

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПРОДУЦИРОВАНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ЗАУРАЛЬЯ

Е. А. Дёмин, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, gambitn2013@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-2542-3678;

С. С. Миллер, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, millerss@gausz.ru, ORCID ID: 0000-0002-2406-0142

Государственный аграрный университет Северного Зауралья,
625003, г. Тюмень, ул. Республики, д. 7

Цель работы – оценить степень влияния динамики температуры и влажности почвы на интенсивность продуцирования углекислого газа при использовании различных способов обработки почвы. Оценено влияние способов обработки на температурный режим и влажность почвы под посевами яровой пшеницы в 2023–2024 годах. Установлено, что температура и влажность почвы зависят в большей степени от погодных условий и варьируют в диапазоне 6,8–20,7 °С и 12,0–36,1 %. Определено, что в зависимости от влажности и температуры эмиссия CO₂ на отвальном фоне варьировала с мая по октябрь от 16,4 до 104,4 кг/га в сутки, на безотвальном – в диапазоне 13,8–105,7 кг/га и нулевом – 8,8–94,2 кг/га в 2023 году. В 2024 г. продуцирование CO₂ было выше и варьировало от 18,8 до 164,2 кг/га на отвальном варианте, от 15,0 до 155,7 кг/га на безотвальном и в диапазоне 12,0–142,5 на нулевом варианте. В опыте установлен высокий уровень зависимости температуры почвы и скорости эмиссии CO₂ ($r = 0,79–0,81$). Определено, что повышение температуры почвы на 1 °С увеличивает суточную эмиссию CO₂ на 9,44 кг/га при отвальной, на 9,59 кг/га при безотвальной и на 8,38 кг/га при нулевой обработке. Отмечен высокий уровень зависимости между влажностью почвы и эмиссией ($r = 0,58–0,67$). Установлено, что повышение влажности почвы на 1 % увеличивает эмиссию на 4,11 кг/га при отвальной обработке и на 3,70 и 3,22 кг/га при безотвальной и нулевой обработке соответственно.

Ключевые слова: Эмиссия, углекислый газ, дыхание почвы, обработка почвы, температура, влажность.

Для цитирования: Дёмин 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.



THE EFFECT OF TEMPERATURE AND SOIL MOISTURE ON CARBON DIOXIDE EMISSION CAUSED BY VARIOUS PRIMARY TILLAGE METHODS IN THE TRANS-URALS

E. A. Demin, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher, gambitn2013@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-2542-3678;

S. S. Miller, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher, millerss@gausz.ru, ORCID ID: 0000-0002-2406-0142

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education “Northern Trans-Ural State Agricultural University”,
625003, Tyumen region, Tyumen, Respublik Str., 7

The purpose of the current work was to estimate the dynamic degree of the effect of temperature and soil moisture on the intensity of carbon dioxide emission when using various tillage methods. There has been studied the effect of tillage methods on the temperature regime and soil moisture under spring wheat crops in 2023–2024. There has been found that soil temperature and moisture greatly depend on weather conditions and ranged from 6.8–20.7 °C to 12.0–36.1 %. There has been determined that, depending on humidity and temperature, CO₂ emission with moldboard plowing varied from 16.4 to 104.4 kg/ha per day from May to October, with subsoil plowing it ranged from 13.8 to 105.7 kg/ha and with no-till method its range was from 8.8 to 94.2 kg/ha in 2023. In 2024, CO₂ emission was larger and varied from 18.8 to 164.2 kg/ha with moldboard plowing, from 15.0 to 155.7 kg/ha with subsoil plowing, and from 12.0 to 142.5 with no-till method. The trial has established a high level of correlation between soil temperature and the rate of CO₂ emission ($r = 0.79–0.81$). There has been determined that a 1°C increase in soil temperature increases daily CO₂ emission by 9.44 kg/ha with moldboard plowing, by 9.59 kg/ha with subsoil plowing, and by 8.38 kg/ha with no-till method. There has been established a high level of correlation between soil moisture and emission ($r = 0.58–0.67$). There has been found out that a 1 % increase in soil moisture increases emission by 4.11 kg/ha with moldboard plowing and by 3.70 and 3.22 kg/ha with subsoil plowing and no-till method.

Keywords: emission, carbon dioxide, soil respiration, tillage, temperature, moisture.

Введение. Изменение климата, которое происходит в настоящее время, ставит определенные трудности перед обществом. На одном ряду с экологической проблемой стоит и про-

