

БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПАРОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЯ

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

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

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

Исследование проводили на опытном поле ГАУ Северного Зауралья на черноземе выщелоченном в условиях лесостепной зоны Зауралья в 2023–2024 годах. Цель исследования – установить баланс органического углерода в черноземе выщелоченном при возделывании различных культур и паров в условиях Западной Сибири. В течение вегетации на всех изучаемых вариантах эмиссия углерода увеличивается с мая по июль и в дальнейшем опускается к осени. В умеренно увлажненном 2023 г. потери углерода в результате дыхания почвы в посевах яровой пшеницы составляли 2,4 т/га, кукурузы – 3,2 т/га и люцерны – 3,8 т/га. В избыточно увлажненном 2024 г. эмиссия увеличилась на 46 % в посевах яровой пшеницы, на 16 % – в кукурузе и на 21 % – в посевах люцерны. В избыточно увлажненном 2024 г. масса растительных остатков была больше, чем в умеренно увлажненном, на 31 и 22 % в посевах пшеницы и кукурузы, на 6 и 26 % – в посевах люцерны и в занятом пару. В умеренно увлажненном 2023 г. содержание C_{org} в корневых и пожнивных остатках было выше на 0,7–2,5 %, чем в избыточно увлажненном году. Определено, что в умеренно увлажненном году потери углерода из почвы составляли -0,2 т/га при возделывании яровой пшеницы; -1,5 т/га – кукурузы; -1,0 и -1,8 т/га – в занятом и черном парах соответственно. Положительный баланс +0,2 т/га был получен лишь при возделывании люцерны. В избыточно увлажненном году отрицательный баланс углерода в почве был получен на всех изучаемых вариантах. В посевах пшеницы он увеличивался до -0,6 т/га, кукурузы – на 13 %, в посевах люцерны – до -0,5 т/га. Однако в паровых полях потери углерода уменьшились до -0,4 т/га в занятом пару и до -1,3 т/га – в черном пару.

Ключевые слова: эмиссия углекислого газа, диоксид углерода, яровая пшеница, кукуруза, люцерна, занятый пар, черный пар, солома, корневые и пожнивные остатки, содержание углерода.

Для цитирования: Дёмин Е. А., Миллер С. С. Баланс органического углерода при возделывании различных сельскохозяйственных культур и паров в условиях Северного Зауралья // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 4. С. 54–62. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-54-62.



ORGANIC CARBON BALANCE DURING CULTIVATION OF VARIOUS AGRICULTURAL CROPS AND FALLOW LANDS IN THE NORTHERN TRANS-URALS

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

S. S. Miller, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher Institute of Fundamental and Applied Agrobiotechnologies, millerss@gausz.ru, ORCID ID: 0000-0002-2406-0142
FSBEI HE "Northern Trans-Ural State Agricultural University", 625003, Tyumen region, Tyumen, Respublik Str., 7

The current study was conducted on leached blackearth of the experimental plot of the Northern Trans-Ural SAU located in the forest-steppe of the Trans-Urals in 2023–2024. The purpose of the study was to establish the organic carbon balance in leached blackearth during the cultivation of various crops and fallows in the Western Siberia. During the vegetation period, in all studied variants, carbon emissions increased from May to July and then decreased towards the autumn. In the moderately wet 2023, carbon losses due to soil respiration amounted to 2.4 t/ha in spring wheat crops, 3.2 t/ha in maize crops and 3.8 t/ha in alfalfa crops. In the excessively wet 2024, emissions increased by 46 % in spring wheat crops, by 16 % in maize crops and by 21 % in alfalfa crops. In the excessively wet 2024, the mass of plant residues was larger than in the moderately wet 2023 by 31 %, 22 % in wheat and maize crops, by 6 % and 26 % in alfalfa crops and in sown fallow. In the moderately wet 2023, the C_{org} content in root and stubble residues was 0.7–2.5 % higher than in the excessively wet 2024. There has been determined that in the moderately wet year, carbon losses from the soil were -0.2 t/ha during spring wheat cultivation, -1.5 t/ha during maize cultivation, -1.0 t/ha in sown fallow and -1.8 t/ha in weedfree fallow. A positive balance of +0.2 t/ha was obtained only when cultivating alfalfa. In an excessively wet year, a negative carbon balance in soil was obtained in all the studied variants. It increased to -0.6 t/ha in wheat crops, by 13 % in maize crops, and to -0.5 t/ha in alfalfa crops. However, carbon losses decreased to -0.4 t/ha in sown fallow and to -1.3 t/ha in weedfree fallow.

