

ТЕМПЕРАТУРА И ВЛАЖНОСТЬ ПОЧВЫ КАК ФАКТОРЫ СКОРОСТИ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПОСЕВАХ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2026 Дёмин Е. А. ✉, Ахтямова А. А.

Тюменский государственный университет

(г. Тюмень, Российская Федерация)

✉ gambitn2013@yandex.ru

Реферат. Пахотные почвы – один из основных источников поступления углекислого газа в атмосферу. Повышение химической нагрузки, особенно применение высоких доз минеральных удобрений, увеличивает дыхание почвы. Для прогнозирования общих потоков эмиссии диоксида углерода в агроэкосистемах необходимо определение влияния различных факторов на скорость продуцирования углекислого газа. Цель исследования – установить влияние температуры и влажности почвы на интенсивность эмиссии диоксида углерода в посевах яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в условиях лесостепной зоны Зауралья. Работу выполняли в 2023–2024 годы на черноземе выщелоченном. Схема опыта включала варианты с естественным уровнем питания (без удобрений) и дозами минеральных удобрений на расчетную урожайность 3,0...6,0 т/га зерна яровой пшеницы. Эмиссию диоксида углерода определяли с использованием газоанализаторов с закрытыми камерами. Дыхание почвы в варианте без использования удобрений находилось в интервале от 12 до 113 кг/га в сутки. При их внесении продуцирование CO_2 составляло от 13 до 174 кг/га в сутки. Вне зависимости от уровня питания отмечена сильная связь дыхания почвы с ее температурой ($r=0,79...0,87$) и средняя – с влажностью ($r=0,63...0,69$). Изменение температуры почвы на 1°C без применения удобрений приводило к варьированию эмиссии CO_2 в сутки на 7,7 кг/га, с повышением уровня питания его диапазон увеличивался до $\pm 9,1...13,0$ кг/га в сутки. Изменение влажности почвы на 1% сопровождалось варьированием эмиссии в сутки соответственно на 2,4 кг CO_2 /га и 3,2...3,9 кг CO_2 /га.

Ключевые слова: углекислый газ, дыхание почвы, продуцирование диоксида углерода, уровень питания, корреляция, уравнения регрессии.

Для цитирования: Дёмин Е.А., Ахтямова А.А. Температура и влажность почвы как факторы скорости эмиссии диоксида углерода при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в посевах яровой пшеницы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 29-36. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-29-36

SOIL TEMPERATURE AND MOISTURE AS FACTORS OF CARBON DIOXIDE EMISSION RATES WHEN INCREASING DOSES OF MINERAL FERTILIZERS IN SPRING WHEAT CROPS

© 2026 Demin E.A. ✉, Akhtyamova A.A.

Tyumen State University

(Tyumen, Russian Federation)

✉ gambitn2013@yandex.ru

Abstract. Arable soils are one of the main sources of carbon dioxide emissions into the atmosphere. Increasing chemical loads, especially the application of high doses of mineral fertilizers, increase soil respiration. It is necessary to determine the influence of various factors on the rate of carbon dioxide production in order to predict overall carbon dioxide emission fluxes in agroecosystems. The aim of this study was to determine the influence of soil temperature and moisture on intensity of carbon dioxide emissions in spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers in the forest-steppe zone of Trans-Urals. The work was carried out in 2023-2024 years on leached chernozem. The experimental scheme included variants with a natural nutrient level (without fertilizers) and doses of mineral fertilizers for an estimated yield of 3.0...6.0 t/ha of spring wheat grain. Carbon dioxide emissions were determined using closed-chamber gas analyzers. Soil respiration in the variant without fertilizers ranged from 12 to 113 kg/ha per day. In the fertilized variants CO_2 production ranged from 13 to 174 kg/ha per day. A strong relationship was observed between soil respiration and its temperature ($r=0.79...0.87$) and a moderate relationship with moisture ($r=0.63...0.69$) regardless of the nutrient level. A change in soil temperature by 1°C without fertilizers led to a variation in CO_2 emissions per day by 7.7 kg/ha, its range increased to $\pm 9.1...13.0$ kg/ha per day with an increase in the nutrient level. A change in soil moisture by 1% was accompanied by a daily variation in emissions of 2.4 kg CO_2 /ha and 3.2-3.9 kg CO_2 /ha, respectively.

Key words: carbon dioxide, soil respiration, carbon dioxide production, nutrient status, correlation, regression equations.

