

УДК 631.417.1:631.631.51:631.445.41(470.40/.43)

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПРИ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ЧЕРНОЗЕМА В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ¹

© 2023 г. Л. В. Орлова^{1,*}, Н. М. Троц², В. И. Платонов³, Е. В. Балашов⁴, С. В. Сушко⁴, И. Н. Колесниченко³, С. В. Орлов⁵, Е. В. Круглов⁶

¹ Национальное движение сберегающего земледелия
443099 Самара, ул. Куйбышева, 88, Россия

² Самарский государственный аграрный университет
446442 Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, д. 2, Россия

³ Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086 Самара ул. Московское шоссе, 34, Россия

⁴ Агрофизический институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

⁵ ООО «Орловка-Агро-Инновационный Центр»
446472 Самарская обл., Похвистневский р-н, с. Старый Аманак, ул. Центральная, 42 Е, Россия

⁶ Самарский государственный медицинский университет Минздрава РФ
443079 Самара, ул. Гагарина, 20, Россия

*E-mail: orlova.rmrl@gmail.com

Поступила в редакцию 18.09.2022 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Переход от общепринятой технологии обработки почв к технологии нулевой обработки способствует увеличению секвестрации углерода ($C_{\text{орг}}$) в форме углекислого газа (CO_2) из атмосферы в почву и, как следствие, снижению неблагоприятных воздействий парникового эффекта на экологическое состояние окружающей среды. Эффективность применения нулевой обработки почв в большей или меньшей степени обусловлена конкретными агроклиматическими условиями, системами севооборотов, удобрения и защиты растений, качеством и устойчивостью почв. Исследовали влияние нулевой обработки почвы на динамику запасов $C_{\text{орг}}$ и эмиссию парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в агроклиматических условиях растениеводческого хозяйства (ООО «Орловка АИЦ», Самарская обл.). Исследование провели на агрочерноземе тяжелосуглинистом в сентябре–ноябре 2021 г. в условиях аномально засушливого вегетационного периода и высоких летних температур. На участках с нулевой обработкой почвы поступило с растительными остатками: 268–1721 кг С/га, 3–66 кг N, 0.2–7.7 кг P и 12–44 кг K/га. На основе полученных результатов предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию эффективности технологии нулевой обработки почвы благодаря, во-первых, уменьшению ее неблагоприятного влияния на плотность сложения почвы, и, во-вторых, учету влияния подстилающих материнских пород и рельефа на водную эрозию почвы и перераспределение гранулометрических фракций почвы в агроландшафте, что позволит применять эту технологию согласно принципам адаптивно-ландшафтного земледелия.

Ключевые слова: природоохранное ресурсосберегающее земледелие, нулевая и общепринятая обработка почвы, свойства почвы, секвестрация углерода, эмиссия парниковых газов.

DOI: 10.31857/S0002188123070086, **EDN:** OFWSES

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях изменяющегося климата сохранение оптимальных запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почвах является сложной задачей в связи с увеличением частоты рисков

возникновения неблагоприятных погодных явлений (засухи, пыльных бурь, ливней) и поэтому с проблемой выбора рациональных систем земледелия. При благоприятных агроклиматических условиях длительно применяемые, почвозащитные системы земледелия характеризуются устойчивыми запасами $C_{\text{орг}}$ в почвах. Однако при переходе от одной системы земледелия к другой или

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке АО «ОХК «УРАЛХИМ».

при изменении способа сельскохозяйственного использования земель секвестрация $C_{\text{орг}}$ в почвах может существенно изменяться. За последние 2 столетия глобальные потери $C_{\text{орг}}$ из почв составили ~8% только в результате переустройства земель и неэффективных методов землепользования [1]. Подобное уменьшение запасов $C_{\text{орг}}$ в почвах приводит к снижению их качества и устойчивости к естественным и антропогенным воздействиям. Кроме того, более интенсивная обработка почвы приводит к увеличению выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу, что может способствовать усилению парникового эффекта и глобального потенциала потепления климата [2–4]. В связи с этим необходимы дальнейшее совершенствование применяемых и разработка новых систем земледелия и обработки почв, способствующих снижению выбросов парниковых газов и повышению запасов $C_{\text{орг}}$ в почвах посредством управления секвестрацией углерода из атмосферы в почвы [5–10].

В настоящее время в мире все шире распространяются технологии природоохранного ресурсосберегающего земледелия (ПРЗ), которые включают минимальную или нулевую обработку почв и расширенное применение биологических методов, способствующих секвестрации и депонированию $C_{\text{орг}}$ в почвах. Согласно расчетам, глобальный потенциал секвестрации $C_{\text{орг}}$ в почвах может достигнуть 0.9 ± 0.3 Гт С/га/год [11]. Однако этот потенциал во многом обусловлен климатическими условиями, системами земледелия, генезисом почв и их физическим, физико-химическим и микробиологическим состоянием.

Длительное применение общепринятой вспашки с полным оборотом пласта может привести к эрозионным потерям илистой фракции почв и гумуса, и, как следствие, к ухудшению физического состояния почв [11–15]. Переход от общепринятой к нулевой (**no-till**) обработке рассматривается как один из рациональных и эффективных способов повышения секвестрации и запасов $C_{\text{орг}}$ в почвах, сохранения илистой фракции почв и улучшения их физического и биологического состояния [16–22].

Благоприятное влияние нулевой обработки на содержание органического вещества проявляется в секвестрации и закреплении углерода в почвах [10, 23–26]. Результаты ряда исследований показали, что после длительного применения (от 5-ти до 23-х лет) нулевой обработки секвестрация органического углерода в слое 0–60 см почвы варьировала от 20.3 до 22.8 т/га [27]. В ряде работ подтверждено благоприятное влияние нулевой обработки почвы на изменение содержания ее органического вещества для разных подтипов

черноземов в таких регионах как Ростовская, Курская и Курганская обл., Ставропольский и Красноярский край [28–33]. Причем эти исследования выполнены как в условиях полевых модельных экспериментов, так и на производственных полях агрохозяйств, которые успешно реализуют данную ресурсосберегающую технологию на протяжении 4–12 лет.

Однако применение нулевой обработки почв может, особенно на первых этапах ее использования, приводить к повышению плотности сложения почв, уменьшению объема пор аэрации и к формированию анаэробных условий, которые будут способствовать увеличению интенсивности формирования и эмиссии закиси азота (N_2O) вследствие усиления микробиологического процесса денитрификации [34–40].

