию углерода не позволяют прогнозировать и получить достоверные результаты влияния данного перехода на климатические изменения. Исходя из этого можно сделать вывод, что для получения истинных значений влияния фактора (органические удобрения) в глобальную эмиссию углерода в агро-системах в локальных и общемировых значениях, необходимо проведение комплексных исследований в определенных климатических зонах, почвенных условиях и при определенном уровне агротехники.

Цель исследования – установить влияние уровня внесенных органических удобрений на изменение интенсивности эмиссии углекислого газа с поверхности почвы под посевами кукурузы.

Материалы и методы. Исследование проводили в 2024–2025 гг. на черноземе выщелоченном. Данный тип почвы является одним из основных наиболее распространенных в лесостепной зоне Зауралья [20]. Основные агрохимические характеристики почвы были следующими: содержание гумуса – $(7,07 \pm 2,1) \%$ (ГОСТ 26213); pH солевой вытяжки – $(5,4 \pm 0,4)$ ед. pH (ГОСТ 26482); нитратный азот – $(11,6 \pm 8,3)$ мг/кг (ГОСТ 26951); содержание подвижного фосфора и калия по Чирикову – (55 ± 29) и (103 ± 44) мг/кг (ГОСТ 26204). Исследование проводили в зерно-пропашном севообороте (кукуруза, яровая пшеница, овес) в посевах кукурузы. Схема опыта предусматривала варианты с внесением органических удобрений в дозах 30, 60 и 90 т/га. В качестве контроля использовали вариант с естественным плодородием почвы. Органические удобрения вносили осенью разбрасывателем РОУ-6 перед проведением основной отвальной обработки почвы на глубину 20–22 см. Под кон-

трольный вариант удобрения не вносили. Органические удобрения имели следующие агрохимические характеристики: общий азот – $(0,41 \pm 0,11) \%$; фосфор – $(0,21 \pm 0,07) \%$; калий – $(0,44 \pm 0,17) \%$. После внесения необходимых доз органических удобрений проводили отвальную обработку почвы на глубину 20–22 см. Весной проводили боронование в два следа, в дальнейшем – культивацию на глубину 8–10 см и посев кукурузы сеялкой точного высева. После этого прикатывали кольчато-шпоровыми катками. Норма высева семян составляла 80 тыс/га. В фазу 5–6-го листа кукурузы была проведена обработка посевов гербицидом «МайсТер Пауэр» с нормой расхода препарата 1,5 л/га. Уборку проводили в фазу молочно-восковой спелости зерна кормоуборочным комбайном (август–сентябрь). Размер опытных делянок – 300 м², учетных – 100 м². В период теплого времени (май – октябрь) проводили измерения эмиссии углекислого газа каждые 10–16 сут. Для этого использовали систему PRI-8610. Замеры на каждом варианте проводили в трехкратном повторении. Статистическую обработку данных проводили в MS Excel и программной надстройке AgStat. Оценка значимости коэффициентов асимметрии и эксцесса основана на предположении о нормальности распределения выборочных As и Ex . Значимыми эти коэффициенты признаются, если они превышают свою утроенную ошибку, зависящую от объема выборки, соответственно $\sqrt{6/(n+3)}$ и $\sqrt{24/(n+5)}$, где n – объем выборки.

Погода в исследуемые года была абсолютно различная, что положительно сказалось на оценке влияния данного фактора на продуцирование диоксида углерода. 2024 г. был увлажненный, ГТК достигал 1,4 ед. Избыток осадков приходился на май, июнь и август (рис. 1). Существенного недостатка осадков при этом отмечено не было. Температура воздуха, начиная с середины лета до конца вегетации, была немного выше средних многолетних значений. В 2025 г. ГТК составлял 1,2 ед., избыточное количество осадков приходилось на сентябрь, а недостаток отмечался в июне и августе. Температура воздуха в мае, июне, августе и сентябре была выше средних многолетних значений.