For citation: Demin EA, Akhtyamova AA. [Soil temperature and moisture as factors of carbon dioxide emission rates when increasing doses of mineral fertilizers in spring wheat crops]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 29-36 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-29-36

Введение. Последнее столетие насыщено множеством проблем, одна из которых – глобальное изменение климата, по последним данным в 2024 году отмечено повышение средней температуры воздуха на земле на 1,5°C [1, 2]. Это происходит по причине увеличения массовой концентрации парниковых газов и в частности диоксида углерода, который накапливается в нижних слоях атмосферы [3]. Повышение содержания климатически активных газов в атмосфере связано с увеличением интенсивности технологических процессов во всех отраслях. Одним из главных источников парниковых газов выступают высокотехнологические перерабатывающие предприятия, добывающие углеводородное сырье, а также агропромышленный комплекс [4, 5]. На долю последнего, по некоторым данным, приходится около 25% всех выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью человека, и половина из них представлена диоксидом углерода и закисью азота [6]. Это связано с тем, что при постоянном воздействии на почву сельскохозяйственными орудиями происходит разрыхление обрабатываемого слоя, улучшается аэрация, усиливается развитие почвенной аэробной микрофлоры и ускоряется процесс минерализации органического вещества почвы, одним из конечных продуктов распада которого служит диоксид углерода [7, 8].

Введение целинных почв в сельскохозяйственный оборот служит дополнительным фактором, влияющим на баланс углерода в агроэкосистемах, который связан с тем, что в отличие от естественных луговых экосистем, в почву под культурными видами возвращается намного меньше органического углерода с растительными остатками. Этот факт обусловлен тем, что биомасса корней луговых естественных экосистем в разы больше, чем в зерновых агроценозах. Дополнительная причина связана с агротехникой, а именно возделыванием кормовых культур для получения зеленой массы, что приводит к дефициту растительных остатков и углерода, поступающих в почву [9]. Это служит причиной того, что источником питания для почвенной микробной массы становятся не только свежие растительные остатки, но и стабильные гумусовые вещества почвы [10]. Важным фактором, который оказывает стимулирующее действие на прирост биомассы растений, а также активность почвенной микробиоты, выступают минеральные удобрения. Средние дозы минеральных удобрений оказывают стимулирующее действие на микробную массу почвы и служат катализатором их активности, что приводит к ускорению процессов трансформации органического вещества в минеральные соединения и увеличивает скорость эмиссии диоксида углерода [11].

Одними из наиболее важных абиотических факторов, оказывающих влияние на интенсивность биохимических процессов,

протекающих в почве, выступают гидротермические условия, а именно температура и влажность почвы, которые напрямую связаны с погодными условиями. Во многих работах отмечена сильная прямая связь между температурой почвы и скоростью эмиссии диоксида углерода [12, 13]. Реже авторы отмечают корреляцию средней силы между влажностью и дыханием почвы [14, 15]. В связи с вышеперечисленным, изучение влияния гидротермических условий на скорость эмиссии диоксида углерода на фоне использования высоких доз минеральных удобрений в современном сельском хозяйстве необходимо.

Цель исследования – установить влияние температуры и влажности почвы на интенсивность эмиссии диоксида углерода в посевах яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в условиях лесостепной зоны Зауралья.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в зернопаровом севообороте в 2023–2024 годы в северной лесостепи Тюменской области. Почвенный покров участка представлен черноземом выщелоченным. Массовая доля органического вещества составляла – $4,0 \pm 0,8\%$; кислотность обменная $5,5 \pm 0,3$ ед. pH; содержание азота нитратного – $9,1 \pm 5,4$ мг/кг; подвижного фосфора и калия по Чирикову – 71 ± 20 мг/кг и 146 ± 38 мг/кг соответственно.

Исследование проводили в многолетнем агрохимическом, стационарном полевом опыте, где ежегодно с 1995 года под яровую пшеницу и овес вносили рассчитанные методом элементарного баланса дозы минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0, 4,0, 5,0 и 6,0 т/га зерна, под однолетние травы удобрения не вносили. За контроль был взят участок без применения удобрений. Виды агротехнических работы были идентичными в течение всего времени проведения эксперимента. Ежегодно после уборки однолетних трав проводили вспашку на глубину 20...22 см, весной – боронование, врезание удобрений СЗП-3,6 на глубину 4...6 см, культивацию и посев яровой пшеницы с нормой высева 6,0 млн всхожих семян на 1 га с последующим прикатыванием. В 2023 году вносили следующие дозы минеральных удобрений: в расчете на урожай 3,0 т/га – $N_{95}P_{46}$; 4,0 т/га – $N_{153}P_{94}$; 5,0 т/га – $N_{211}P_{142}$ и 6,0 т/га – $N_{270}P_{190}$, а в 2024 году: 3,0 т/га – $N_{60}P_{40}$; 4,0 т/га – $N_{120}P_{80}$; 5,0 т/га – $N_{180}P_{120}$ и 6,0 т/га – $N_{240}P_{160}$. В качестве удобрений применяли аммиачную селитру (N_{34}) и аммофос ($N_{12}P_{52}$). Потребность во внесении калийных удобрений отсутствовала вследствие его высокого содержания в почве.