Keywords: carbon dioxide emission, carbon dioxide, spring wheat, maize, alfalfa, sown fallow, weedfree fallow, straw, root and crop residues, carbon content.

Введение. Плодородные почвы – одно из главных достояний общества. Основным показателем плодородия являются высокое содержание и запасы органического углерода, который обеспечивает благоприятные агрофизические и агрохимические характеристики почвы (Свирина и др., 2023). Увеличение численности населения приводит к возникновению определенных трудностей перед обществом, а именно: потребности в средствах для благополучного существования, продуктах питания и т.д. Это приводит к тому, что увеличивается мощность промышленных, перерабатывающих предприятий, а также возрастает интенсивность использования пахотных почв. Все это вызывает увеличение выбросов газов антропогенного характера в атмосферу, которые оказывают влияние на климат (Савельева, 2013).

Доля дыхания пахотных почв в общей эмиссии парниковых газов достаточно высокая, и, как показывают исследования, зависит от ряда причин, таких как содержание органического углерода, температура, влажность и биологическая активность почвы (Иванов и др., 2023). В одном ряду с этими факторами находятся типы сельскохозяйственных угодий, а также возделываемые виды культур. Вид культуры оказывает влияние на продуцирование CO_2 из почвы косвенно в связи с выделением корневой системой особых ферментов в ризосферу, что приводит к увеличению численности колоний определенных групп микроорганизмов. Дополнительно влияет биомасса растений на температуру почвы в связи с затенением, что также приводит к изменению интенсивности биохимических процессов, протекающих в ней.

Все это приводит к изменению интенсивности эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы. Дополнительно вид культуры оказывает и прямое влияние на скорость продуцирования CO_2 . Это происходит в связи с собственным дыханием корневой системы, и в зависимости от ее массы и распределения по горизонту почвы ее вклад в формирование суммарной эмиссии может существенно разниться (Башкин, 2023).

Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере привело к тому, что в последние годы существенно обострилась проблема изменения климата: по последним данным, впервые с доиндустриального периода среднегодовая температура воздуха увеличилась на $1,5^\circ\text{C}$ (Cannon, 2025). Повышение температуры воздуха на эту величину ведет к тому, что происходит цепное изменение погодных условий во всех климатических зонах мира. В различных регионах России отмечается динамика по снижению количества осадков в районах достаточного увлажнения и их существенный дефицит в зонах недостаточного увлажнения, в то время как в зонах избыточного увлажнения происходит превышение годовых норм осадков (Demichev et al., 2024). Все это

приводит к ключевой проблеме получения урожая, способного обеспечить продовольственную безопасность населения планеты в целом и в России в частности. Для снижения неблагоприятного воздействия на климат парниковых газов была принята концепция «4 промилле», в рамках которой необходимо обеспечить повышение запасов органического углерода в пахотных почвах мира. Сама по себе концепция одновременно решает несколько основных проблем. Это снижение неблагоприятного воздействия антропогенных выбросов парниковых газов на климат, а также повышение плодородия пашни (Романенков и др., 2024). Однако для решения данной задачи необходимо определение доли влияния технологических приемов, природных факторов и других переменных на оценку способности пахотных почв депонировать углерод в определенных погодных и почвенных условиях. Без проведения оценки влияния всех возможных факторов на секвестрационную способность почвы невозможно разработать оптимальную систему углеродсберегающего земледелия.

Целью исследования являлось установление баланса органического углерода в черноземе выщелоченном при возделывании различных культур и паров в условиях Западной Сибири.