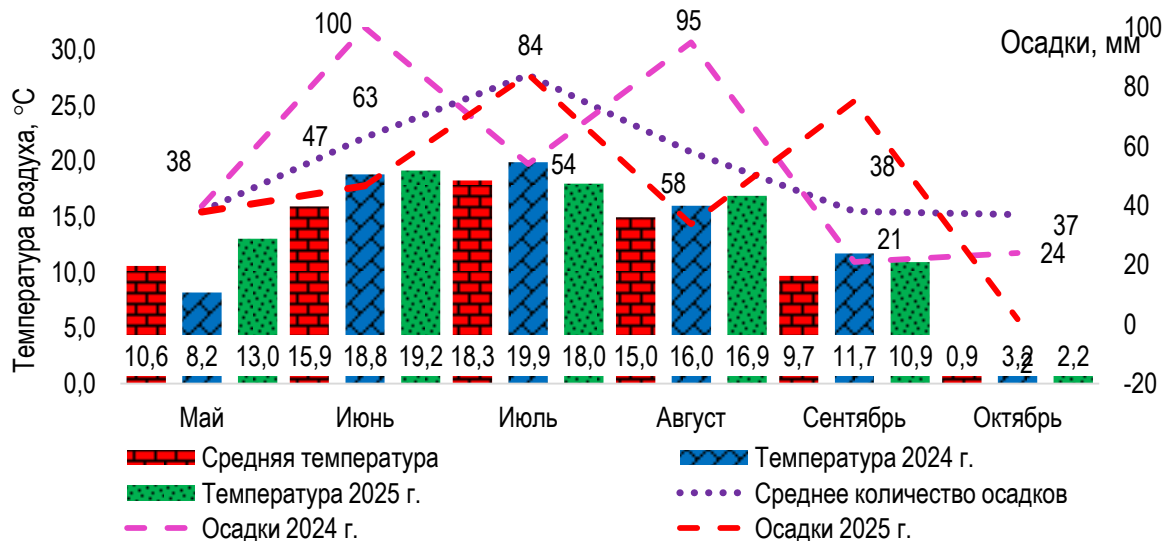


Рис. 1. Погодные условия 2024–2025 гг.
Weather conditions 2024–2025

Результаты и их обсуждение. В посевах кукурузы в течение вегетации эмиссия диоксида углерода менялась в широком диапазоне и существенно зависела от погодных условий и уровня внесенных органических удобрений. В 2024 г. на контроле в мае скорость эмиссии углекислого газа составляла 36,2 кг CO₂/га в сутки (рис. 2). В дальнейшем в начале лета эмиссия возрастала практически в три раза относительно весенних значений, а к середине лета повышалась еще на 40 % относительно значений июня. В последний месяц лета средняя скорость эмиссии в сутки находилась на одном уровне со значениями, полученными в июне. В сентябре интенсивность эмиссии уменьшилась практически в два раза относительно предыдущего месяца – 63,3 кг CO₂/га в сутки. К октябрю скорость эмиссии углекислого газа в сутки снизилась относительно сентября в 10 раз, до 6,5 кг CO₂/га в сутки.

Изменение скорости почвенного и корневого дыхания связано в первую очередь с изменением температуры почвы, которая, по отмеченным ранее данным, повышается с начала вегетации до середины июля и в дальнейшем остывает [21]. Происходит это, во-первых, из-за изменения атмосферной температуры (рис. 1), которая напрямую влияет на температурный режим почвы. Во-вторых, из-за различной активности солнечной радиации в течение вегетации, которая к тому же с увеличением биомассы растений в меньшей степени доходит до поверхности почвы и оказывает влияние на температуру почвы [22]. В-третьих, после июня происходит посте-

пенное уменьшение светового дня, что снижает долю влияния солнечной радиации на температурный режим почвы. Дополнительным фактором прочной активности эмиссии диоксида углерода может являться корневая система растений, которая участвует в газообмене и в зависимости от ее массы и диффузии питательных веществ из почвы вклад в почвенный газообмен может меняться [23].

Внесение органических удобрений приводило к повышению скорости почвенного и корневого дыхания, что подтверждается более высокой скоростью эмиссии CO₂. В 2024 г. при использовании дозы органических удобрений в 30 т/га продуцирование углекислоты было практически на 60 % больше, чем на контрольном варианте. Вектор изменения скорости эмиссии диоксида углерода при этом был смежным с контролем на протяжении всей вегетации. В июне дыхание почвы относительно контроля было выше на 31 %, а в июле – на 40 %, где оно достигало отмеченного максимума в 257 кг CO₂/га в сутки. В августе значения продуцирования CO₂ были выше, чем на контрольном варианте на 28 %, а в сентябре – на 35 % и опускались при этом относительно предыдущего измерения на 29 и 52 % соответственно. В октябре средние значения эмиссии углекислого газа были на одном уровне с контролем.

На варианте с внесением 60 т/га органических удобрений эмиссия диоксида углерода была с мая по сентябрь выше контроля на 39–102 % (31,5–128,5 кг CO₂/га в сутки). Динамика измене-

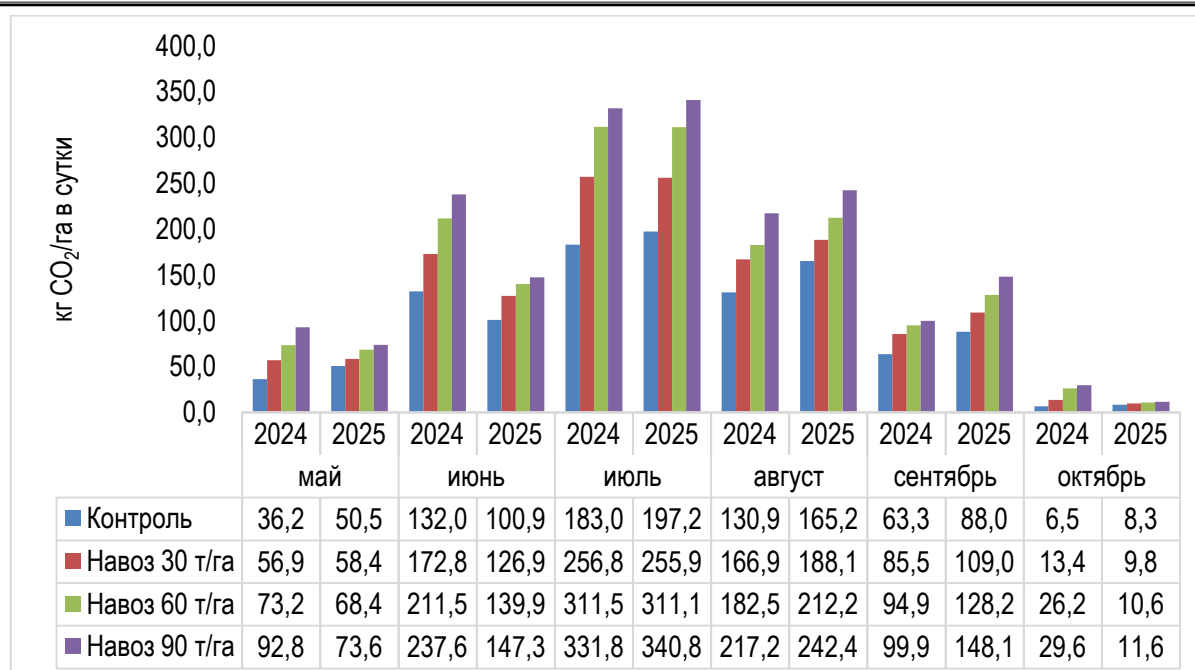
ния при этом была смежная с контролем, где с мая до июля происходит подъем скорости эмиссии, после чего с августа по октябрь наблюдался спад. Наибольший размах вариации между контролем по значениям эмиссии диоксида углерода был отмечен в июле, а наименьший – в октябре. Стоит отметить, что, начиная с данного варианта и в дальнейшем, на более удобренном фоне наблюдались статистические отклонения от контроля, где среднемесячная эмиссия углекислого газа в октябре была выше на 19,7 кг CO₂/га в сутки (НСР₀₅ = 13,6 кг CO₂/га в сутки).