Дыхание почвы определяли в трехкратном повторении камерным методом с применением инфракрасных газовых анализаторов, в 2023 году прибором AZ77535 в 2024 году – PriEco PRI-8610. В период замеров в трехкратном повторении, определяли температуру почвы в слое 0...30 см электронным почвенным

термометром и отбирали почву в бюксы послойно через каждые 10 см до глубины 0...30 см, влажность почвы устанавливали в лаборатории гравиметрическим методом.

Погодные условия 2023–2024 годы были различными. В 2023 году они характеризовались как умеренно теплые и увлажненные, гидротермический коэффициент (ГТК) достигал 1,0 ед. Распределение осадков было

следующим: избыток отмечали в середине и конце лета, дефицит – в мае и сентябре (рис. 1). Температура воздуха при этом была выше нормы на протяжении всей вегетации. В 2024 году ГТК составлял 1,4 ед., избыток осадков был в начале и конце лета, недостатка влаги при этом не отмечали, а температура воздуха с июня по октябрь была выше средних многолетних значений.

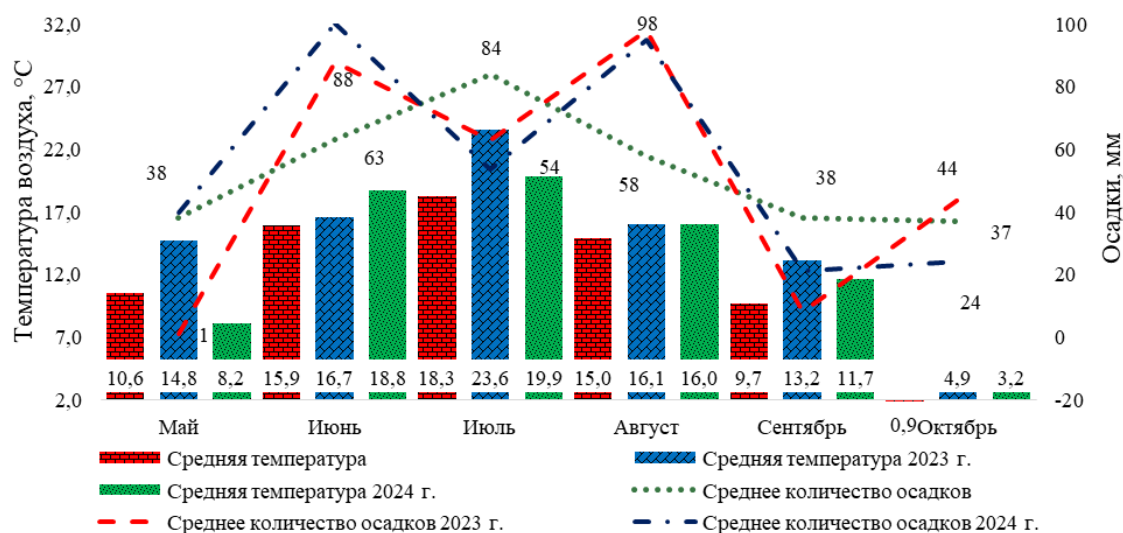


Рис. 1 – Погодные условия периода исследований
Fig. 1 – Weather conditions during the research period

Результаты и обсуждение. В мае почва прогревалась до оптимальных значений в 10,5°C независимо от уровня минерального питания (табл. 1). В июле средняя температура почвы за месяц в контроле составляла 16,5°C, что на 6,0°C выше, чем в мае. Достоверных различий в температуре почвы при этом с удобренными вариантами не отмечали, отклонения находились в пределах ошибки исследования. Прогрев почвы в начале лета связан с закономерным повышением температуры воздуха и более активной солнечной радиацией, которая в связи с тем, что растения не до конца затеняют поверхность почвы, оказывает существенное влияние на температурный режим. К июлю средняя за месяц температура почвы продолжала повышаться в контроле до 19,7°C, что на 3,2°C выше значений предыдущего месяца, и достигала пиковых значений за