довольственная безопасность населения в связи со значительными изменениями в среднегодовые температуры воздуха и количества осадков, выпадающих в различных почвенно-климатических зонах (Андрейчик и Монгуш, 2013). Это приводит к тому, что традиционные зональные системы земледелия не дают возможность получать планируемый урожай сельскохозяйственных культур и требуют корректировки (Любимова, 2022). Изменение климата происходит по причине повышения концентрации парниковых газов в атмосфере, основным из них принято считать диоксид углерода (Заварзин и Кудеяров, 2006). Почву считают основным резервуаром углерода, в ней сосредоточено в несколько раз больше запасов углерода, чем в наземной биомассе и атмосфере (Chernova et al., 2021). В результате протекающих в почве биохимических процессов выделяется высокое количество углекислого газа. Однако органическая масса растительных остатков, поступающая в почву на целинных почвах под естественной травянистой растительностью, в большинстве случаев стабилизирует углеродный баланс почвы и обеспечивает динамическое равновесие (Eremin, 2016). Вовлечение почвы в сельскохозяйственное использование приводит к нарушению баланса углерода в связи с улучшением аэрации почвы, усилением биологической активности и в некоторых случаях – к снижению поступающего углерода с побочной продукцией растениеводства (Завьялова и др., 2023). Принятие ряда нормативных документов в рамках климатической доктрины в мире и частности в России направлено на снижения негативного воздействия парниковых газов на климат. Один из таких документов – это концепция «4 промилле», согласно которой необходимо повышать запасы углерода в обрабатываемых почвах мира ежегодно на 0,4 % от запасов. В настоящее время современные исследователи ставят под сомнение решение поставленной задачи в связи с отсутствием полных данных по скорости эмиссии и секвестрации углерода в агроэкосистемах (Иванов и Столбовой, 2019). По этой причине в мире массово идет изучение влияния элементов земледелия, способных депонировать углерод в окультуренных почвах. Основная обработка почвы является главным звеном в системе агротехнических мероприятий – отрасли растениеводства. Многие исследователи утверждают, что нулевая технология моделирует естественный процесс почвообразования и обеспечивает снижение эмиссии диоксида углерода в агроценозах (Сафин и др., 2021). Однако другие исследователи придерживаются противоположного мнения и рекомендуют использование отвальной обработки для поддержания углеродного баланса почвы (Еремина и др., 2017). Это связано с тем, что обработки оказывают противоположное влияние на эмиссию и секвестрацию углерода в зависимости от климатических условий, динамики температуры, влажности и типа почвы, а так-

же системы земледелия и вида возделываемых культур. В связи с этим проведение подобных исследований в различных климатических зонах является необходимым мероприятием для создания общемировой модели эмиссии и секвестрации углерода в агроэкосистемах. Целью нашего исследования стало определение степени влияния динамики температуры и влажности почвы на интенсивность продуцирования углекислого газа при использовании различных способов обработки почвы.

Материалы и методы исследований. Изучение эмиссии было проведено в посевах яровой пшеницы в 2023–2024 годах. Почвенный покров опытного участка представлен черноземом выщелоченным с типичными для Западной Сибири агрохимическими и физическими свойствами. Опыт был представлен тремя вариантами с различными способами обработки почвы: отвальный – вспашка (ПН-8-35), безотвальный – рыхление (ПЧН-2,3) на глубину 20–22 см и нулевой без обработки. Вспашку и рыхление проводили после уборки предшественника в сентябре. В мае бороновили (БЗСС-1,0) по физически спелой почве. Перед посевом культивировали почву (КПС-4) на вариантах с отвальной и безотвальной обработкой. В дальнейшем сеяли яровую пшеницу (СЗМ-5,4) и прикатывали катками. На варианте с нулевой обработкой проводили прямой посев без предварительной культивации (КПС-2,1). Совместно с посевом проводили внесение аммиачной селитры в дозе 70 кг/га в действующем веществе. В фазу кущения выполняли химическую обработку посевов от сорняков баковой смесью (Секатор Турбо + Пума Супер 100) в дозах, рекомендованных производителем. Уборку проводили в фазу полной спелости прямым комбайнированием. Опыт был заложен в 4-кратном повторении, размер опытных делянок составлял 100 м², учетных – 50 м². Измерение скорости эмиссии диоксида углерода проводили с начала мая по октябрь, пока среднесуточная температура воздуха устойчиво (3-е суток) не перешла через 0 °С, каждые 10–16 суток методом закрытых камер. В 2023 г. измерение концентрации углекислого газа производили инфракрасным газоанализатором AZ77535. Более подробно с системой агротехнических мероприятий в опыте можно ознакомиться в опубликованной работе (Демин и Миллер, 2024). В 2024 г. для измерения использовали систему PriEco PRI-8610, замеры выполняли в 3-кратном повторении. В период измерения эмиссии CO₂ определяли температуру почвы с помощью электронного почвенного термометра в слое 0–30 см. Также проводили определение влажности почвы в слое 0–30 см термостатно-весовым методом в 3-кратном повторении. Отбор почвенных образцов делали послойно через каждые 10 см. Статистическую обработку данных проводили в программе Microsoft Excel с использованием пакетной надстройки AgCstat.

Погода в периоды исследования отличалась от средних многолетних значений. 2023 г. характеризовался повышенной температурой воздуха на протяжении всей вегетации, где значения температуры были выше средних многолетних на 0,7–5,3 °С. Количество выпавших осадков при этом распределялось неравно-

мерно. В мае, июле и сентябре осадков выпало на 21–37 мм ниже нормы, в то время как в июне и августе отмечался избыток, который составлял 25–40 мм. Более подробно с погодными условиями 2023 г. можно ознакомиться в ранее опубликованной работе (Демин и Миллер, 2024) (рис. 1).