На варианте с нормой внесения 90 т/га органических удобрений динамика изменений была схожей с другими исследуемыми вариантами. Однако среднемесячные значения эмиссии были существенно выше. В мае продуцирование диоксида углерода было более чем в 2,5 раза выше контроля, а в июне и июле среднемесячная эмиссия диоксида углерода была выше на 80–81 %. Сентябрь и август также отмечался более высокой скоростью почвенного дыхания, в сравнении с контролем эмиссия на этом варианте была выше на 66 и 58 %, а в октябре дыхание почвы было выше в 4,5 раза.

Увеличение скорости дыхания почвы с повышением доз внесения органических удобрений в течение вегетации связано с рядом определенных причин. Первая – это внесение в почву дополнительных источников питания с органическими удобрениями, что приводит к изменению привычной среды обитания почвенных микроорганизмов и влияет на их функциональную организацию, а так же изменяет их активность и дыхание [24]. Вторая причина связана с тем, что на варианте без применения удобрений нарушается биогеохимический цикл азота, который влияет на активность почвенного дыхания и численность почвенной микробиоты из-за значительного выноса данного элемента основной продукцией, в то время как на удобренных органическими удобрениями вариантах он восполняется [25]. Третья причина объясняется тем, что внесение органических удобрений способствует увеличению численности микробной массы почвы в 1,3–2,0 раза по сравнению с вариантом без использования удобрений, а это, в свою очередь, сказывается на интенсивности биохимических процессов, протекающих в почве и, как следствие, эмиссии диоксида углерода [26]. Подобных выводов придерживаются значи-

тельное количество исследователей, которые отмечают, что применение органических удобрений способствует повышению численности микробиоты почвы и интенсивности эмиссии пашни [27–30].

В мае 2025 г. эмиссия диоксида углерода на контроле была идентична значениям предыдущего года и составляла 50,5 кг CO₂/га в сутки (НСР₀₅ = 19,3 кг CO₂/га в сутки). В дальнейшем, как и в предыдущий 2024 г., тенденция по изменению интенсивности эмиссии была схожая и повышалась до середины лета, после чего начинала опускаться. В июле средняя скорость продуцирования углекислого газа в сутки была в два раза выше майских значений – 100,9 кг CO₂/га в сутки, однако относительно значений 2024 г. эмиссия CO₂ была ниже на 24 % (31,1 кг CO₂/га в сутки). Высокая эмиссия в 2024 г. может быть связана с более высоким количеством осадков на фоне примерно одинаковой температуры воздуха (см. рис. 1) в сравнении с 2025 г., которые обеспечивали более интенсивное развитие микробных сообществ почвы, что и повышало дыхание. В июле интенсивность продуцирования диоксида углерода продолжала повышаться относительно июня на 96,3 кг CO₂/га в сутки, однако относительно прошлого года в этом месяце статистически значимых отклонений не обнаружено. В августе среднесуточная эмиссия диоксида углерода снижалась относительно значений июля на 16 % (32,0 кг CO₂/га в сутки). Относительно 2024 г. при этом отмечалось более интенсивное дыхание, которое было больше на 34,3 кг CO₂/га в сутки. Связано это может быть с более высокой температурой воздуха (см. рис. 1), которая способствовала наиболее благоприятному температурному режиму почвы, что приводило к более интенсивным биохимическим процессам, протекающим в почве. Вторым фактором, влияющим на данный показатель, может являться поздний посев кукурузы, что приводило к высокому вкладу корневой системы в общую эмиссию в этом периоде. В сентябре эмиссия диоксида углерода опускалась на 77,2 кг CO₂/га в сутки относительно конца лета. При этом эмиссия была выше прошлого года на 24,7 кг CO₂/га в сутки по причине более поздней уборки кукурузы, в связи с чем корневая система оказывала больший вклад в почвенное дыхание. В октябре эмиссия CO₂ опускалась до минимума и была в 10 раз ниже значений прошлого месяца.



Фактор А – дозы удобрений $HCP_{05}=13,6$ кг С/га; Фактор В – период вегетации $HCP_{05}=22,1$ кг С/га; Фактор С – годы исследований $HCP_{05}=19,3$ кг С/га.