вегетацию. В удобренных вариантах, несмотря на то, что температура почвы также повышалась относительно прошлого месяца, относительно контроля почва была прогрета меньше на 0,5...0,8°C. Причем с повышением доз удобрений отмечали более существенные различия с контролем в температуре почвы. Это связано с тем, что в более удобренных вариантах больше биомасса растений, что приводит к существенному затенению и снижает влияние солнечной радиации на прогрев почвы. В августе ее температура начинала опускаться до 16,7...16,9°C, что на 2,1...2,8°C ниже значений прошлого месяца. Начиная с августа и до октября, существенных различий в температуре почвы между опытными вариантами не выявлено, отклонения были в пределах ошибки исследования. В сентябре средняя температура почвы опускалась до значений 12,5...12,6°C, а в октябре до 8,1...8,2°C.

Таблица 1 – Температура почвы в слое 0...30 см под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), °C

Table 1 – Soil temperature in the 0–30 cm layer under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), °C

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	10,5	16,5	19,7	16,9	12,5	8,2
NP на 3,0 т/га	10,5	16,4	19,2	16,9	12,6	8,1
NP на 4,0 т/га	10,5	16,4	19,0	16,7	12,5	8,1
NP на 5,0 т/га	10,5	16,3	18,9	16,9	12,6	8,1
NP на 6,0 т/га	10,5	16,2	18,9	16,8	12,5	8,1
HCP ₀₅	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2

Влажность почвы в течение вегетации варьировала из-за изменения режима увлажнения и не зависела от уровня минерального питания. С мая по октябрь достоверных

различий между вариантами в зависимости от доз удобрений не отмечено, хотя влажность почвы варьировала от 17,4 до 30,1% (табл. 2).

Таблица 2 – Влажность почвы в слое 0...30 см под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), %

Table 2 — Soil moisture in the 0–30 cm layer under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), %

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	24,7	27,6	29,8	22,3	22,3	17,4
NP на 3,0 т/га	24,0	26,5	30,1	22,3	22,6	17,9
NP на 4,0 т/га	24,3	27,4	29,9	22,6	22,7	17,5
NP на 5,0 т/га	24,8	26,8	29,9	22,9	22,5	17,7
NP на 6,0 т/га	24,6	26,6	29,9	23,2	22,7	17,6
HCP ₀₅	1,0	1,4	1,9	1,6	1,3	1,2

Интенсивность эмиссии диоксида углерода в агроэкосистемах зависит от нескольких переменных, таких как обработки почвы, виды возделываемых культур, химическая нагрузка и др. [16, 17]. Подавляющее большинство исследователей отмечают, что минеральные удобрения выступают своего рода катализатором эмиссии диоксида углерода по причине активизации активности почвенной микробиоты [18, 19, 20].

В мае в среднем за годы исследований в варианте без использования удобрений эмиссия диоксида углерода достигала 43,3 кг/га в сутки (табл. 3). Внесение удобрений для получения планируемой урожайности на уровне 3,0...6,0 т/га приводило к повышению интенсивности почвенного дыхания. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна эмиссия в мае возрастала относительно контроля на 2,8 и 4,2 кгCO₂/га в сутки (HCP₀₅=2,1 кгCO₂/га в сутки), что соответствовало 6 и 10% соответственно. В вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна интенсивность процесса дыхания почвы была выше контроля на 12,9...5,9 кг/га в сутки (30 и 37%).

В начале лета дыхание почвы увеличивалось более чем вдвое вне зависимости от уровня минерального питания. В контроле дыхание почвы в среднем за месяц составляло 82,5 кгCO₂/га в сутки. В удобренных вариантах с повышением уровня питания продуцирование CO₂ увеличивалось и было больше чем в контроле на 18,4...51,4 кгCO₂/га в сутки (22...62%).

В середине лета (июле) дыхание почвы в естественном по питанию варианте возросло на 37% (30,5 кгCO₂/га в сутки) относительно весенних значений. В вариантах с применением дополнительного минерального питания эмиссия CO₂, так же, как и в контроле, увеличивалась более чем на 25...30%. Относительно контроля продуцирование углерода с повышением уровня минерального питания увеличивалось на 12...54% (13,5...60,6 кгCO₂/га в сутки). Отмеченная в опыте максимальная эмиссия в июле может быть связана с тем, что в этот период времени складывались наиболее

благоприятные за вегетацию температурный (18,9...19,7°C) и водный (29,9...30,1%) режимы почвы для развития аэробной аборигенной почвенной микрофлоры, которая активно участвует в протекающих в почве биогеохимических процессах [21, 22]. Не исключая себя фактор, который также дает определённую долю вклада в общую эмиссию CO₂ – это корневая система, которая к середине лета хорошо разрастается в почве.