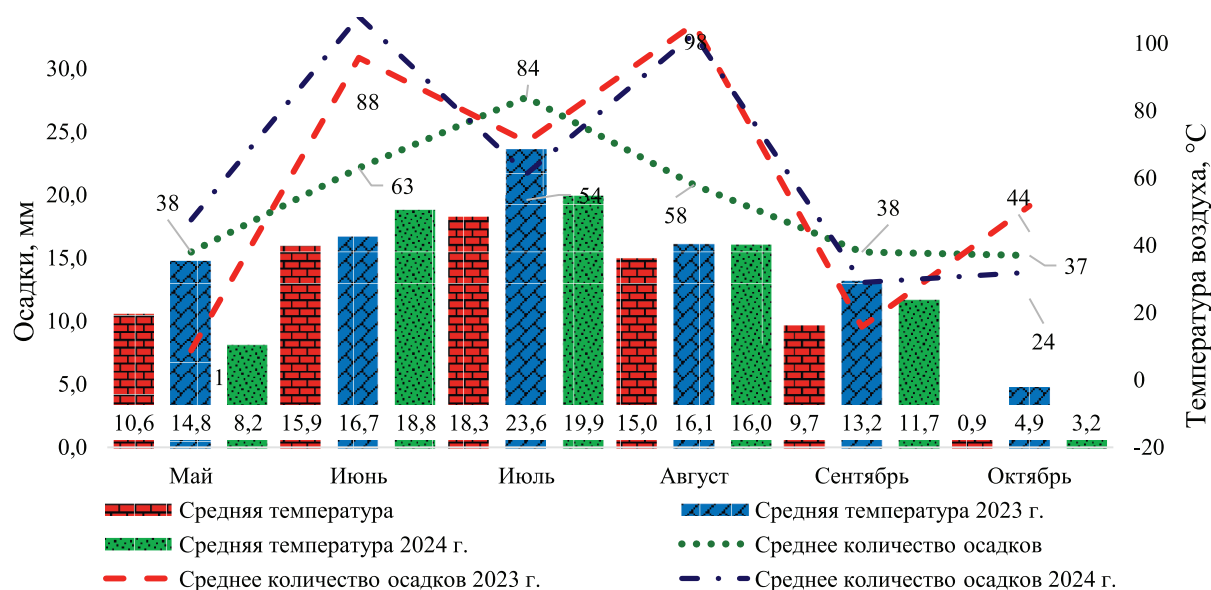


Рис. 1. Погодные условия периода исследований

Fig. 1. Weather conditions during the period of study

2024 г. также существенно отличался от нормативных показателей – температура воздуха в мае была на 2,4 °С ниже нормы, в то время как с июня по октябрь температура воздуха была на 1,1–2,8 °С выше средних многолетних значений. Атмосферные осадки распределялись тоже неравномерно. Май существенно не отличался от средних значений, тогда как в июне выпало на 37 мм выше среднемноголетних значений. В июле осадков было на 31 мм, а сентябре на 17 мм ниже средних значений.

Результаты и их обсуждение. В зависимости от погодных условий вегетационного периода температура почвы существенно отличалась, так в начале вегетации 2023 г. (май) почва прогревалась до температуры чуть выше 10 °С (рис. 2) и существенных различий по способам обработки почвы при этом не наблюдалось ($HCp_{05} = 0,2$ °С). С повышением температуры воздуха отмечалась тенденция к повышению температуры почвы до 20,2–20,7 °С ($HCp_{05} = 0,9$ °С).

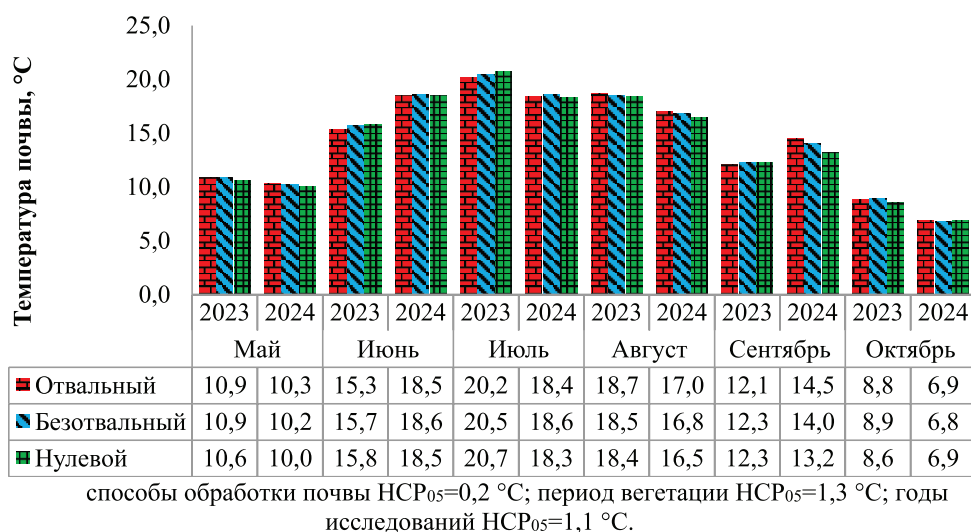


Рис. 2. Динамика температуры почвы (0–30 см)

в посевах яровой пшеницы при различных способах обработки почвы, °С

Fig. 2. Dynamics of soil temperature (0–30 cm) in spring wheat crops with various tillage methods, °С