К настоящему времени выявлено множество благоприятных изменений свойств почв после применения нулевой обработки, проявляющихся не только в вышеупомянутом повышении содержания $C_{\text{орг}}$, но и в улучшении агрегатного состояния почв [25, 33], увеличении ферментативной активности, группового и функционального разнообразия почвенных микроорганизмов и мезофауны [29–31].

Большинство исследований влияния нулевой обработки почв на эмиссию парниковых газов посвящено секвестрации атмосферного углерода в почвы. Поэтому не выработан консенсус о совместном балансе основных экологических функций почв [41], характеризующих круговорот углерода и азота в системе: почва–растения–атмосфера при разных системах обработки, включая нулевую обработку почв. В целом устойчивый баланс этих экологических функций почв характеризует высокое качество почв. Под качеством почв понимают [42]: способность почвы функционировать в пределах границ естественной и управляемой экосистемы; поддерживать устойчивую продуктивность растений и животных; поддерживать или улучшать качество воды и воздуха; обеспечивать здоровье людей. Эффективность применения нулевой обработки почв необходимо оценивать не только по объемам выбросов CO_2 , но и на основе результатов исследований интенсивности и объемов выбросов других парниковых газов – N_2O и метана (CH_4).

Результаты недавних исследований показали, что нулевая обработка почв способствовала достоверному повышению эмиссии N_2O из них вследствие усиления активности почвенных микроорганизмов, участвующих в микробиологическом процессе денитрификации [43, 44]. Нулевая обработка почвы, как правило, способствует накоплению большего содержания влаги, чем об-

щепринятая [45]. С одной стороны, содержание почвенной влаги и доступного органического вещества, плотность сложения почвы и температура при нулевой обработке являются факторами увеличения потенциала образования N_2O и CH_4 . С другой стороны, нулевая обработка почвы способствует повышению объемов макропор, непрерывности порового пространства и уменьшению величины рН. Уменьшение рН приводит к снижению интенсивности образования CH_4 , в то время как повышение рН вызывает ее увеличение. Повышенные эмиссии N_2O из почв могут быть обусловлены высокой чувствительностью редуценты N_2O к уменьшению показателя рН [46]. Поэтому рациональное применение нулевой обработки почв с целью уменьшения выбросов N_2O и CH_4 требует контроля не только физических и водно-физических, но и физико-химических свойств почв.

В целом анализ эффективности адаптации нулевой обработки должен включать результаты исследований изменений метеорологических параметров (количества и частоты осадков, температуры воздуха), физических, водно-физических, физико-химических свойств в конкретных условиях выращивания сельскохозяйственных культур.

Несмотря на перечисленные преимущества нулевой обработки почв в улучшении и сохранении их почвенного плодородия, ее адаптация и распространение в нашей стране происходят медленно. Тем не менее, по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных наций (ФАО), за последние 10 лет количество территорий с нулевой обработкой увеличилось с 1.7 млн га (2009 г.) до 200 млн га в (2019 г.), т.е. ~16% пахотных площадей в мире, которые составляют 1.3 млрд га. В 2020 г. в Китае была принята программа по сохранению почв. В Европе, которая лидирует в мировой климатической повестке, отмечен экспоненциальный рост сельскохозяйственных площадей, на которых применяют нулевую обработку почв. Для более быстрой и эффективной адаптации систем нулевой обработки почв важно объединение знаний и усилий как сельхозпроизводителей, так и научного сообщества, для построения национальной системы мониторинга и учета запасов углерода в почвах и выбросов парниковых газов в Российской Федерации [47]. В связи с этим особенно актуальны и значимы исследования, выполненные в реальных агрохозяйствах, практикующих и совершенствующих данную ресурсосберегающую технологию. Цель работы – оценка влияния нулевой обработки почвы на динамику запасов $C_{орг}$ и эмиссию парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в условиях растениеводческого хозяйства (ООО “Орловка АИЦ”, Самарская обл.).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнили на территории растениеводческого хозяйства ООО “Орловка АИЦ” Самарской обл. Основная территория хозяйства расположена на плоских и слабоволнистых плакорах с доминированием типичных и выщелоченных черноземов, сформированных на бурых глинах и глинистом мергеле. В хозяйстве реализуется 5-польный севооборот, включающий сою, пшеницу, подсолнечник, сорго и ячмень. В качестве контроля был выбран чернозем типичный тяжелосуглинистый широколиственного леса возрастом ≤ 60 лет.

Отбор образцов почвы для определения плотности сложения (слои 0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см) и содержания углерода (слои 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 и 100 см) провели в сентябре 2021 г. По 2 почвенных разреза заложили на участках с нулевой обработкой почвы (применение с 2014 и 2017 г.) и на участке с традиционной обработкой почвы, а также один разрез – в лесу. Характеристики объекта исследования представлены в табл. 1. Для каждого экспериментального участка выбрали 4 пространственно-удаленные местоположения, в которых проводили отбор образцов воздуха для определения эмиссии парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) из почвы. Эмиссию парниковых газов из почвы определяли методом закрытых камер [50] с использованием портативного газового хроматографа “ПИА” (Россия) для анализа концентрации CO_2 и CH_4 . Для анализа концентрации N_2O использовали хроматограф “Agilent 7890 A” с масс-селективным детектором 5975С (США). Скорость эмиссии парниковых газов рассчитывали по величине прироста их концентрации внутри камеры (объем 6.8 л) за фиксированный период времени: 3–5 мин для CO_2 и 40 мин для N_2O и CH_4 . Одновременно регистрировали температуру почвы на глубине 10 см и отбирали почвенные образцы из слоя 0–10 см для определения содержания влаги и минерального азота в аммонийной и нитратной форме. Важно отметить, что вегетационный период 2021 г. был очень засушливым: количество осадков составило всего 91 мм.