С августа и до конца вегетации, отмечено снижение эмиссии диоксида углерода. Это происходило по причине улучшения условий для развития микробной массы, в результате понижения температуры почвы. Важным фактором уменьшения дыхания почвы становится то, что корневая система растений начинает снижать свой вклад в общую эмиссию углерода в агроэкосистемах по причине созревания яровой пшеницы. Возможным фактором, который приводит к уменьшению скорости дыхания почвы с августа, может выступать то, что микробиота почвы переработала органические остатки побочной продукции, оставленной на поле с прошлого года, что приводит к сокращению микробной массы почвы. В контроле эмиссия диоксида углерода составила 82,0 кгCO₂/га в сутки, что на 27% (31,0 кгCO₂/га в сутки) меньше, чем в предыдущем месяце. В удобренных вариантах снижение июльского максимума составляло 20...24% (29,3...36,6 кгCO₂/га в сутки). В варианте с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна эмиссия сократилась до 95,7...109,1 кгCO₂/га в сутки, однако была выше контрольного варианта на 17...33% (13,7...27,1 кгCO₂/га в сутки). В более удобренных вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна эмиссия была выше контроля на 57...67% (46,9...55,0 кгCO₂/га в сутки).

В сентябре средняя эмиссия диоксида углерода в сутки уменьшилась более чем в два раза до 40,2 кгCO₂/га в сутки. В удобренных вариантах снижение скорости эмиссии относительно прошлого месяца было менее выражено в варианте с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна, снижение дыхание относительно августа составляло не более 38 и 42%

(36,6 и 46,4 кгСО₂/га в сутки) на более высоких питательных фонах (на 5,0 и 6,0 т/га зерна) – 40 и 28% (51,4 и 48,7 кгСО₂/га в сутки) соответственно. Относительно естественного уровня питания дыхание почвы в удобренных вариантах с повышением расчетных доз было выше на 47...120%.

В октябре во всех исследуемых вариантах отмечали минимальное дыхание почвы, которое относительно сентября снижалось в 3...4 раза и достигало в контроле 12,6 кгСО₂/га в сутки. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна из-за хорошего усвоения питательных веществ из почвы яровой пшеницей, питательный режим становился

схожим с контролем. Это приводило к тому, что дыхание почвы существенно не отличалось от контроля из-за отсутствия катализатора для почвенной микробиоты в виде свободных форм азота. В вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна, из-за неполучения запланированного урожая по причине особенностей погодных условий, в почве остаются неизрасходованные минеральные формы питательных веществ, что увеличивает активность и численность микробной массы почвы. Это приводит к тому, что дыхание почвы, относительно контроля, в этих вариантах было выше на 35 и 56% (4,4 и 7,1 кгСО₂/га в сутки).

Таблица 3 – Эмиссия диоксида углерода под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), кг/га в сутки

Table 3 – Carbon dioxide emission under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), kg/ha per day

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	43,3	82,5	113,0	82,0	40,2	12,6
NP на 3,0 т/га	46,1	100,9	126,5	95,7	59,1	13,1
NP на 4,0 т/га	47,5	109,2	138,4	109,1	62,7	13,8
NP на 5,0 т/га	56,2	131,8	165,2	128,9	77,5	17,0
NP на 6,0 т/га	59,2	133,9	173,6	137,0	88,3	19,7
НСР ₀₅	2,1	7,5	12,3	10,2	7,3	1,8

Вне зависимости от доз минеральных удобрений корреляция между эмиссией диоксида углерода и температурой почвы характеризуется высокой ($r=0,79...0,87$), а с влажностью – средней ($r=0,63...0,69$) силой связи (табл. 4). В контроле изменение температуры почвы на 1°C приводит к увеличению/уменьшению эмиссии в течение суток на 7,7 кгСО₂/га ($R^2=0,66$), а при изменении влажности на 1% на 2,4 кгСО₂/га ($R^2=0,40$). С повышением уровня минерального питания отмечали более существенное варьирование в дыхании почвы при изменении температуры и

влажности. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна изменение температуры почвы на 1°C приводило к изменению интенсивности суточной эмиссии СО₂ на $\pm 9,1$ и $\pm 10,5$ кгСО₂/га ($R^2=0,62...0,70$), а при изменении влажности почвы на 1% – на $\pm 3,2$ и $\pm 3,4$ кгСО₂/га в сутки ($R^2=0,46...0,48$). В высоко удобренных вариантах NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна суточная эмиссия изменялась на $\pm 12,7$ и $\pm 13,0$ кгСО₂/га в сутки ($R^2=0,74...0,76$), при варьировании температуры почвы на $\pm 1^\circ\text{C}$ и на $\pm 3,7$ и $\pm 3,9$ кгСО₂/га ($R^2=0,40$) при изменении влажности на 1%.