При этом с мая по июль отмечалось, что температура под отвальным фоном была ниже, чем под безотвальным и нулевым на 0,3–0,5 °С. Это связано с тем, что при использовании отвальной обработки почвы улучшаются агрофизические и агрохимические свойства почвы, что приводит к более интенсивному набору листовой массы растениями. Более высокая биомасса при этом затеняет почву и снижает долю влияния солнечной радиации в формировании теплового режима. В дальнейшем температура почвы начинает опускаться к августу до 18,4–18,7 °С на всех изучаемых вариантах. Это происходит по причине того, что атмосферная температура интенсивно снижается, а активность солнечной радиации уменьшается. При этом отмечалась обратная закономерность – на отвальном фоне температура почвы была выше на 0,2–0,4 °С значений безотвального и нулевого. Это объясняется тем, что набранная большая биомасса яровой пшеницы создает определенный собственный микроклимат и снижает испарение с поверхности почвы, что приводит к более медленному ее остыванию. К началу осени влияние способа обработки почвы на температурный режим перестает отмечаться, и почва остывает практически до 12 °С. Это связано с тем, что растения пере-

шли в фазу созревания и листовая поверхность отмирает, а это приводит к раскрытию междурядья и к созданию общего микроклимата на всех изучаемых вариантах. К октябрю температура почвы опустилась до 8,8–8,9 °С на всех изучаемых вариантах.

В мае 2024 г. температура почвы достоверно не отличалась от температуры почвы 2023 года ($HCP_{05} = 1,1$ °С). Из-за особенностей погодных условий в июне почва прогрелась на 2,7–3,2 °С лучше, чем в прошлом году. В июле 2024 г. по сравнению с 2023 г. температура почвы была ниже на 1,8–2,4 °С по причине более низкой атмосферной температуры воздуха. В августе 2024 г. температура почвы была ниже на 1,7–1,9 °С в сравнении с прошлым годом. В сентябре температура почвы на отвальном фоне составляла 14,5 °С, на безотвальном и нулевом – 14,0 и 13,2 °С соответственно и была выше значений 2023 г. на 0,9–2,4 °С. К октябрю температура почвы опустилась до 6,8–6,9 °С на всех изучаемых вариантах.

Влажность почвы в течение вегетации существенно зависит от количества выпавших осадков. Влажность почвы в мае 2023 г. достигала 21,2–21,9 % при отвальном и безотвальном способе обработки почвы (рис. 3).

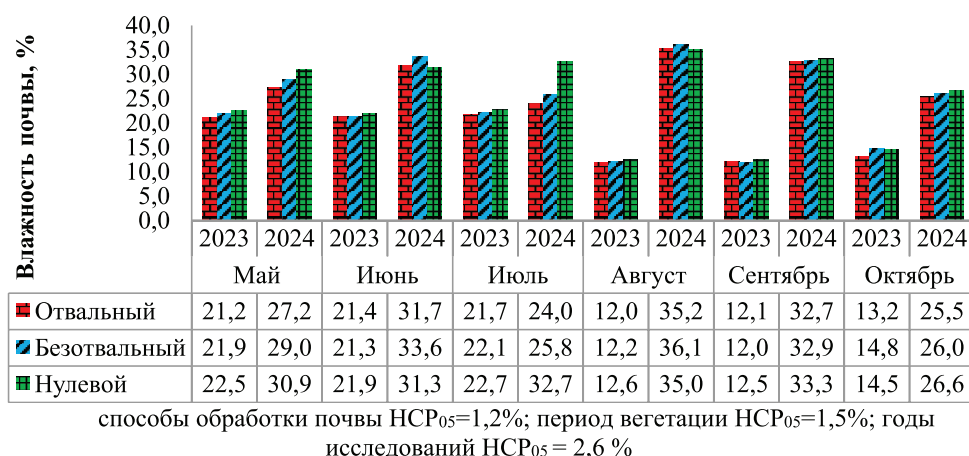


Рис. 3. Динамика влажности почвы (0–30 см) в посевах яровой пшеницы при различных способах обработки почвы, %
Fig. 3. Dynamics of soil moisture (0–30 cm) in spring wheat crops with various tillage methods, %

На варианте с нулевой обработкой влажность была выше на 1,3 % ($HCP_{05} = 1,2$ %). При этом достоверных отличий в изменении влажности почвы в июне и июле 2023 г. в сравнении с маем не наблюдалось, отклонения были в диапазоне неопределенности ($HCP_{05} = 1,5$ %). В данный период также не отмечалось достоверного влияния способов обработки почвы на ее влажность. В августе было отмечено существенное уменьшение влажности почвы, значения которой были на 45 % ниже, чем в июле. В сентябре не было отмечено изменения влажности почвы на всех изучаемых вариантах. В октябре на вариантах с безотвальной и нулевой обработкой отмечалось

увеличение влажности почвы на 23 и 16 % относительно прошлого месяца. Достоверное влияние способов обработки в 2023 г. на влажность почвы было отмечено лишь в октябре, где на варианте с безотвальной и нулевой обработкой влажность была на 12 и 10 % выше отвального варианта.