Для определения содержания общего и органического углерода ($C_{общ}$ и $C_{орг}$) в почве использовали методы “мокрого” ($C_{орг}$) и “сухого” ($C_{общ}$) сжигания, рекомендованные ФАО [48, 49]. Анализ $C_{общ}$ выполняли с использованием автоматического CHNS анализатора “Vario EL III” (Германия). Плотность сложения почвы, образцы которой отбирали с помощью метода “режущих” цилиндров объемом 88 см³, рассчитали как отношение массы сухой почвы (естественное сложение)

Таблица 1. Общая характеристика объектов исследования

Система обработки почвы	Почвенная разновидность	Вид угодья /культура или доминантная растительность	Климатические характеристики
Традиционная с оборотом пласта	Чернозем выщелоченный среднегумусный мало-мощный легкоглинистый	Пашня/подсолнечник	Климат умеренно-континентальный. Средняя годовая температура воздуха 5.7°C. Годовое количество осадков 527 мм. Максимум осадков – июнь–июль. Характерны частые засухи. Вегетационный сезон 2021 г. засушливый, выпало всего 91 мм осадков: апрель –21 мм, май – 20 мм, июнь – 38 мм, июль – 12 мм, август – 0 мм
Нулевая с 2017 г. (4 года) (поле G-70)		Пашня/подсолнечник	
Нулевая с 2014 г. (7 лет) (поле G-128b)	Чернозем типичный карбонатный перерытый среднегумусный мало-мощный среднесмытый легкоглинистый	Пашня/пшеница	
Без обработки (лес широколиственный возрастом ≥60 лет)	Чернозем оподзоленный среднегумусный средне-мощный среднеглинистый	Лес/липа (<i>Tilia sp.L.</i>), Лес/дуб (<i>Quercus sp. L.</i>)	

ние) к ее объему в цилиндре. Определение содержания в почве аммонийного ($N-NH_4$) и нитратного ($N-NO_3$) азота выполняли по ГОСТ 26488-85 с использованием спектрофотометра “UNICO” (США). В образцах растений содержание углерода и азота определяли методом сухого сжигания (CHNS-анализатор “Vario EL III”, Германия), фосфора – фотометрическим методом (спектрофотометр ПЭ-3000УФ, Китай) и калия – пламенно-фотометрическим методом (пламенный фотометр ПАЖ-2, Украина).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание почвенного углерода. Анализ данных содержания $C_{орг}$ в почве показал, что длительное сельскохозяйственное использование агрочернозема приводило к значительным потерям этого элемента в основном из верхнего слоя 0–10 см (рис. 1). Установлено 2-кратное различие в содержании $C_{орг}$ в этом слое почвы между агрочерноземами в агроценозах (традиционная и нулевая обработки) и в лесу (4.4 против 9.0%). Применение технологии нулевой обработки почвы в течение 4-х лет (с 2017 г.) способствовало незначительному повышению содержания $C_{орг}$ в пахотном горизонте по сравнению с традиционной отвальной вспашкой от 4.1 до 5.1%. Для варианта более длительного использования данной ресурсосберегающей технологии (с 2014 г.) подобной тенденции не обнаружено, вероятно, из-за его расположе-

ния в транзитной зоне склона с характерным смывом верхнего слоя почвы в результате эрозии. Поэтому эффективность применения нулевой обработки почвы на склоновых участках следует оценивать на основе результатов анализа образцов, отобранных в аналогичных условиях рельефа, что будет одной из задач дальнейших исследований.

Закономерности изменений содержания $C_{общ}$ и $C_{орг}$ в почве как вниз по профилю, так и между почвами с 2-мя изученными технологиями обработки были аналогичными. Однако на глубине почвенного профиля (40–50 и 100 см) содержание $C_{общ}$ было больше, чем содержание $C_{орг}$. Это объясняется присутствием в почвообразующих породах (глинистые мергели, бурые глины) исследованных агрочерноземов минеральных форм углерода в виде примесей карбонатов. Исходя из данных о содержании $C_{орг}$ в почве, а также плотности ее сложения, были рассчитаны его запасы в слоях агрочернозема: 0–10, 0–30 и 0–100 см (рис. 2). При переходе от традиционной к нулевой обработке почвы произошло увеличение запасов $C_{орг}$ в верхнем слое 0–10 см агрочернозема. Эти данные совпадали с результатами исследований других ученых [26]. Более высокие запасы $C_{орг}$ в верхнем слое почвы при ее нулевой обработке, возможно, обусловлены более слабыми взаимодействиями между растительными остатками и минеральной фазой почвы, которые вызывают меньшую интенсивность минерализации $C_{орг}$. Однако для бо-

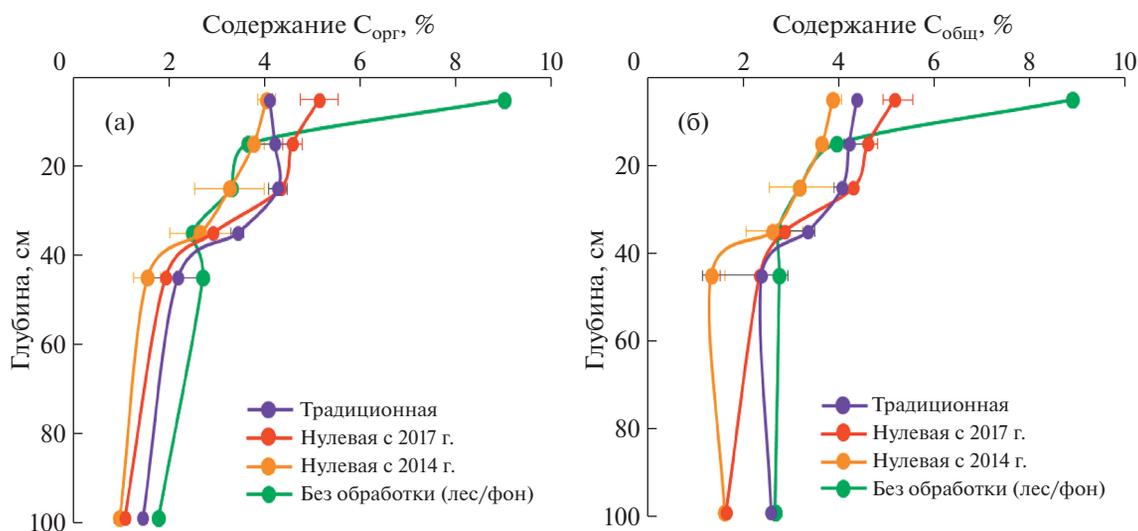


Рис. 1. Распределение содержания органического $C_{орг}$ (а) и общего углерода $C_{общ}$ (б) в профиле почвы при разных технологиях обработки.