Рис. 2 – Динамика эмиссии диоксида углерода в течение вегетации в посевах кукурузы при внесении различных доз органических удобрений, кг CO_2 /га в сутки
Dynamics of carbon dioxide emissions during the growing season in corn crops with the application of different doses of organic fertilizers, kg CO_2 /ha per day

Эмиссия диоксида углерода в мае 2025 г. на варианте с внесением в почву 30 т/га органических удобрений статистически значимо не отличалась от значений, отмеченных в этом году на контроле. В июне дыхание почвы было на 26 кг CO_2 /га в сутки больше, чем на контрольном варианте. В сравнении с 2024 г. значения почвенного дыхания были меньше на 45,9 кг CO_2 /га в сутки. В июле эмиссия на данном участке повышалась до 255,9 кг CO_2 /га в сутки и была выше контроля на 30 % (58,7 кг CO_2 /га в сутки). Отличий с прошлым годом в этом месяце на данном варианте отмечено не было. В августе происходило уменьшение скорости дыхания почвы на 67,8 кг CO_2 /га в сутки относительно прошлого месяца. Дыхание при этом было выше, чем на контроле, на 14 % (22,9 кг CO_2 /га в сутки). В сентябре продуцирование углекислого газа снижалось до средних значений в месяц на уровне 109,0 кг CO_2 /га в сутки, что меньше предыдущего месяца на 79,1 кг CO_2 /га в сутки и выше, чем на контроле, на 21,0 кг CO_2 /га в сутки. В октябре дыхание снизилось до уровня 9,8 кг CO_2 /га в сутки и статистически значимо не отличалось как от контроля, так и от значений предыдущего года.

На варианте с внесением 60 т/га органических удобрений в мае эмиссия диоксида углерода была выше контроля на 17,9 кг CO_2 /га в сутки. В июне дыхание в посевах на данном варианте повышалось до 139,9 кг CO_2 /га в сутки и было выше контроля на 39,0 кг CO_2 /га в сутки. Однако относительно 2024 г. значения эмиссии углекислого газа были на 34 % ниже. В июле дыхание почвы возрастало до пиковых значений в 311,1 кг CO_2 /га в сутки, что в два раза больше, чем в предыдущем месяце. Относительно контроля продуцирование углекислого газа было на 58 % выше, при этом в сравнении с прошлым годом отличий с данным вариантом не наблюдалось. В августе отмечено понижение скорости эмиссии углекислого газа на 98,9 кг CO_2 /га в сутки относительно июля. В сравнении с контролем дыхание почвы в этом месяце было на 28 % выше, также, как и в сравнении с значениями предыдущего года, эмиссия была на данном варианте на 29,7 % выше. Осенью дыхание почвы снижалось на 84 кг CO_2 /га в сутки, несмотря на это эмиссия была выше контроля на 46 % и на 35 % выше значений 2024 г. В октябре отмечались, как и на других менее удобренных вариантах, минимальные значения – 10,6 кг CO_2 /га в сутки.

На варианте с максимальным уровнем внесения органических удобрений среднесуточная эмиссия в мае была на уровне прошлого года. В июне среднемесячное дыхание выросло более чем в два раза и было больше контрольного варианта на 46,4 кг CO₂/га в сутки. При сравнении значений с прошлым годом эмиссия была меньше на 90,3 кг CO₂/га в сутки. В июле, как и на всех остальных вариантах в независимости от года исследований, отмечалась максимальная скорость продуцирования диоксида углерода, которая достигала 340,8 кг CO₂/га в сутки и статистически значимо не отличалась от значений предыдущего года. Относительно контроля дыхание почвы при этом было на 73 % выше. В августе происходило отмеченное ранее на других вариантах снижение интенсивности продуцирования углекислого газа на 98,4 кг CO₂/га в сутки. Эмиссия CO₂ при этом была выше контроля на 77,2 кг CO₂/га в сутки и выше значений прошлого года на 25,2 кг CO₂/га в сутки. В сентябре скорость дыхания опускалась до 148,1 кг CO₂/га в сутки и была выше, чем на контрольном варианте, практически в два раза и в 1,7 раза выше значений предыдущего года. В октябре скорость дыхания почвы статистически значимо не отличалась от контроля и значений предыдущего года.

Проведя статистический анализ данных (табл. 1), было установлено, что среднее значение скорости эмиссии за вегетацию кукурузы в 2024 г. (май – октябрь) составляло (99,8 ± 10,8) кг CO₂/га в сутки. Медиана выборки проходила смежно с незначительными отклонениями, что свидетельствует о правильном распределении значений. Стандартное отклонение от среднего значения выборки достигала 61,9 кг CO₂/га в сут-