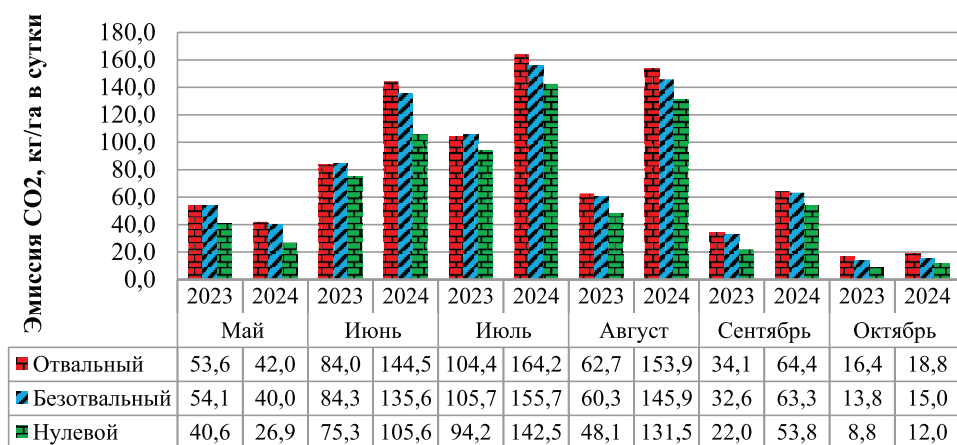
В 2024 г. влажность почвы значительно отличалась от значений, полученных в 2023 г., в связи с большим количеством осадков и более низкой температурой воздуха практически на протяжении всей вегетации. Влажность почвы в начале вегетации в 2024 г. была значительно выше (6,0–8,4 %), чем в прошлом периоде исследования ($HCP_{05} = 2,6\%$). Это связано

с тем, что в 2024 г. количество осадков, выпавших в холодный период года, было значительно выше, чем в 2023 г., что привело весной к большому насыщению почвы влагой. К влияющим на более высокую влажность факторам можно отнести также большее количество осадков, выпавших в мае 2024 года. Дополнительно на повышенную влажность почвы в 2024 г. могла влиять температура воздуха в мае, которая была ниже значений 2023 г. на 4,2 °С, что приводило к снижению испарения с поверхности почвы. При этом существенно отличалась влажность почвы на нулевом фоне, которая была выше, чем на отвальном, на 3,7 %. Это может быть связано с более низким испарением влаги на варианте с нулевой технологией из-за оставшегося на поверхности почвы мульчирующего слоя соломы. В июле на вариантах с отвальной и безотвальной обработкой влажность почвы опускалась на 7,7 и 7,8 % относительно прошлого месяца. На нулевом фоне значения не отличались от предыдущего месяца, но были выше, чем на варианте с отвальной обработкой, на 8,7 %. Это связано с более низким испарением влаги из почвы в результате того, что температура почвы ниже, чем на отвальном фоне, на 0,3 °С, а также из-за мульчирующего слоя соломы на поверхности почвы. В августе из-за обильных и равномерных осадков отмечалось повышение влажности почвы на 2,3–11,2 % относительно прошлого месяца. Меньше всего влажность повысилась на варианте с нулевой обработкой. Возможно, это свя-

зано с тем, что при длительном отказе от основной обработки почвы плотность сложения повышается, что затрудняет проникновение влаги и насыщение почвы водой. В сентябре отмечалось понижение влажности почвы на 1,7–3,2 % относительно прошлого месяца. При этом существенных отличий по способам обработки почвы не наблюдалось.

На интенсивность почвенного дыхания оказывают влияние разнообразные факторы, к которым относятся погодные условия, почвенно-климатическая зона, виды сельскохозяйственных угодий, агрофизические и агрохимические свойства почвы (Джаббаров и др., 2024). В 2023 г. в среднем за май эмиссия диоксида углерода составляла на отвальном фоне 53,6 кг/га в сутки (рис. 4), увеличиваясь относительно майских значений на 57 % к июню и на 95 % к июлю ($HCP_{05} = 11,7$ кг/га в сутки).

При использовании безотвального способа обработки почвы в мае CO_2 существенно не отличалась от отвального фона ($HCP_{05} = 5,8$ кг/га в сутки). В июле наблюдалась динамика по повышению скорости эмиссии CO_2 , которая возросла на 56 % относительно исходных значений. По сравнению с отвальным фоном достоверного отличия в этот временной интервал не отмечалось. К наиболее теплому месяцу – июлю происходило возрастание скорости продуцирования CO_2 , которая повышалась на 25 % относительно значений прошлого месяца, при этом не отмечалось существенных изменений между отвальным и безотвальным фоном.



способы обработки почвы $HCP_{05}=5,8$ кг/га в сутки; период вегетации $HCP_{05}=11,7$ кг/га в сутки; годы исследований $HCP_{05}=15,4$ кг/га в сутки.