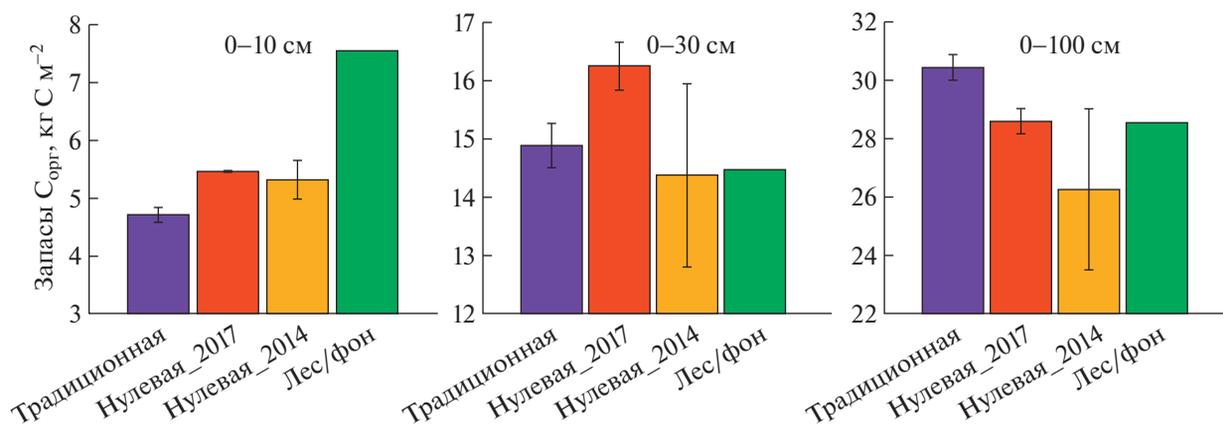


Рис. 2. Запасы органического углерода ($C_{орг}$, кг С/м²) в агрочерноземе с разной технологией обработки почвы.

лее мощного слоя 0–30 см почвы такая тенденция сохранялась только в одном из 2-х изученных вариантов – нулевая обработка с 2017 г. Кроме того, общие профильные запасы $C_{орг}$ (слой 0–100 см) оказались больше при традиционной обработке агрочернозема даже по сравнению с его ненарушенным фоновым аналогом (лесом). Таким образом, применение технологии нулевой обработки агрочернозема в первые 4–7 лет способствовало увеличению запасов $C_{орг}$ только в верхнем слое 0–10 см. В то время как профильные запасы этого элемента не зависели от использованной агротехнологии и характеризовались индивидуальными особенностями в каждом из изученных вариантов.

Эмиссия парниковых газов с поверхности почвы. За наблюдаемый осенний период (сентябрь–ноябрь) эмиссия CO_2 из агрочернозема в изучен-

ных агроэкосистемах варьировала в широком диапазоне: от 19 до 1100 мг С/м²/ч (рис. 3). Причем временное варьирование этого процесса обуславливалось главным образом динамикой температуры почвы (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.66–0.89$, $p < 0.01$), в то время как изменение влажности почвы не оказывало значимого влияния на эмиссию CO_2 ($p > 0.05$). Кумулятивная эмиссия CO_2 из почвы за наблюдаемый период (2 мес.) составила в среднем 2.8, 3.8 и 6.8 т С/га для нулевой обработки, традиционной отвальной вспашки и леса соответственно (рис. 4). Таким образом, измерения прямой эмиссии CO_2 показали, что переход от традиционной к нулевой обработке агрочернозема способствовал уменьшению выбросов CO_2 из почвы в атмосферу, что коррелировало с ранее выявленными зависимостями [17, 18, 20, 34].