Материалы и методы исследований. Исследование проводили в условиях лесостепной зоны Зауралья в 2023–2024 гг. на основных культурах, возделываемых в регионе растениеводческими (яровая пшеница) и животноводческими (кукуруза, люцерна) предприятиями АПК. В связи с тем, что многие хозяйства используют черные и занятые пары (однолетние травы) для возделывания озимых культур, было принято решение их также включить в схему опыта. Почвенный покров представлен одной из основных, наиболее плодородных и распространенных почв лесостепной зоны Западной Сибири – черноземом выщелоченным. Основные агрохимические характеристики: содержание органического вещества – $4,0 \pm 0,8\%$ (ГОСТ 26213-2021); обменная кислотность – $5,5 \pm 0,3$ ед. pH (ГОСТ Р 58594-2019); нитратный азот – $9,1 \pm 5,4$ мг/кг (ГОСТ 26951-86); содержание подвижного фосфора – 71 ± 20 мг/кг, калия – 146 ± 38 мг/кг (ГОСТ 26204-91). Размер опытных делянок под вариантами составлял от 200 до 500 м². Технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур, сроки проведения и нормы высева являлись традиционными для зоны северной лесостепи (Абрамов и др., 2019). Исследование проводили на естественном питательном фоне, удобрения не использовали. Основная обработка почвы на всех вариантах отвальная – 20–22 см. Перед посевом зерновой и пропашной культуры проводили культивацию. В дальнейшем сеяли яровую пшеницу СЗМ-5,4, кукурузу СУПН-8А, после прикатывали ЗККШ-6. В фазу кущения яровой пшеницы и фазу 4–5-го листа кукурузы проводили обработку

гербицидами. Уборку проводили в фазу полной спелости яровой пшеницы на зерно и молочно-восковой кукурузы на зеленую массу. В качестве многолетних трав изучали люцерну второго года пользования, которую использовали на зеленую массу. В 2023 г. измерение концентрации углекислого газа проводили инфракрасным газоанализатором AZ77535. Более подробно с системой агротехнических мероприятий и методикой проведения исследований в опыте можно ознакомиться в опубликованной работе (Demin, 2024). В 2024 г. для измерения использовали систему PriEco PRI-8610, замеры проводили в 3-кратном повторении. В дальнейшем с помощью расчетов определяли общую эмиссию углерода с единицы площади за вегетацию. Перед уборкой

на варианте с яровой пшеницей отбирали снопы с 1 м², в дальнейшем определяли выход массы соломы с единицы площади. После уборки на всех вариантах, за исключением черного пара, проводили отбор корнепоживных остатков и устанавливали их массу с гектара, после чего в образцах растительного материала определяли содержание органического углерода по аттестованной методике (ГОСТ 27980-88).

Погодные условия 2023–2024 гг. существенно отличались от средних многолетних значений (ГТК – 1,1 ед.). 2023 г. характеризовался как умеренно теплый и увлажненный, ГТК составлял 1,0 ед., а в 2024 г. ГТК составлял 1,4 ед. Более подробно погодные условия представлены на рисунке 1.

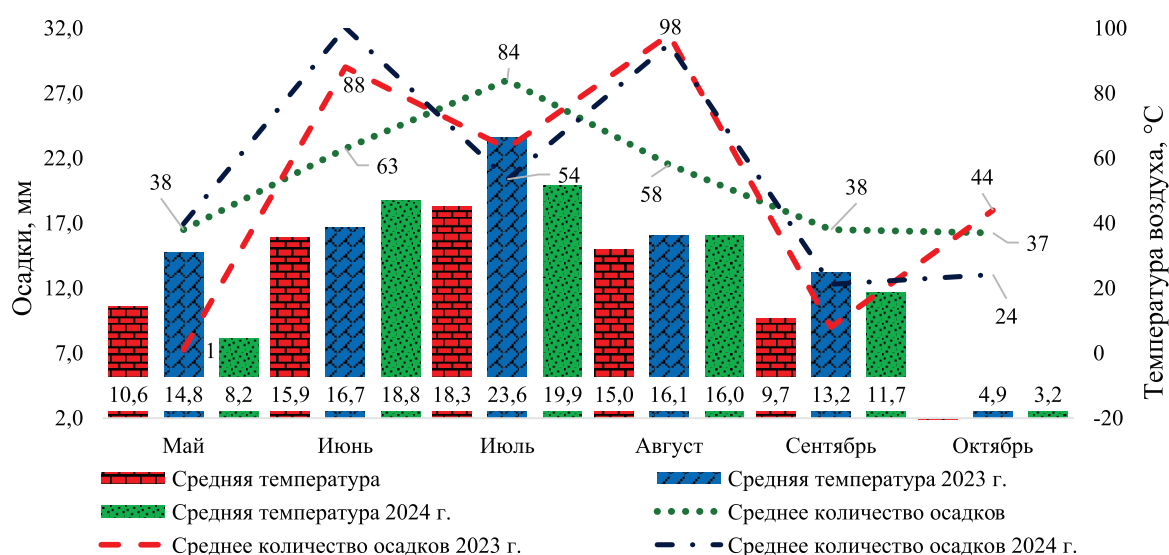


Рис. 1. Погодные условия периода исследований
Fig. 1. Weather conditions during the study