Рис. 4. Динамика эмиссии диоксида углерода в посевах яровой пшеницы при различных способах обработки почвы, кг CO_2 /га в сутки
Fig. 4. Dynamics of carbon dioxide emission in spring wheat crops with various tillage methods, kg CO_2 /ha per day

На варианте, где основная обработка почвы не предусматривалась, скорость эмиссии диоксида углерода так же, как и на других вариантах, повышалась в июне и июле на 86 и 160 % соответственно относительно значений, полученных в мае. При этом в мае дыхание почвы составляло 40,6 кг/га в сутки, что было

на 13,0 кг/га в сутки ниже значений, полученных на отвальном варианте в тот же промежуток времени. В июне и июле скорость эмиссии CO_2 была на нулевом варианте тоже меньше на 10 и 11 %, чем на вариантах с отвальной и безотвальной обработкой. С августа на всех изучаемых вариантах происходило снижение

скорости эмиссии углекислого газа. На отвальном фоне дыхание почвы к августу снизилось на 40 % относительно предыдущих значений и продолжало опускаться на 67 % к сентябрю и на 77 % к октябрю относительно максимально отмеченных значений. На безотвальном варианте снижение скорости эмиссии CO_2 имело подобную отвальному фону тенденцию. На варианте с нулевой обработкой почвы уменьшение скорости продуцирования CO_2 составляло до 49 % к августу относительно значений июля, к сентябрю и октябрю эмиссия уменьшилась на 77 и 91 % относительно максимально отмеченных значений. При этом дыхание почвы с августа по октябрь было ниже на 23–46 %, чем на отвальном фоне, и наметилась тенденция к более резкому сокращению к октябрю.

В 2024 г. скорость эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы существенно отличалась от предыдущего года исследований. Это связано с особенностью погодных условий, гидротермическим коэффициентом, температурой и влажностью почвы, которые в существенной мере были различными. В мае эмиссия углекислого газа была ниже на 11,6–14,1 кг/га в сутки значений, полученных в 2023 г., однако отклонения находились в диапазоне неопределенности ($\text{НСР}_{05} = 15,4$ кг/га в сутки). Достоверные отличия по вариантам были получены лишь на нулевом фоне, где они были ниже значений отвального фона на 36 %. В дальнейшем наблюдалась тенденция, как и в 2023 г., к повышению скорости эмиссии CO_2 до июля в связи с повышением температуры почвы. В июне отмечалось существенное возрастание скорости продуцирования CO_2 на всех вариантах относительно мая. На отвальном фоне дыхание почвы возросло на 102,5 кг/га в сутки, на безотвальном и нулевом – на 95,6 и 78,7 кг/га в сутки соответственно. Стоит отметить, что относительно периода прошлого года скорость эмиссии была выше на 40–72 %. Также отмечены различия по всем исследуемым вариантам: на безотвальном и нулевом фоне значения эмиссии были ниже отвального на 6 и 27 % соответственно. В июле скорость продуцирования углекислого газа повышалась относительно предыдущего месяца на 14 % при использовании отвальной обработки, на 15 % – при безотвальной и на 35 % – при нулевой. Относительно 2023 г. скорость эмиссии была выше на 57 % на отвальном, на 47 и 51 на безотвальном и нулевом варианте. При этом между вариантами отмечалась тенденция к повышению дыхания почвы по схеме нулевой < безотвальный < отвальный. Эмиссия CO_2 , полученная в августе, существенно не изменилась относительно июля, отклонения находились в диапазоне ошибки исследования, однако была практически в 2,5 раза выше значений 2023 года. К сентябрю интенсивность почвенного дыхания сокращалась более чем в половину от значений августа на всех

изучаемых вариантах: на отвальном и безотвальном варианте до 64,4–63,3 кг/га в сутки, на нулевом – до 53,8 кг/га. К октябрю значения эмиссии опускались до 12,0–18,8 кг/га в сутки и не отличались как от значений 2023 г., так и по вариантам.

Отсутствие достоверного различия в скорости эмиссии диоксида углерода в течение вегетации между отвальным и безотвальным вариантами может быть связано с тем, что глубокое рыхление обеспечивает разрыхление обрабатываемого слоя, что повышает аэрацию почвы до одного уровня отвального фона. Часть растительных остатков в результате проведения обработок на отвальном и безотвальном варианте попадает в обрабатываемый горизонт почвы. Взаимосвязь этих двух причин способствует высокой биологической активности на глубине всего обрабатываемого слоя почвы. Это приводит к тому, что биохимические процессы с выделением CO_2 протекают в большем слое почвы, чем на нулевом варианте, где основная масса побочных продуктов остается на поверхности почвы и основная часть почвенной микробиоты сосредоточена в верхнем горизонте почвы, наиболее богатом органическим веществом. К причинам, заслуживающим внимания, можно отнести также и то, что мульчирующий слой соломы на варианте с нулевой технологией приводит к более долгому прогреву почвы, что тоже снижает активность почвенной биоты и скорость протекающих биохимических процессов.

К одним из основных факторов, влияющих на интенсивность почвенного дыхания, можно отнести температуру и влажность почвы, которые оказывают существенное влияние на активность микробиоты и трансформацию органического вещества почвы. Это и объясняет существенные отличия в скорости эмиссии в зависимости от года исследований (Белоусова и Белоусов, 2024). Проведя расчеты, был отмечен высокий уровень зависимости температуры почвы и эмиссии диоксида углерода в среднем за 2023–2024 гг. на всех изучаемых вариантах ($r = 0,79–0,83$) (табл.). Уравнения, которые удалось разработать для различных способов обработки почвы, имеют высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,63–0,66$) и показывают на то, что скорость эмиссии CO_2 при увеличении температуры почвы на единицу градуса повышается по схеме нулевой < отвальный < безотвальный на 9,59, 9,44 и 8,38 кг/га соответственно.