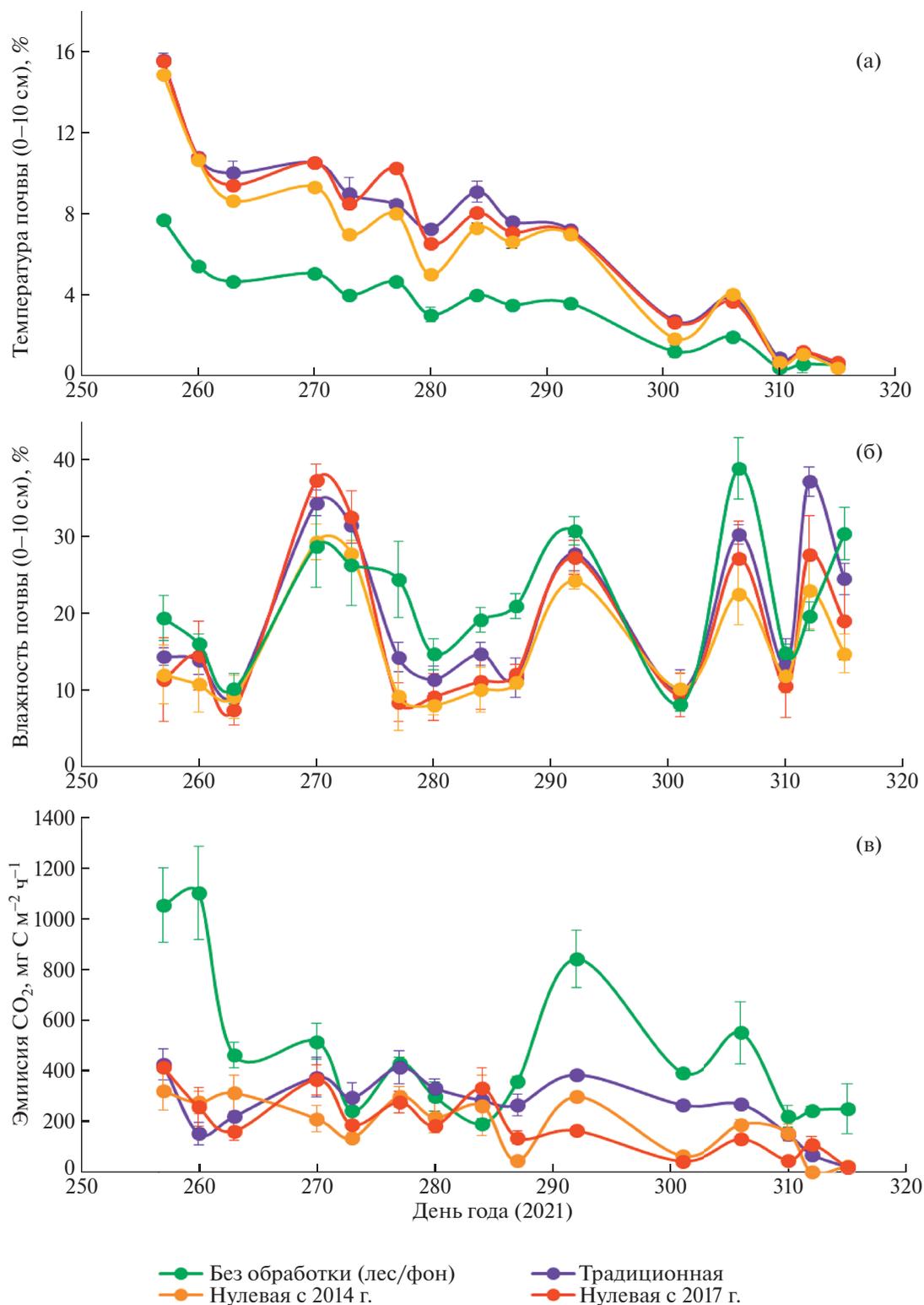


Рис. 3. Динамика температуры (а), влажности (б) чернозема (слой 0–10 см) и эмиссии CO₂ из почвы (в) при разных технологиях обработки почвы.

За время наблюдений (сентябрь–ноябрь) почвенные концентрации CH₄ и N₂O в отобранных образцах воздуха достоверно не отличались от фоновых концентраций этих газов в атмосфере-

ном воздухе во всех вариантах исследования. Эти результаты в целом совпадают с данными других исследователей [3, 43], которые сообщили, что количество осадков является главным фактором

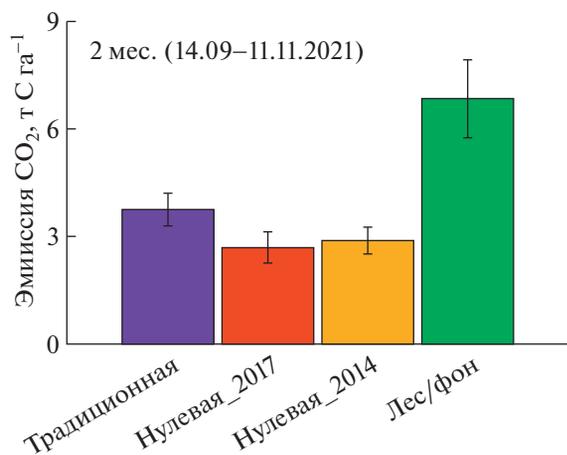


Рис. 4. Кумулятивная эмиссия CO₂ из чернозема за 2 мес. (14.09–11.11.2021 г.) при разных технологиях обработки почвы.

влияния на эмиссию N₂O и CH₄ из почв. Эмиссия этих парниковых газов может быть существенной в годы с высоким количеством осадков и незначительной – в засушливые годы. Регион исследования в 2021 г. характеризовался малым количеством осадков и поэтому различия в эмиссии N₂O и CH₄ из почв с низким содержанием влаги были

незначительными, что не позволило выявить достоверных различий в эмиссиях этих парниковых газов из почв с нулевой и общепринятой обработкой. Предположительно, в периоды переувлажнения, исследованные почвы могут быть источником высоких выбросов CO₂, N₂O и CH₄.

Динамика содержания нитратного азота. Динамика содержания N-NO₃⁻ в верхнем слое 0–10 см почвы в изученных экосистемах (лес, агроценозы с традиционной и нулевой обработкой) не имела какого-либо выраженного тренда за наблюдаемый осенний период (рис. 5). Содержание нитратного азота варьировало от 0.1 до 1.8 мг/кг почвы и в среднем было на 40% больше в почвах с нулевой и традиционной обработкой, чем в почве под лесом. Динамика содержания аммонийного азота (N-NH₄) в черноземе показала тренд постепенного увеличения к концу периода исследования. Динамика содержания N-NH₄ отрицательно коррелировала с изменениями температуры почвы: коэффициент корреляции Пирсона был равен –0.69 (традиционная обработка), –0.58 (нулевая обработка с 2017 г.), –0.60 (нулевая обработка с 2014 г.) и –0.45 (лес). В среднем за наблюдаемый период содержание N-NH₄ в агрочерноземе изученных агроценозов было в 2.2 раза меньше, чем

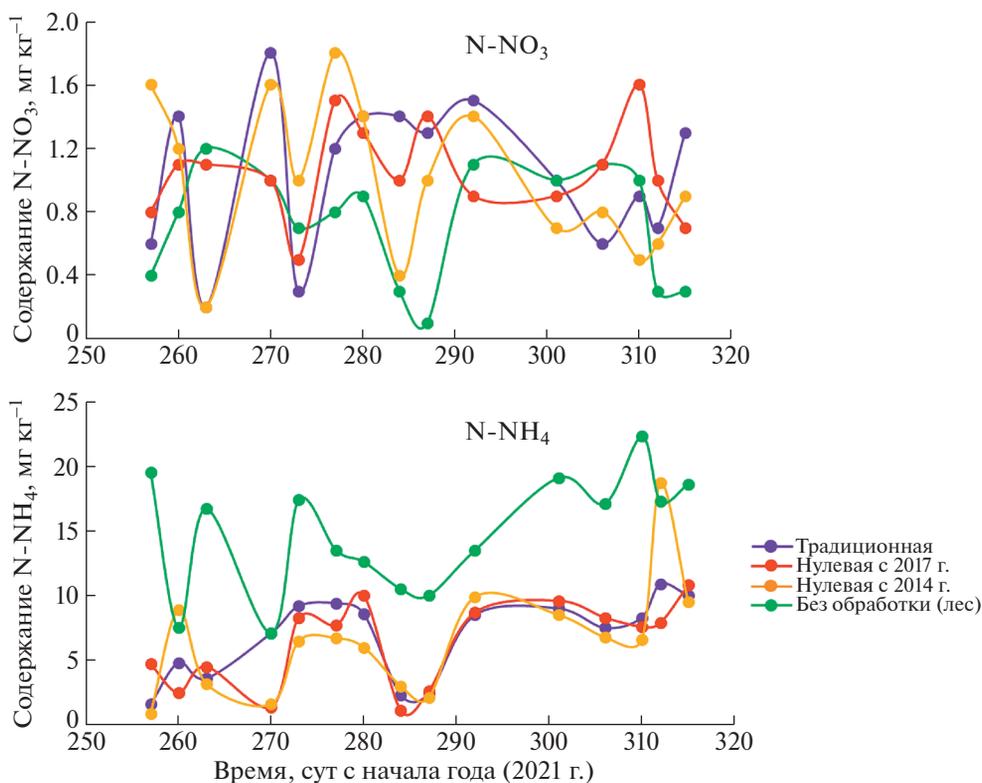


Рис. 5. Динамика нитратного и аммонийного азота (N-NO₃ и N-NH₄) в верхнем слое 0–10 см чернозема при разных технологиях обработки.