ки. Экссесс составлял –1,3, асимметричность была нормальной. Вариация достигала 62,0 %. На всех вариантах с применением органических удобрений коэффициент эксцесса был на уровне –1,0...–1,3, а асимметричности на уровне 0,21...0,33. Поскольку отношение модулей коэффициента асимметрии и показателя эксцесса к их ошибкам репрезентативности не превышает 3, можно считать, что распределение значений выборки не имеет существенных отклонений от нормального по всем вариантам опыта. При использовании навоза в дозе 30 т/га среднее значение генеральной совокупности относительно контроля повышалось на 35,8 кг CO₂/га в сутки. Медиана на данном варианте была выше среднего значения на 24,1 кг CO₂/га в сутки, что говорит об отклонении в распределении выборки. Вариация при этом была практически на уровне контроля – 62,8 %. На варианте с внесением под основную обработку почвы 60 т/га органических удобрений среднее значение и стандартная ошибка были выше контроля на 61,4 кг CO₂/га в сутки и 6,1 кг CO₂/га в сутки соответственно. Медиана проходила практически идентично среднему значению, а вариация была практически идентична на других вариантах очень высокой – 60,4 %. На варианте с максимальным уровнем использования органических удобрений среднее значение повышалось практически в два раза относительно контроля, а стандартная ошибка увеличивалась на 7,8 кг CO₂/га в сутки. Медиана проходила ниже среднего значения на 19,3 кг CO₂/га в сутки. Вариация хоть и была меньше, чем на других вариантах, оставалась также очень высокой – 59,1 %.

Таблица 1

Статистические характеристики эмиссии диоксида углерода в посевах кукурузы при внесении различных доз органических удобрений в 2024 г., кг/га в сутки
Statistical characteristics of carbon dioxide emissions in corn crops with the application of different doses of organic fertilizers in 2024, kg/ha per day

Вариант	Контроль	Навоз, т/га		
		30	60	90
Среднее	99,8	135,6	161,2	180,8
Стандартная ошибка	10,8	14,8	16,9	18,6
Медиана	101,7	159,7	161,9	161,5
Стандартное отклонение	61,9	85,2	97,4	106,9
Эксцесс	–1,3	–1,1	–1,0	–1,3
Асимметричность	0,05	0,21	0,33	0,29
Коэффициент вариации, %	62,0	62,8	60,4	59,1

В 2025 г. на всех изучаемых вариантах отмечался незначительный отрицательный эксцесс, что говорит о плосковершинном распределении выборки (табл. 2). Несущественная положительная асимметричность показывает, что смещение выборки незначительно в сторону больших значений среднего. На контроле среднее значение эмиссии за вегетацию было выше прошлогодних значений на 13,8 кг CO₂/га в сутки, а стандартное отклонение больше на 0,4 кг CO₂/га в сутки из-за более высоких значений выборки. Медиана была практически идентичная среднему значению. Коэффициент вариации при этом был ниже, чем в прошлом году, на 5,6 %. На варианте с применением 30 т/га органических удобрений среднее значение за вегетацию было выше контроля на

26,1 кг CO₂/га в сутки и было выше прошлогодних значений на 4,1 кг CO₂/га в сутки. Стандартное отклонение отличалось от значений прошлого года на 0,6 кг CO₂/га в сутки. Медиана проходила на 6,5 кг CO₂/га в сутки ниже значений среднего. Коэффициент вариации при этом увеличивался относительно контроля на 2,2 %. На варианте с внесением в почву 60 т/га навоза среднее значение выборки относительно контроля было на одном уровне с прошлым годом. При распределении значений выборки медиана была ниже среднего значения на минимальное количество в 3,3 кг CO₂/га. На варианте с применением навоза в дозе 90 т/га средняя эмиссия за вегетацию составила 187 кг CO₂/га.

Таблица 2

Статистические характеристики эмиссии диоксида углерода в посевах кукурузы при внесении различных доз органических удобрений в 2025 г., кг/га в сутки
Statistical characteristics of carbon dioxide emissions in corn crops with the application of different doses of organic fertilizers in 2025, kg/ha per day

Вариант	Контроль	Навоз, т/га		
		30	60	90-
Среднее	113,6	139,7	162,7	187,0
Стандартная ошибка	11,2	14,2	16,9	19,4
Медиана	111,3	133,2	159,4	183,6
Стандартное отклонение	64,1	81,3	96,9	111,4
Эксцесс	-0,4	-0,4	-0,3	-0,9
Асимметричность	0,3	0,3	0,4	0,2
Коэффициент вариации, %	56,4	58,2	59,6	59,6

Закключение. Эмиссия диоксида углерода в течение вегетации кукурузы с мая по июль увеличивалась на контроле с 36,2–50,5 до 183,0–197,2 кг CO₂/га в сутки и в дальнейшем снижалась к середине осени до 6,5–8,3 кг CO₂/га в сутки. На удобренных вариантах динамика почвенного дыхания имела схожую направленность, однако была с мая по сентябрь на 21–149 кг CO₂/га в сутки выше. В избыточно увлажненный год при

ГТК, равном 1,4 ед., скорость продуцирования CO₂ на исследуемых вариантах была выше в июне на 31,1–90,4 кг/га, а в августе и сентябре ниже на 21,2–48,2 кг/га в сравнении с периодом при ГТК = 1,2 ед. Коэффициент сезонного варьирования эмиссии углекислого газа в течение вегетации составлял 56,4–62,0 % и практически не отличался за годы исследований.

Список источников

1. Bevacqua E., Schleussner C.F., Zscheischler J. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit // Nature Climate Change. 2025. Vol. 15, N 3.
2. Cannon A.J. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold // Nature Climate Change. 2024. Vol. 15. P. 266–269.
3. Филимонова И.В., Комарова А.В., Новиков А.Ю. Определение структуры и динамики выбросов парниковых газов сектора «Энергетика» в Новосибирской области // Экология промышленного производства. 2023. № 4. С. 47–53. DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_47. EDN MFERAI.
4. Сафин Р.И., Валиев А.Р., Колесар В.А. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 3. С. 7–13. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-7-13. EDN: ZVZFMX.