Результаты и их обсуждение. В посевах яровой пшеницы дыхание почвы в пересчете на чистый углерод существенно отличалось по годам исследований. В 2023 г., когда гидротермический коэффициент периода вегетации составлял 1,0 ед. и характеризовался как умеренно увлажненный, продуцирование углерода в сутки увеличивалось с мая по июль с 13,4 до 24,1 кг/га. Тогда как в 2024 г., который характеризовался как избыточно увлажненный (ГТК – 1,4 ед.), дыхание почвы в сутки увеличивалось с начала весны до середины лета более интенсивно – с 10,2 до 37,5 кг С/га (рис. 2).

В дальнейшем происходило снижение скорости эмиссии углерода. В 2023 г. с августа по октябрь значения снизились с 13,1 до 4,0 кг С/га в сутки. В 2024 г. в этот же промежуток времени дыхание снижалось с 31,7 до 2,3 кг С/га в сутки. Увлечение скорости дыхания почвы с весны до середины лета связано с рядом причин, и главная из которых – повышение температуры воздуха, которая способствовала прогреву почвы, и, как следствие, усилению

протекающих в почве процессов минерализации органического вещества в результате более активной работы почвенной микробиоты. Этот же фактор, только вместе с более высоким количеством атмосферных осадков, в 2024 г. приводил к созданию более благоприятных условий для микробной массы почвы, что и повлияло на более активное продуцирование CO₂ в сравнении с умеренно увлажненным годом. Фактором, который также оказывает влияние на то, что повышаются потери углерода из почвы в результате дыхания, является корневая система, которая к середине лета набирает практически максимальную массу, а это приводит к повышению газообмена в почве (Лаврентьева, 2017). Начало снижения эмиссии углерода со второй половины лета связано с тем, что начинает происходить снижение атмосферной температуры, а биомасса растений становится настолько большой, что существенно затеняет поверхность почвы. Это приводит к тому, что почва начинает постепенно остывать, а биологическая активность почвы начи-

нает также уменьшаться в результате снижения численности колоний почвенных микроорганизмов. Резкое уменьшение дыхания почвы в начале осени связано не только с понижением температуры почвы и уменьшением активности микробиоты, но также с тем, что растения находятся в фазе созревания и доля корневой системы в почвенном газообмене резко умень-

шается. После уборки яровой пшеницы в середине сентября и проведения основной обработки почвы корневая система постепенно отмирает и перестает влиять на почвенное дыхание, а низкая температура приводит к практически полной приостановке протекающих в почве биохимических процессов.