Таблица 2. Плотность сложения чернозема при разных технологиях обработки почвы

Тип обработки почвы	Средняя плотность сложения чернозема $P \pm \Delta_p$, ($n = 2$), г/см ³		
	Слой, см		
	0–10	10–20	0–20
Традиционная	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.1
Нулевая с 2017 г. (поле G-70)	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.1
Нулевая с 2014 г. (поле G-128 b)	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.3 ± 0.1
Без обработки (лес/фон)	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1

в черноземе в лесу. Однако при сравнении традиционной и нулевой обработок агрочернозема не обнаружено достоверных различий в содержании N-NH₄ и N-NO₃ (ANOVA, $p > 0.05$) в связи с отсутствием достоверных различий в содержании влаги – одного из основных факторов влияния на микробиологические процессы нитрификации и денитрификации [40, 51].

Изменения плотности сложения почвы. Механическая обработка почвы влечет за собой ее уплотнение в результате прямого воздействия на нее тяжелых транспортных средств. Для исследованного региона длительное сельскохозяйственное использование агрочернозема привело к увеличению его плотности сложения в верхнем пахотном слое (0–20 см) до 1.2–1.3 г/см³, что на 1/3 больше, чем для чернозема ненарушенной экосистемы – леса (табл. 2). Причем более длительное применение технологии нулевой обработки почвы (с 2014 г.) способствовало незначительно большему уплотнению почвы по сравнению с традиционной отвальной вспашкой. На исследо-

ванных участках не применяли биологические методы, которые могли бы способствовать разуплотнению почвы и восстановлению ее структуры. К таким методам можно отнести, в частности, выращивание промежуточных культур или культур с мощной и глубокой корневой системой. Однако внедрение этих методов осуществляется медленно из-за отсутствия унифицированных рекомендаций по их применению в практике ПРЗ.

Поступление биогенных элементов (С, N, P, K) в почву в составе растительных остатков при использовании технологии нулевой обработки почвы. Характерной особенностью нулевой обработки почвы является максимальное сохранение пожнивных остатков на поверхности почвы, что способствует лучшему сохранению влаги в почве и дополнительному поступлению в нее различных элементов питания. Содержание С, N, P и K определили в составе надземной и корневой биомассы различных культур в реализуемом севообороте: сорго, ячмень, пшеница, соя, подсолнечник (табл. 3). В среднем содержание С, N, P и K в растительных остатках составило 43, 0.8, 0.1 и 1.0% соответственно. Причем в надземной биомассе по сравнению с корнями произошло большее накопление N, P и K в среднем в 1.9, 1.6 и 3.6 раза соответственно. Среди возделываемых культур большей биогенной аккумуляцией N отличались ячмень и соя (в среднем 1.4 и 1.1%), меньшей – сорго и подсолнечник (0.4 и 0.3%). Наибольшее содержание фосфора обнаружено в растительных остатках ячменя (в среднем 0.14%), наименьшее – сорго и подсолнечника (0.04 и 0.05%). Большей биогенной аккумуляцией калия отличалось сорго (в среднем 1.8%), меньшей – пшеница (0.4%). Таким образом, анализ содержания основных биогенных элементов в надземной и корневой биомассах различных сельскохозяйственных культур показал, что ячмень и соя обладали наибольшей

Таблица 3. Содержание биогенных элементов (углерода, азота, фосфора и калия) в биомассе сельскохозяйственных культур и поступления их в почву из растительных остатков при использовании технологии нулевой обработки почвы (вегетационный период 2021 г.)

Культура	Содержание в биомассе, наземная часть/корни, %				Поступление в почву с растительными остатками (PO), кг/га				
	С	N	P	K	PO	С	N	P	K
Сорго	41.6/40.9	0.39/0.39	0.027/0.043	2.54/0.96	645	268	3	0.2	16
Ячмень	42.7/40.8	1.64/1.12	0.190/0.094	1.08/0.46	4030	1720	66	7.7	44
Пшеница	42.9/45.5	0.94/0.62	0.110/0.098	0.56/0.24	2160	928	20	2.4	12
Соя	42.6/45.6	1.61/0.50	0.130/0.054	1.59/0.24	1860	792	30	2.4	30
Подсолнечник	40.7/45.0	0.48/0.20	0.058/0.034	1.52/0.38	2480	1010	12	1.4	38