Таблица 4 – Корреляционная и регрессионная связь между температурой и влажностью почвы с эмиссией диоксида углерода в зависимости от доз минеральных удобрений

Table 4 — Correlation and regression relationship between soil temperature and moisture with carbon dioxide emission depending on mineral fertilizer doses

Культура / пар	Температура/ влажность	r	R ²	Уравнение регрессии
Контроль	температура	0,81	0,66	$y = 7,6672x - 45,3$
Контроль	влажность	0,63	0,40	$y = 2,4369x + 5,2$
NP на 3,0 т/га	температура	0,79	0,62	$y = 9,0729x - 52,5$
NP на 3,0 т/га	влажность	0,69	0,48	$y = 3,2303x - 1,9$
NP на 4,0 т/га	температура	0,84	0,70	$y = 10,484x - 65,2$
NP на 4,0 т/га	влажность	0,68	0,46	$y = 3,355x + 1,2$
NP на 5,0 т/га	температура	0,87	0,76	$y = 12,762x - 80,8$
NP на 5,0 т/га	влажность	0,63	0,40	$y = 3,7423x + 8,3$
NP на 6,0 т/га	температура	0,86	0,74	$y = 13,016x - 77,8$
NP на 6,0 т/га	влажность	0,63	0,40	$y = 3,9162x + 10,1$

Выводы. Температура почвы под посевами яровой пшеницы в слое 0...30 см в контроле с мая по июль повышалась с 10,5 до 19,7°C и в дальнейшем опускалась к середине осени до 8,2°C. В удобренных вариантах динамика изменений была схожей, за исключением июля, когда по мере улучшения минерального питания температура почвы снижалась до 18,9...19,3°C. Влажность почвы не зависела от уровня минерального питания и варьировала в зависимости от количества выпавших осадков от 17,4 до 30,1% в течение вегетации.

При естественном уровне питания дыхание почвы в течение вегетации варьировало от 12,6 до 113,0 кг CO₂/га в сутки. В удобренных вариантах оно повышалось до 13,1...173,6 кг CO₂/га

в сутки. Корреляция между эмиссией диоксида углерода и температурой почвы характеризовалась связью высокой силы ($r=0,79...0,87$), с влажностью – средней ($r=0,63...0,69$).

Изменение температуры почвы на 1°C на фоне естественного плодородия приводит к изменению суточной эмиссии на 7,7 кг CO₂/га, по мере улучшения условий минерального питания размах варьирования величины этого показателя возрастает до 9,1...13,0 кг CO₂/га в сутки. При изменении влажности почвы на 1% продуцирование CO₂ в сутки сдвигается соответственно на 2,4 кг/га и 3,2...3,9 кг CO₂/га.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10005.