В исследовании было также установлено, что влажность почвы оказывает влияние на скорость эмиссии углекислого газа в сутки, корреляция варьировала по вариантам в диапазоне ($r = 0,58–0,67$). Выявлено, что повышение влажности почвы на 1% увеличивает дыхание почвы по схеме нулевой < безотвальный < отвальный на 3,22 ($R^2 = 0,33$), 3,70 ($R^2 = 0,43$) и 4,11 ($R^2 = 0,45$) кг/га соответственно.

**Корреляционная и регрессионная связь между температурой, влажностью почвы
и эмиссией диоксида углерода при различных способах обработки почвы**
**Correlation and regression between temperature, soil moisture
and carbon dioxide emission with various tillage methods**

Обработка	Температура/ влажность	r	R ²	Уравнение регрессии
Отвальный	Температура	0,81	0,66	$y = 9,4382x - 58,8$
Отвальный	Влажность	0,67	0,45	$y = 4,114x - 20,0$
Безотвальный	Температура	0,83	0,64	$y = 9,5886x - 65,5$
Безотвальный	Влажность	0,66	0,43	$y = 3,7015x - 16,3$
Нулевой	Температура	0,79	0,63	$y = 8,3785x - 55,7$
Нулевой	Влажность	0,58	0,33	$y = 3,2181x - 16,1$

Выводы.

1. Динамика температуры и влажности почвы в посевах яровой пшеницы в большей мере зависит от погодных условий, нежели от способа обработки почвы. Температура на отвальном фоне с мая по октябрь варьировала от 6,9 до 20,2 °С, на варианте с безотвальной обработкой – в диапазоне 6,8–20,5 °С и нулевой – 6,8–20,7 °С. Влажность почвы за вегетацию варьировала в 2023 г. от 12,0 до 21,7 % на отвальном фоне, от 12,0 до 22,1 % – на безотвальном и от 12,5 до 22,7 % – на нулевом. В 2024 г. средняя влажность почвы за вегетацию была выше и находилась в диапазоне от 24,0–35,2 % на отвальном варианте, 25,8–36,1% – на безотвальном, 26,6–35,0 % – на нулевом.

2. Эмиссия CO₂ в течение вегетации варьировала в широком диапазоне в зависимости от температуры и влажности почвы. На отвальном варианте с мая по июль скорость продуцирования диоксида углерода на отвальном фоне составляла от 42,0 до 164,2 кг/га в сутки. С августа скорость эмиссии начинала опускаться к октябрю с 62,7–153,9 до 16,4–18,8 кг/га в сутки. На безотвальном варианте в 2023 г. продуци-

рование CO₂ существенно не отличалась от отвального варианта, тогда как в 2024 г. с июня по август значения были ниже на 5,2–6,4% относительно отвального варианта. На нулевом варианте скорость эмиссии за годы исследований варьировала от 8,8 до 142,5 кг/га в сутки и была ниже на 9,8–46,3 % значений отвального фона. При этом в 2024 г. с июня по сентябрь дыхание почвы на всех изучаемых вариантах было выше, чем в 2023 г., на 40–173 %.

3. В исследовании была установлена взаимосвязь между температурой почвы и скоростью эмиссии CO₂ в течение вегетации ($r = 0,79–0,81$). Установлено, что прогрев почвы на 1 °С увеличивает поток CO₂ по схеме нулевой < безотвальный < отвальный вариант на 9,59, 9,44 и 8,38 кг/га в сутки соответственно. Влажность почвы также влияет на дыхание почвы по схеме нулевой < безотвальный < отвальный на 3,22, 3,70 и 4,11 кг/га в сутки при повышении влажности на 1 %.

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

Библиографический список

1. Андрейчик М. Ф., Монгуш Л. Д. Н. Изменение атмосферных осадков и гидротермического коэффициента на фоне потепления климата в Хемчикской котловине Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2013. № 6(81). С. 141–144.
2. Белоусова Е. Н., Белоусов А. А. Трансформация органических соединений углерода и азота агрочерноземов при применении безотвальных технологий обработки в Красноярской лесостепи // Агрохимия. 2024. № 5. С. 3–12. DOI: 10.31857/S0002188124050019
3. Завьялова Н. Е., Васбиева М. Т., Ямалтдинова В. Р., Казакова И. В. Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой // Агрохимия. 2023. № 6. С. 47–56. DOI: 10.31857/S0002188123060121
4. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние различных способов обработки и температуры почвы на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Земледелие. 2024. № 4. С. 13–18. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18
5. Джаббаров Н. И., Мишанов А. П., Захаров А. М., Добринов А. В. Методика оценки уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 3. С. 75–81. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81
6. Еремина Д. В., Фисун Н. В., Ахтямова А. А. Оптимизационная модель гумусообразования пахотных черноземов за счет использования соломы зерновых культур // Агропродовольственная политика России. 2017. № 6(66). С. 15–19.
7. Заварзин Г. А., Кудеяров В. Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник Российской академии наук. 2006. Т. 76, № 1. С. 14–24.
8. Иванов А. Л., Столбовой В. С. Инициатива «4 промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185–202. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98-185-202
9. Любимова, И. Н. Возможные изменения почв сухостепной зоны в связи с глобальным изменением климата // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1301–1309. DOI: 10.31857/S0032180X22100112