аккумулирующей способностью в отношении азота и фосфора, а сорго – в отношении калия. На основе данных о среднем количестве оставшихся на поверхности почвы растительных остатков после уборки урожая, в табл. 3 приведено общее поступление С, К, N и P в почву на единицу площади. Оказалось, что наибольшее количество С, К, N и P поступало в почву с растительными остатками ячменя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эффективность ресурсосберегающих технологий в увеличении секвестрации $C_{орг}$ в почве и в снижении выбросов парниковых газов из почвы во многом остается дискуссионной. Результаты предварительного исследования агрочерноземов с нулевой и традиционной обработкой в условиях Среднего Поволжья (сентябрь–ноябрь 2021 г.) подтвердили, что при переходе от общепринятой к нулевой обработке агрочернозема тяжелосуглинистого за первые 4 года произошло увеличение запасов $C_{орг}$ в верхнем слое 0–10 см почвы на 13–17% и снижение выбросов CO_2 из почвы на 26%. Кроме того, нулевая обработка почвы способствовала наиболее “экологичному” восполнению в ней запасов питательных элементов за счет минерализации пожнивных растительных остатков после уборки урожая. Установлено, что на участках с нулевой обработкой с остатками культур (ячмень, пшеница, подсолнечник, соя, сорго) в почву поступило 268–1720 кг С, 3–66 кг N, 0,2–7,7 кг P и 12–44 кг K/га. Это количество поступивших в почву питательных элементов соизмеримо с дозами минеральных удобрений, применяемых в других хозяйствах при выращивании сельскохозяйственной продукции, что позволяет сократить их дозы. Совершенствование и адаптация данной ресурсосберегающей технологии в исследованных почвенно-климатических условиях в будущем должны быть сфокусированы на поиске и разработке оптимальных методов борьбы с переуплотнением почвы, например, путем введения в севообороты культур с мощной и глубоко проникающей корневой системой. Кроме того, дальнейший анализ и мониторинг влияния нулевой обработки почв на их свойства требуют пространственного увеличения количества точек исследования, чтобы достоверно учесть пестроту почвенного покрова, обусловленную разнообразием подстилающих материнских пород и рельефом. Это также позволит в дальнейшем совершенствовать данную ресурсосберегающую технологию согласно принципам адаптивно-ландшафтного земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. Т. 2. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
2. *Haque M.M., Biswas J.C., Salahin N., Alam M.K., Akhter S., Akhtar S., Maniruzzaman M., Hossain M.S.* Tillage systems influence on greenhouse gas emission factor and global warming potential under rice-mustard-rice cropping system // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2022. P. 1–16.
3. *Huang Y., Ren W., Wang L., Hui D., Grove J.H., Yang X., Tao B., Goff B.* Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2018. V. 268. P. 144–153.
4. *Virk A.L., Liu W.S., Chen Z., Yves N., Bohoussou D., Cheema M.A., Khan T.S., Zhao X., Zhang H.L.* Effects of different tillage systems and cropping sequences on soil physicochemical properties and greenhouse gas emissions // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2022. V. 335. N. 108010.
5. *Jarecki M.K., Lal R.* Crop management for soil carbon sequestration // *Critic. Rev. Plant Sci.* 2003. V. 22(6). P. 471–502.
6. *Lal R., Follett R.F., Stewart B.A., Kimble J.M.* Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security // *Soil Sci.* 2007. V. 172(12). P. 943–956.
7. *Lessmann M., Ros G.H., Young M.D., de Vries W.* Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management // *Global Change Biol.* 2022. V. 28(3). P. 1162–1177.
8. *Padarian J., Minasny B., McBratney A., Smith P.* Soil carbon sequestration potential in global croplands // *Peer. J.* 2022. V.10. e13740.
9. *Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W.* Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils // *Biogeochemistry.* 2000. V. 48(1). P. 147–163.
10. *Zhao J., Liu Z., Lai H., Yang D., Li X.* Optimizing residue and tillage management practices to improve soil carbon sequestration in a wheat-peanut rotation system // *J. Environ. Manag.* 2022. V. 306. N. 114468.
11. *Lal R.* Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science.* 2004. V. 304(5677). P. 1623–1627.
12. *Balashov E., Buchkina N.* Impact of short-and long-term agricultural use of chernozem on its quality indicators // *Inter. Agrophys.* 2011. V. 25(1). P. 1–5.
13. *López-Garrido R., Madejón E., Murillo J.M., Moreno F.* Soil quality alteration by mouldboard ploughing in a commercial farm devoted to no-tillage under Mediterranean conditions // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2011. V. 140(1–2), P. 182–190.
14. *de Oliveira L.E.Z., de Souza Nunes R., de Sousa D.M.G., de Figueiredo C.C.* Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol // *Geoderma.* 2020. V. 367. 114254.
15. *Xu J., Han H., Ning T., Li Z., Lal R.* Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon,

- crop yield, and yield stability in a wheat-maize system // *Field Crop. Res.* 2019. V. 233. P. 33–40.
16. *Castellini M., Fornaro F., Garofalo P., Giglio L., Rinaldi M., Ventrella D., Vitti C., Vonella A.V.* Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat // *Water.* 2019. V. 11(3). P. 484.
 17. *Ogle S.M., Alsaker C., Baldock J., Bernoux M., Breidt F.J., McConkey B., Regina K., Vazquez-Amabile G.G.* Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions // *Sci. Rep.* 2019. V. 9(1). P. 1–8.
 18. *Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W.* Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils // *Biogeochemistry.* 2000. V. 48(1). P. 147–163.
 19. *Phogat M., Dahiya R., Goyal V., Kumar V.* Impact of long term zero tillage on soil physical properties: A review // *J. Pharmacogn. Phytochem.* 2020. V. 9(5). P. 2959–2967.
 20. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Till. Res.* 2004. V. 79(1). P. –31.
 21. *Vizoli B., Cavalieri-Polizeli K.M.V., Tormena C.A., Barth G.* Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. 104935.
 22. *Zhang Y., Xie D., Ni J., Zeng X.* Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area: No-till is better than mulch-till // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2020. V. 300. 107003.
 23. *Bhattacharyya S.S., Ros G.H., Furtak K., Iqbal H.M., Parra-Saldívar R.* Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics // *Sci. Total Environ.* 2022. N. 152928.
 24. *Dewi R.K., Fukuda M., Takashima N., Yagioka A., Komatsuzaki M.* Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional tillage soil management after 3 and 11 years of organic farming // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. V. 68(1). P. 133–148.
 25. *Kan Z.R., Liu W.X., Liu W.S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.L.* Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // *Global Change Biol.* 2022. V. 28(3). P. 693–710.
 26. *Ussiri D.A., Lal R.* Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio // *Soil Till. Res.* 2009. V. 104(1). P. 39–47.
 27. *Christopher S.F., Lal R., Mishra U.* Regional study of no-till effects on carbon sequestration in the Midwestern United States // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2009. V. 73 (1). P. 207–216.
 28. *Гилев С.Д., Цымбаленко И.Н., Курлов А.П., Русакова И.В.* Микробоценоз чернозема выщелоченного и динамика органического вещества при минимизации обработки почвы в условиях Зауралья // *АПК России.* 2015. Т. 73. С. 104–110.
 29. *Кураченко Н.Л., Колесник А.А.* Структура и запасы гумусовых веществ чернозема в условиях основной обработки почвы // *Вестн. КрасГАУ.* 2017. № 9. С. 149–157.
 30. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Фархадов Ю.Р., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Содержание органического углерода и азота в размерных фракциях агрегатов типичных черноземов // *Почвоведение.* 2021. № 3. С. 320–326.
 31. *Завалин А.А., Дридигер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А.* Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве // *Почвоведение.* 2018. № 12. С. 1506–1516.
 32. *Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Мясникова М.А., Акименко Ю.В., Колесников С.И.* Влияние технологии прямого посева на почвенную мезофауну, дыхание и ферментативную активность черноземов южных // *Агрохим. вестн.* 2019. № 5. С. 31–36.
 33. *Холодов В.А., Белобров В.П., Ярославцева Н.В., Яшин М.А.* Влияние технологии прямого посева на распределение органического углерода и азота во фракциях агрегатов черноземов типичных, обыкновенных и южных // *Почвоведение.* 2021. № 2. С. 240–246.
 34. *Horák J., Balashov E., Šimanský V., Igaz D., Buchkina N., Aydın E., Bárek V., Drgoňová K.* Effects of conventional moldboard and reduced tillage on seasonal variations of direct CO₂ and N₂O emissions from a loam Haplic Luvisol // *Biologia.* 2019. V. 74. P. 767–782.
 35. *Liu X.J., Mosier A.R., Halvorson A.D., Reule C.A., Zhang F.S.* Dinitrogen and N₂O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39(9). P. 2362–2370.
 36. *Petersen S.O., Schjønning P., Thomsen I.K., Christensen B.T.* Nitrous oxide evolution from structurally intact soil as influenced by tillage and soil water content // *Soil Biol. Biochem.* 2008. V. 40(4). P. 967–977.
 37. *Smith W.N., Grant B.B., Desjardins R.L., Rochette P., Drury C.F., Li C.* Evaluation of two process-based models to estimate soil N₂O emissions in Eastern Canada // *Canad. J. Soil Sci.* 2008. V. 88(2). P. 251–260.
 38. *Wang H., Wang S., Yu Q., Zhang Y., Wang R., Li J., Wang X.* No-tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system // *J. Environ. Manag.* 2020. V. 261. 110261.
 39. *Badagliacca G., Benítez E., Amato G., Badalucco L., Giambalvo D., Laudicina V.A., Ruisi P.* Long-term no-tillage application increases soil organic carbon, nitrous oxide emissions and faba bean (*Vicia faba* L.) yields under rain-fed Mediterranean conditions // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 639. P. 350–359.
 40. *Wrage N., Velthof G.L., van Beusichem M.L., Oenema O.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33(12–13). P. 1723–1732.
 41. *De Kimpe C.D., Warkentin B.P.* Soil functions and the future of natural resources // *Adv. Geocol.* 31. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 1998. V. 1. P. 3–10.
 42. *Karlen D.L., Ditzler C.A., Andrews S.S.* Soil quality: why and how? // *Geoderma.* 2003. V. 114(3–4). P. 145–156.