Литература

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. No. 3. P. 262–265. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02246-9> (дата обращения: 25.07.2025).
2. Cannon A. J. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold // *Nature climate change*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 266–269. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8> (дата обращения: 25.07.2025).
3. 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.
4. Азнаева М. Р., Захитов А. Х., Дударова Д. Г. Агротехнологический потенциал фосфатмобилизирующих микроорганизмов, выделенных из чернозема обыкновенного степной зоны Кабардино-Балкарской Республики // *Агрохимия*. 2025. № 4. С. 88–96. doi: 10.31857/S0002188125040102.
5. 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 Северо-Востока*. 2024. № 6. С. 1069–1080. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080.
6. 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 (63). С. 7–13. doi: 10.12737/2073-0462-2021-7-13.
7. Биологическая активность и содержание гумуса пахотных почв в зависимости от рельефа, климатических условий и сельскохозяйственных культур / Л. Н. Караулова, О. Г. Чуян, Н. В. Афонченко и др. // *Земледелие*. 2025. № 2. С. 27–33. doi: 10.24412/0044-3913-2025-2-27-33.
8. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние минеральных удобрений на поступление и запасы органического углерода в зернопаровом севообороте лесостепной зоны Зауралья // *Siberian journal of life sciences and agriculture*. 2024. Т. 16. № 5. С. 262–287. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987.
9. Абрамов Н. В. Воспроизводство плодородия почв УрФО // *АПК России*. 2017. Т. 24. № 5. С. 1055–1065.
10. Еремин Д. И., Демин Е. А. Влияние длительного сельскохозяйственного использования на запасы органического углерода в черноземе выщелоченном // *Земледелие*. 2023. № 4. С. 35–39. doi: 10.24412/0044-3913-2023-4-35-39.
11. Еремин Д. И., Ахтямова А. А. Минерализация гумуса в пахотном черноземе при использовании минеральных удобрений // *Земледелие*. 2018. № 7. С. 16–18. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10704.
12. Чимитдоржиева Э. О., Цыбенков Ю. Б., Чимитдоржиева Г. Д. Эмиссия CO₂ из пахотных черноземов западного Забайкалья // *Агрохимия*. 2024. № 5. С. 45–53. doi: 10.31857/S0002188124050063.
13. Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири / А. А. Бобрик, О. Ю. Гончарова, Г. В. Матышак и др. // *Почвоведение*. 2020. № 11. С. 1328–1340. doi: 10.31857/S0032180X20110052.
14. Еремин Д. И., Попова О. Н. Формирование почвенной микрофлоры в антропогенно-преобразованных почвах // *Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья*. 2015. № 4. С. 7–12.
15. Сорокина М. В., Лобков В. Т., Бобкова Ю. А. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на её биологическую активность и урожайность озимой пшеницы // *Вестник Орловского государственного аграрного университета*. 2016. № 5. С. 47–53.
16. Сезонная динамика эмиссии диоксида углерода при различных технологиях введения залежей в оборот в зависимости от природной зоны Западной Сибири / И. А. Бобренко, О. В. Дрофа, Н. В. Гоман, и др. // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. № 7. С. 35–42.
17. Золотухин А. Н. Интенсивность дыхания черноземных почв под посевами озимой пшеницы с различными дозами минеральных удобрений // *Агрохимический вестник*. 2024. № 3. С. 91–95. doi: 10.24412/1029-2551-2024-3-016.
18. 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.
19. Митрофанов С. В., Серова Е. В., Орлова Н. В. Влияние применения удобрений на баланс основных элементов питания и эмиссию парниковых газов в Германии // *Агрохимия*. 2024. № 5. С. 54–63. doi: 10.31857/S0002188124050078.

20. Демидов Д. В., Гусева Ю. Е., Налиухин А. Н. Биомодификация как способ повышения эффективности минеральных удобрений и снижения углеродного следа при возделывании ярового ячменя и яровой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 1. С. 25–30. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_25.

21. Митрофанов Д. В. Влияние температуры, влажности, нитратного азота на биологическую активность почвы и урожайность твёрдой пшеницы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 5 (77). С. 91–102. doi:10.32786/2071-9485-2024-05-10.

22. Митрофанов Д. В. Воздействие влажности, температуры и биологической активности почвы на урожайность гороха в засушливых условиях Оренбуржья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 1 (65). С. 31–38. doi: 10.18286/1816-4501-2024-1-31-38.

References

1. Bevacqua E, Schleussner CF, Zscheischler Ja. A year above 1.5°C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. [Internet]. Nature climate change. 2025; Vol.15. No.3. 262-265 p. [cited 2025, July 25]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02246-9>.

2. Cannon AJ. Twelve months at 1.5°C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. [Internet]. Nature climate change. 2025; Vol.15. No.3. 266-269 p. [cited 2025, July 25]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8>.

3. Abramov NV, Toporkov IN, Semizorov SA. [Assessment of carbon dioxide emission during minimization of primary tillage of chernozem soil in the northern forest-steppe of Western Siberia]. Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki. 2025; 3. 48-54 p. doi: 10.31857/S2500208225030108.

4. Aznaeva MR, Zakhilov AKh, Dudarova DG. [Agrotechnological potential of phosphate-mobilizing microorganisms isolated from ordinary chernozem of steppe zone of Kabardino-Balkarian Republic]. Agrokimiya. 2025; 4. 88-96 p. doi: 10.31857/S0002188125040102.

5. Demin EA, Miller SS. [Effect of increasing doses of mineral fertilizers on balance of organic carbon in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2024; 6. 1069-1080 p. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080.

6. Safin RI, Valiev AR, Kolesar VA. [Current state and prospects for the development of carbon farming in the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3 (63). 7-13 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-7-13.

7. Karaulova LN, Chuyan OG, Afonchenko NV. [Biological activity and humus content of arable soils depending on relief, climatic conditions and agricultural crops]. Zemledelie. 2025; 2. 27-33 p. doi: 10.24412/0044-3913-2025-2-27-33.