10. 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

11. Eremin D. I. Changes in the content and quality of humus in leached chernozems of the Trans-Ural forest-steppe zone under the impact of their agricultural use // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49, № 5. P. 538–545. DOI: 10.1134/S1064229316050033

12. Chernova O. V., Golozubov O. M., Alyabina I. O., Schepaschenko D. G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54(3). P. 325–336. DOI: 10.1134/S1064229321030042

References

1. Andreichik M. F., Mongush L. D. N. Izmenenie atmosferykh osadkov i gidrotermicheskogo koeffitsienta na fone potepeniya klimata v Khemchikskoi kotlovine Respubliki Tyva [Changes in atmospheric precipitation and hydrothermal coefficient caused by climate warming in the Khemchik Basin of the Republic of Tyva] // Vestnik KrasGAU. 2013. № 6(81). S. 141–144.

2. Belousova E. N., Belousov A. A. Transformatsiya organicheskikh soedinenii ugleroda i azota agrochernozemov pri primenении bezotval'nykh tekhnologii obrabotki v Krasnoyarskoi lesostepi [Transformation of organic compounds of carbon and nitrogen of agrochernozems when using subsoil tillage of the Krasnoyarsk forest-steppe] // Agrokhimiya. 2024. № 5. S. 3–12. DOI: 10.31857/S0002188124050019

3. Zav'yalova N. E., Vasbieva M. T., Yamaltdinova V. R., Kazakova I. V. Akkumulyatsiya atmosfernogo ugleroda kul'turami sevooborota i vliyaniye sistem udobreniya na nakopleniye organicheskogo ugleroda pakhotnoi dervno-podzolistoi pochvoi [Atmospheric carbon accumulation by the crops in crop rotation and the effect of fertilization systems on organic carbon accumulation by arable sod-podzolic soil] // Agrokhimiya. 2023. № 6. S. 47–56. DOI: 10.31857/S0002188123060121

4. Demin E. A., Miller S. S. Vliyaniye razlichnykh sposobov obrabotki i temperatury pochvy na emissiyu uglekislogo gaza v posevakh yarovoi pshenitsy v usloviyakh lesostepnoi zony Zaural'ya [The effect of various tillage methods and soil temperature on carbon dioxide emissions in spring wheat crops in the forest-steppe area of the Trans-Urals] // Zemledelie. 2024. № 4. S. 13–18. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18

5. Dzhabborov N. I., Mishanov A. P., Zakharov A. M., Dobrinov A. V. Metodika otsenki urovnya vybrosov parnikovyykh gazov pri vozdeystvovanii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Methodology for estimating the level of greenhouse gas emissions during crop cultivation] // Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2024. T. 18, № 3. S. 75–81. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81

6. Eremina D. V., Fisunov N. V., Akhtyamova A. A. Optimizatsionnaya model' gumusoobrazovaniya pakhotnykh chernozemov za schet ispol'zovaniya solomy zernovykh kul'tur [Optimization model of humus formation in arable chernozems using grain crop straw] // Agroprodovol'stvennaya politika Rossii. 2017. № 6(66). S. 15–19.

7. Zavarzin G. A., Kudeyarov V. N. Pochva kak glavnyi istochnik uglekislotoy i rezervuar organicheskogo ugleroda na territorii Rossii [Soil as a main source of carbon dioxide and a reservoir of organic carbon in Russia] // Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2006. T. 76, № 1. S. 14–24.

8. Ivanov A. L., Stolbovoi V. S. Initsiativa "4 promille" – novyi global'nyi vyzov dlya pochv Rossii [The '4 per mille' initiative is a new global challenge for Russian soils] // Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva. 2019. № 98. S. 185–202. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98-185-202

9. Lyubimova, I. N. Vozmozhnye izmeneniya pochv sukhosopnoi zony v svyazi s global'nym izmeneniyem klimata [Possible changes in dry-steppe soils due to global climate change] // Pochvovedenie. 2022. № 10. S. 1301–1309. DOI: 10.31857/S0032180X22100112

10. Safin R. I., Valiev A. R., Kolesar V. A. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya uglerodnogo zemledeliya v Respublike Tatarstan [Current state and prospects for the development of carbon farming in the Republic of Tatarstan] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. T. 16, № 3(63). S. 7–13. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-7-13

11. Eremin D. I. Changes in the content and quality of humus in leached chernozems of the Trans-Ural forest-steppe zone under the impact of their agricultural use // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49, № 5. P. 538–545. DOI: 10.1134/S1064229316050033

12. Chernova O. V., Golozubov O. M., Alyabina I. O., Schepaschenko D. G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54(3). P. 325–336. DOI: 10.1134/S1064229321030042

Поступила: 27.12.24; доработана после рецензирования: 28.01.25; принята к публикации: 28.01.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Дёмин Е. А. – постановка цели и задач, формирование методологии исследования и концепции статьи, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Миллер С. С. – подготовка опыта, сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.