5. Bobrenko I., Kadermas I., Bobrenko E., et al. Carbon dioxide emission estimation in different zones of the south of Western Siberia // Bio Web of Conferences. 2024. N 15. Art. 04027. DOI: 10.1051/bio-conf/202413004027. EDN: FQQFYF.
6. Бобренко И.А., Дрофа О.В., Гоман Н.В., и др. Сезонная динамика эмиссии диоксида углерода при различных технологиях введения залежей в оборот в зависимости от природной зоны Западной Сибири // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 7. С. 35–42. EDN: FZUZWD.
7. Абрамов Н.В., Топорков И.Н., Семизоров С.А. Оценка эмиссии диоксида углерода при минимизации основной обработки черноземной почвы в северной лесостепи Западной Сибири // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2025. № 3. С. 48–54. DOI: 10.31857/S2500208225030108. EDN: ITQQYM.
8. Касторнова М.Г., Демин Е.А., Еремин Д.И. Экологическая оценка влияния сельскохозяйственной деятельности на эмиссию углекислого газа из чернозема выщелоченного Тобол-Ишимского междуречья // Аграрный вестник Урала. 2021. № 10. С. 9–20. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-213-10-10-20. EDN: OJTSDP.
9. Занилов А.Х. Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2025. № 125. С. 157–180. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180. EDN: ALHXSH.
10. Sanchez-Martin L., Dick Ja., Bocary K., et al. Residual effect of organic carbon as a tool for mitigating nitrogen oxides emissions in semi-arid climate // Plant and Soil. 2010. Vol. 326, N 1-2. P. 137–145. DOI: 10.1007/s11104-009-9987-z. EDN: NHTVKP.
11. Volkogon V., Pyrig O., Dimova S., et al. Focus of mineralization-synthesis processes of the organic matter in the leached chernozem while cultivating potatoes on different fertilization backgrounds // Agricultural Science and Practice. 2020. Vol. 7, N 1. P. 40–48. DOI: 10.15407/agrisp.7.01.040. EDN: RWTWCR.
12. Демин Е.А., Миллер С.С. Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на баланс органического углерода в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 6. С. 1069–1080. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080. EDN: FPDINT.
13. Свирина В.А., Черногаев В.Г. Влияние минеральных удобрений и известкования на динамику эмиссии CO₂, урожай и качество продукции культур звена севооборота // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 5. С. 45–50. DOI: 10.31857/S2500208224050106. EDN: ZTEFVU.
14. Гвоздь В.К., Андрущук Н.А., Джанчаров Т.М. Экологический анализ влияния минерального удобрения и перлита на эмиссию CO₂ в газонной экосистеме на склоне северо-западной экспозиции // АгроЭкоИнфо. 2025. № 2. DOI: 10.51419/202152215. EDN: RSNNZL.
15. Divyangkumar N., Panwar N.L., Agrawal Ch., et al. Cradle-to-gate analyses of biochar produced from agricultural crop residues by vacuum pyrolysis // Clean Energy. 2024. Vol. 8, N 6. P. 1–15. DOI: 10.1093/ce/zae069. EDN: LCQIPO.
16. Durani A., Kakar K., Baber B., et al. Greenhouse Gass Emission form Agriculture and their Effective Mitigation Techniques // Nangarhar University International Journal of Biosciences. 2024. Vol. 3. N ICCS(special). P. 221–225. DOI: 10.70436/nuijb.v3i02.206. EDN: NUZAVJ.
17. Rahmah D.M., Mardawati E., Kastaman R., et al. Coffee Pulp Biomass Utilization on Coffee Production and Its Impact on Energy Saving, CO₂ Emission Reduction, and Economic Value Added to Promote Green Lean Practice in Agriculture Production // Agronomy. 2023. Vol. 13, N 3. Art. 904. DOI: 10.3390/agronomy13030904. EDN: MMDXTG.
18. Аварский Н.Д., Богачев А.И., Хашир А.А. Органическое сельское хозяйство в условиях глобальной трансформации макроэкономических факторов: мировой и российский опыт // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2024. № 5. С. 2–13. DOI: 10.31442/0235-2494-2024-0-5-2-13. EDN: NXBDTT.
19. Михайлушкин П.В., Алиева А.Р. Органическое земледелие – направление перехода к «зеленой» экономике в России // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020. № 2. С. 17–19. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022. EDN: YCMNTD.