8. Demin EA, Miller SS. [Effect of mineral fertilizers on supply and reserves of organic carbon in grain-fallow crop rotation in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Siberian journal of life sciences and agriculture. 2024; Vol.16. 5. 262-287 p. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987.

9. Abramov NV. [Soil fertility restoration in Ural Federal District]. APK Rossii. 2017; Vol.24. 5. 1055-1065 p.

10. Eremin DI, Demin EA. [Impact of long-term agricultural use on organic carbon reserves in leached chernozem]. Zemledelie. 2023; 4. 35-39 p. doi: 10.24412/0044-3913-2023-4-35-39.

11. Eremin DI, Akhtyamova AA. [Humus mineralization in arable chernozem with the use of mineral fertilizers]. Zemledelie. 2018; 7. 16-18 p. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10704.

12. Chimitdorzhieva EO, Tsybenov YuB, Chimitdorzhieva GD. [CO₂ emission from arable chernozem of Western Baykal region]. Agrokimiya. 2024; 5. 45-53 p. doi: 10.31857/S0002188124050063.

13. Bobrik AA, Goncharova OYu, Matyshak GV. [Distribution of carbon cycle components in soils of forest ecosystems of the northern, middle and southern taiga of Western Siberia]. Pochvovedenie. 2020; 11. 1328-1340 p. doi: 10.31857/S0032180X20110052.

14. Eremin DI, Popova ON. [Formation of soil microflora in anthropogenically transformed soils]. Vestnik Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta Severnogo Zauralya. 2015; 4. 7-12 p.

15. Sorokina MV, Lobkov VT, Bobkova YuA. [Influence of primary tillage techniques of gray forest soil on its biological activity and winter wheat yield]. Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; 5. 47-53 p.

16. Bobrenko IA, Drofa OV, Goman NV. [Seasonal dynamics of carbon dioxide emissions with different technologies of introducing fallow lands into rotation depending on the natural zone of Western Siberia]. Vestnik Kur'skoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 7. 35-42 p.

17. Zolotukhin AN. [Respiration intensity of chernozem soils under winter wheat crops with different doses of mineral fertilizers]. Agrokhimicheskiy vestnik. 2024; 3. 91-95 p. doi: 10.24412/1029-2551-2024-3-016.

18. Svirina VA, Chernogaev VG. [Influence of mineral fertilizers and liming on the dynamics of CO₂ emissions, yield and quality of crops in the crop rotation link]. Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki. 2024; 5. 45-50 p. doi: 10.31857/S2500208224050106.

19. Mitrofanov SV, Serova EV, Orlova NV. [Influence of fertilizer application on balance of essential nutrients and greenhouse gas emissions in Germany]. Agrokimiya. 2024; 5. 54-63 p. doi: 10.31857/S0002188124050078.

20. Demidov DV, Guseva YuE, Naliukhin AN. [Biomodification as a way to increase the efficiency of mineral fertilizers and reduce the carbon footprint in the cultivation of spring barley and spring wheat in Central Non-Black Earth region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025; Vol.39. 1. 25-30 p. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_25.

21. Mitrofanov D. V. [Effect of temperature, humidity and nitrate nitrogen on soil biological activity and durum wheat yield]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2024; 5 (77). 91-102 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-10.

22. Mitrofanov DV. [Effect of soil humidity, temperature and biological activity on pea yield in arid conditions of Orenburg region]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 1 (65). 31-38 p. doi: 10.18286/1816-4501-2024-1-31-38.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Дёмин Евгений Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробiotехнологий Тюменского государственного университета (625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6), e-mail: gambitn2013@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2542-3678

Ахтямова Анастасия Андреевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агробiotехнологий Тюменского государственного университета (625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6), e-mail: gen.i72@mail.ru, ORCID 0000-0003-0297-6958

Вклад авторов:

Е.А. Дёмин – получение грантов и финансирования, научное руководство проектом, редактирование, доработка текста;

А.А. Ахтямова – проведение экспериментов, сбор данных, написание первоначального текста статьи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 31.07.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors:

Demin Evgeniy Aleksandrovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Center for Fundamental and Applied Agrobiotechnology Tyumen State University (6 Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation), e-mail: gambitn2013@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2542-3678

Akhtyamova Anastasiya Andreevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Center for Fundamental and Applied Agrobiotechnology Tyumen State University (6 Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation), e-mail: gen.i72@mail.ru, ORCID 0000-0003-0297-6958

Contribution of the authors:

Е.А. Дёмин – Funding acquisition, supervision, Writing – review & Editing.

А.А. Ахтямова – Investigation, Writing – original draft.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 31.07.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.