43. *Almaraz J.J., Mabood F., Zhou X., Madramootoo C., Rochette P., Ma B. L., Smith D.L.* Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2009. V. 73(1), P. 113–119.
44. *Ma Y., Sun L., Zhang X., Yang B., Wang J., Yin B., Yan X., Xiong Z.* Mitigation of nitrous oxide emissions from paddy soil under conventional and no-till practices using nitrification inhibitors during the winter wheat-growing season // *Biol. Fertil. Soil.* 2013. V. 49(6). P. 627–635.
45. *Abdalla M., Osborne B., Lanigan G., Forristal D., Williams M., Smith P., Jones M.B.* Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions // *Soil Use Manag.* 2013. V. 29(2). P. 199–209.
46. *Zhang Y., Zhao J., Huang X., Cheng Y., Cai Z., Zhang J., Müller C.* Microbial pathways account for the pH effect on soil N₂O production // *Europ. J. Soil Biol.* 2021. V. 106. N. 103337.
47. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духаннин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева.* 2021. Вып. 108. С. 175–218.
48. Стандартная рабочая методика. Органический углерод почвы Спектрофотометрический метод Тюрина. Рим: ФАО, 2021. <https://www.fao.org/3/cb4757ru/cb4757ru.pdf>
49. Руководство ФАО по оценке содержания органического углерода почвы. 2021 г., стандарт VCS сертификационного агентства Verra, 2022 г.
50. *Buchkina N., Rizhiya E., Balashov E.* N₂O emission from a loamy sand Spodosol as related to soil fertility and N-fertilizer application for barley and cabbage // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2012. V. 58. P. 141–146.
51. *Dobbie K.E., Smith K.A.* Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables // *Global Change Biol.* 2003. V. 9(2). P. 204–218.

Assessment of Greenhouse Gas Emissions and Carbon Reserves with Zero Processing of Chernozem in the Conditions of the Forest-Steppe Zone of the Middle Volga Region

L. V. Orlova^{a, #}, N. M. Trots^b, V. I. Platonov^c, E. V. Balashov^d, S. V. Sushko^d,
I. N. Kolesnichenko^c, S. V. Orlov^e, and E. V. Kruglov^f

^a National Movement of Saving Agriculture
Kuibyshev ul. 88, Samara 443099, Russia

^b Samara State Agrarian University
Uchebnaya ul. 2, Ust-Kinelsky settlement, Kinel 446442, Russia

^c Samara National Research University named after akad. S.P. Korolev
Moskovskoe shosse 34, Samara 443086, Russia

^d Agrophysical Institute
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia

^e LLC "Orlovka-Agro-Innovation Center"
ul. Tsentralnaya 42E, Samara region, Pokhvistnevsky district, d. Stary Amanak village 446472, Russia

^f Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
ul. Gagarina 20, Samara 443079, Russia

[#]E-mail: orlova.rmrl@gmail.com

The transition from conventional soil treatment technology to zero treatment technology contributes to an increase in carbon sequestration (Sorg) in the form of carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere into the soil and, as a result, a reduction in the adverse effects of the greenhouse effect on the ecological state of the environment. The effectiveness of the application of zero tillage is to a greater or lesser extent due to specific agro-climatic conditions, crop rotation systems, fertilizers and plant protection, soil quality and stability. The influence of zero tillage on the dynamics of sorghum reserves and greenhouse gas emissions (CO₂, N₂O, CH₄) in the agro-climatic conditions of crop production (LLC "Orlovka AIC", Samara region) was investigated. The study was conducted on agrochernozem heavy loam in September–November 2021 in conditions of an abnormally arid growing season and high summer temperatures. On plots with zero tillage, plant residues were received: 268–1720 kg C/ha, 3–66 kg N, 0.2–7.7 kg P and 12–44 kg K/ha. Based on the results obtained, recommendations are proposed for further improving the efficiency of zero tillage technology due, firstly, to reducing its adverse effect on the density of soil composition, and, secondly, taking into account the influence of underlying parent rocks and relief on water erosion of soil and redistribution of granulometric fractions of soil in the agricultural landscape, which will allow using this technology according to principles of adaptive landscape farming.

Keywords: environmental resource-saving agriculture, zero and conventional tillage, soil properties, carbon sequestration, greenhouse gas emissions.