20. Сахаров А.В., Мищенко В.В., Еремин Д.И. Агрофизические свойства чернозема выщелоченного при различном его использовании в лесостепной зоне Зауралья // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 3. С. 62–67. EDN: VMBQXC.
21. Демин Е.А., Миллер С.С. Влияние температуры и влажности почвы на продуцирование диоксида углерода под действием различных способов основной обработки в условиях Зауралья // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 1. С. 98–105. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105. EDN: VFBMVH.
22. Камбулов С.И., Рыков В.Б., Трубилин Е.И., и др. Температурный режим обрабатываемого слоя почвы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 146. С. 49–57. DOI: 10.21515/1990-4665-146-012. EDN: VWBNOJ.
23. Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М., и др. Экспериментальная оценка вклада дыхания корней растений в эмиссию углекислого газа из почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1479–1488. EDN: NBSNVN.
24. Ковалевская Н.П., Завьялова Н.Е., Шаравин Д.Ю., и др. Особенности микробоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении минеральных и органических удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2018. № 2. С. 24–28. EDN: XSNENV.
25. Умаров М.М., Степанов А.Л., Умаров М.М., и др. Микробиологическая трансформация азота в почве. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
26. Лаптева Е.М., Ковалева В.А., Виноградова Ю.А., и др. Влияние различных систем удобрений на микробную биомассу и комплекс культивируемых микромицетов дерново-подзолистой почвы в подзоне средней тайги // Агрохимический вестник. 2019. № 6. С. 24–29. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10085. EDN: HTHVIY.
27. Гапешин Д.И., Поздняков Л.А., Демидов В.В. Интенсивность микробного дыхания и денитрификации в пахотной дерново-подзолистой почве разной степени смытости // Агрохимический вестник. 2022. № 2. С. 53–57. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-010. EDN: IQANLS.
28. Суховеева О.Э., Рыжов А.В., Почикалов А.В., и др. Влияние возделываемых культур и удобрений на дыхание почвы (Длительный опыт Тимирязевской сельскохозяйственной академии) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2024. Т. 88, № 4. С. 508–520. DOI: 10.31857/S2587556624040041. EDN: RQFVAX.
29. Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Никитин Д.А., и др. Микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы и ее ризосферы в полувековом полевом опыте с применением разных систем удобрения // Почвоведение. 2023. № 6. С. 715–729. DOI: 10.31857/S0032180X22601220. EDN: FPEBGH.
30. Зинякова Н.Б., Соколов Д.А., Лебедева Т.Н., и др. Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода // Агрохимия. 2024. № 4. С. 14–34. DOI: 10.31857/S0002188124040033. EDN: DMHYMZ.

References

1. Bevacqua E, Schleussner CF, Zscheischler J. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change*. 2025;15.
2. Cannon AJ. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold // *Nature Climate Change*. 2024;15:266-269.
3. Filimonova IV, Komarova AV, Novikov AYU. Determining the structure and dynamics of greenhouse gas emissions in the energy sector in the Novosibirsk Region. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2023;4:47-53. (In Russ.). DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_47. EDN: MFERAI.
4. Safin R, Valiev R, Kolesar V. Current state and prospects of carbon farming development in the Republic of Tatarstan. *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;3:7-13. (In Russ.). DOI: 10.12737/2073-0462-2021-7-13. EDN: ZVZFMX.

5. Bobrenko I, Kadermas I, Bobrenko E, et al. Carbon dioxide emission estimation in different zones of the south of Western Siberia // Bio Web of Conferences. 2024;15:04027. DOI: 10.1051/bioconf/202413004027. EDN: FQQFYF.
6. Bobrenko IA, Drofa OV, Goman NV, et al. Seasonal dynamics of carbon dioxide emissions from various technologies of deposit introduction into circulation, depending on the natural zone of Western Siberia. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2024;7:35-42. (In Russ.). EDN: FZUZWD.
7. Abramov NV, Toporkov IN, Semizorov SA. Assessment of carbon dioxide emissions when minimizing the primary cultivation of chernozem soil in the northern forest- steppe of western Siberia. *Vestnik Rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*. 2025;3:48-54. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2500208225030108. EDN: ITQQYM.
8. Kastornova MG, Demin EA, Eremin DI. Ecological assessment of the impact of agricultural activity on carbon dioxide emissions from the leached chernozem of the Tobol-Ishim interfluvium. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021;10:10-20. (In Russ.). DOI: 10.32417/1997-4868-2021-213-10-10-20. EDN: OJTSDP.
9. Zanirov AH. The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2025;125:157-180. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180. (In Russ.). EDN: ALHXSH.
10. Sanchez-Martin L, Dick JA, Bocary K, et al. Residual effect of organic carbon as a tool for mitigating nitrogen oxides emissions in semi-arid climate. *Plant and Soil*. 2010;326:137-145. DOI: 10.1007/s11104-009-9987-z. EDN: NHTVKP.
11. Volkogon V, Pyrig O, Dimova S, et al. Focus of mineralization-synthesis processes of the organic matter in the leached chernozem while cultivating potatoes on different fertilization backgrounds. *Agricultural Science and Practice*. 2020;1:40-48. DOI: 10.15407/agrisp7.01.040. EDN: RWTWCR.
12. Demin EA, Miller SS. The influence of increasing doses of mineral fertilizers on the balance of organic carbon in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25:1069-1080. (In Russ.). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080. EDN: FPDINT.
13. Svirina VA, Chernogaev VG. Influence of mineral fertilizers and liming on the dynamics of CO₂ emissions, crop yield and quality of crop products of crop rotation link. *Vestnik Rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*. 2024;5:45-50. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2500208224050106. EDN: ZTEFVU.
14. Gvozdenko VK, Andrushchuk NA, Dzhancharov TM. Ecological analysis of the impact of mineral fertilizers and perlite on CO₂ emissions in a lawn ecosystem on a north-west-facing slope. *AgroEkoInfo*. 2025;2. (In Russ.). DOI: 10.51419/202152215. EDN: RSNZL.
15. Divyangkumar N, Panwar NL, Agrawal Ch, et al. Cradle-to-gate analyses of biochar produced from agricultural crop residues by vacuum pyrolysis. *Clean Energy*. 2024;6:1-15. DOI: 10.1093/ce/ckae069. EDN: LCQIPO.
16. Durani A, Kakar K, Baber B, et al. Greenhouse Gas Emission from Agriculture and their Effective Mitigation Techniques. *Nangarhar University International Journal of Biosciences*. 2024;3:221-225. DOI: 10.70436/nuijb.v3i02.206. EDN: NUZAVJ.
17. Rahmah DM, Mardawati E, Kastaman R, et al. Coffee Pulp Biomass Utilization on Coffee Production and Its Impact on Energy Saving, CO₂ Emission Reduction, and Economic Value Added to Promote Green Lean Practice in Agriculture Production. *Agronomy*. 2023;3:904. DOI: 10.3390/agronomy13030904. EDN: MMDXTG.
18. Avarskij ND, Bogachev AI, Hashir AA. Organic agriculture in conditions of global transformation of macroeconomic factors: world and Russian experience. *Ekonomika sel'skohozyajstvennyh i pererabatyvayushchih predpriyatij*. 2024;5:2-13. (In Russ.). DOI: 10.31442/0235-2494-2024-0-5-2-13. EDN: NXBDTT.
19. Mikhaylushkin PV, Alieva AR. Organic agriculture – direction of transition to the "green" economy in Russia. *Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal*. 2020;2:17-19. (In Russ.). DOI: 10.24411/2587-6740-2020-12022. EDN: YCMNTD.
20. Sakharov AV, Mischenko VV, Eremin DI. Agrophysical properties of leached chernozem at its different use in the forest-steppe zone of Zauralye. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2020;3:62-67. (In Russ.). EDN: VMBQXC.

21. Demin EA, Miller SS. The effect of temperature and soil moisture on carbon dioxide emission caused by various primary tillage methods in the Trans-Urals. *Zernovoe hozyajstvo Rossii*. 2025;1:98-105. (In Russ.). DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105. EDN: VFBMVH.
22. Kambulov SI, Rykov VB, Trubilin EI, et al. Temperature regime of the treated soil layer. *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;146:49-57. (In Russ.). DOI: 10.21515/1990-4665-146-012. EDN: VWBNOJ.
23. Yevdokimov IV, Larionova AA, Lopes VO, et al. Experimental assessment of the contribution of plant root respiration to the emission of carbon dioxide from the soil/ Eurasian Soil Science. 2010;12:1373-1381. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1064229310120070. EDN: OHNLGD.
24. Kovalevskaya NP, Zav'yalova NE, Sharavin DYU, et al. Peculiarities of soddy-podzolic heavy loam soil microbocenosis under long-term application of mineral and organic fertilization systems. *Problemy agrohimii i ekologii*. 2018;2:24-28. (In Russ.). EDN: XSNENV.
25. Umarov MM, Stepanov AL, Umarov MM, et al. *Mikrobiologicheskaya transformaciya azota v pochve*. Moscow: GEOSI; 2007. 137 p. (In Russ.).
26. Lapteva EM, Kovaleva VA, Vinogradova YuA, et al. Influence of various fertilizer systems on microbial biomass and complex of cultivated micromycetes of soddy-podzolic soil in the middle taiga subzone. *Agrohimicheskij vestnik*. 2019;6:24-29. (In Russ.). DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10085. EDN: HTHVIY.
27. Gapeschin DI, Pozdnyakov LA, Demidov VV. Intensity of microbial respiration and denitrification in arable soddy-podzolic soil different degrees of washout. *Agrohimicheskij vestnik*. 2022;2:53-57. (In Russ.). DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-010. EDN: IQANLS.
28. Suhoveeva OE, Ryzhov AV, Pochikalov AV, et al. Influence of cultivated crops and fertilizers on soil respiration (long-term field experiment of timiryazev agricultural academy). *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2024;4:508-520. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2587556624040041. EDN: RQFVAX.
29. Semenov MV, Ksenofontova NA, Nikitin DA, et al. Microbiological Parameters of Soddy-Podzolic Soil and Its Rhizosphere in a Half-Century Field Experiment with Different Fertilizer Systems. *Eurasian Soil Science*. 2023;6:756-768. (In Russ.). DOI: 10.1134/s1064229323600070. EDN: UXDAJK.
30. Zinyakova NB, Sokolov DA, Lebedeva TN, et al. Effects of long-term application of mineral fertilizers and manure on agrochemical properties of gray forest soil, crops productivity and carbon sequestration. *Agrohimiya*. 2024;4:14-34. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0002188124040033. EDN: DMHYMZ.

Статья принята к публикации 21.04.2026 / The article accepted for publication 21.04.2026

Информация об авторах:

Евгений Александрович Демин, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробиотехнологий, кандидат сельскохозяйственных наук

Ольга Александровна Шахова, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробиотехнологий, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Елена Ивановна Миллер, младший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробиотехнологий

Анатолий Юрьевич Першаков, младший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробиотехнологий

Information about the authors:

Evgeny Aleksandrovich Demin, Senior Researcher at the Center for Fundamental and Applied Agricultural Biotechnology, Candidate of Agricultural Sciences

Olga Aleksandrovna Shakhova, Senior Researcher at the Center for Fundamental and Applied Agricultural Biotechnology, Candidate of Agricultural Sciences, Docent

Elena Ivanovna Miller, Junior Researcher at the Center for Fundamental and Applied Agricultural Biotechnology

Anatoly Yuryevich Pershakov, Junior Researcher at the Center for Fundamental and Applied Agricultural Biotechnology