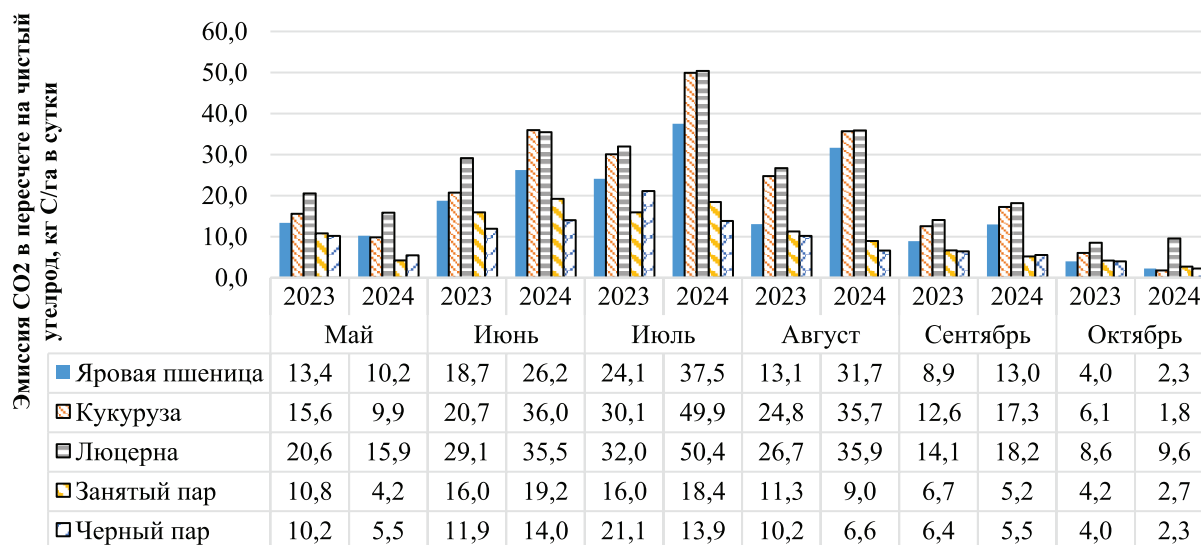


Рис. 2. Эмиссия диоксида углерода в пересчете на чистый углерод в посевах различных сельскохозяйственных культур и паров, кг С/га в сутки

Fig. 2. Carbon dioxide emission in terms of pure carbon in crops of various agricultural crops and fallows, kg C/ha per day

Примечание. Фактор А – вид возделываемых культур и паров, $HCP_{05} = 2,1$ кг/га; фактор В – период вегетации, $HCP_{05} = 4,3$ кг/га; фактор С – годы исследований, $HCP_{05} = 3,6$ кг/га.

Эмиссия углерода в посевах кукурузы в умеренно увлажненном 2023 г. в мае была на 16 % (2,2 кг С/га в сутки) выше значений, полученных в посевах яровой пшеницы. К июлю дыхание почвы увеличилось практически в двое – до 30,1 кг/га в сутки в пересчете на чистый углерод. В этот период потери углерода из почвы в результате эмиссии CO₂ в посевах кукурузы были на 25 % (6,0 кг С/га в сутки) выше, чем в пшенице. В дальнейшем отмечалась подобная динамика, как и на варианте с посевами яровой пшеницы, где происходило снижение скорости продуцирования CO₂ вплоть до октября. Однако отчуждение углерода в результате дыхания почвы было существенно выше – на 42–89 % – относительно яровой пшеницы. В избыточно увлажненном 2024 г. отмечалось повышение продуцирования CO₂ с июля по сентябрь, где значения потерь углерода в результате дыхания были на 37–74 % (4,7–19,8 кг С/га в сутки) выше, чем в умеренно увлажненный год. В мае и октябре 2024 г. эмиссия углерода в посевах кукурузы была на 37–71 % (4,3–5,7 кг С/га в сутки) меньше, чем в 2023 году. Это наверняка связано с низким температурным режимом почвы в начале весны и середине осени из-за пониженной атмосферной температуры. Высокие потери

углерода в результате эмиссии CO₂ в посевах кукурузы связаны с более мощной корневой системой, которая оказывала больший вклад в газообмен почвы. Дополнительно это подтверждается тем, что в мае (начало развития кукурузы), когда коневая система практически не развита, и в октябре (после ее уборки), когда корни отмирают, существенных отличий в скорости продуцировании углерода относительно яровой пшеницы не наблюдается.

Многолетние травы, как показывает ряд исследований, обладают большой массой корневой системы, которая ежегодно в течение вегетации увеличивается и превосходит корневую систему зерновых культур. Это вносит определенный вклад в формирование общей эмиссии диоксида углерода в посевах многолетних растений, а именно: повышает интенсивность дыхания почвы благодаря большему газообмену корневой системы с почвенным воздухом. Дополнительно мощная корневая система многолетних трав приводит к тому, что агрофизические свойства почвы деградируют менее интенсивно в сравнении с зерновыми культурами. В результате этого в посевах многолетних трав средняя аэрация и плотность почвы в метровом слое остаются более благоприятными для развития почвенной микробиоты

и это приводит к усилению протекающих биохимических процессов в ней, и, как следствие, увеличивает интенсивность эмиссии углерода из почвы (Eghbali et al., 2024). Немаловажным фактором остается то, что корневая система люцерны находится в симбиозе с азотофиксаторами в почве, численность которых существенно выше, чем в посевах зерновых культур, а это приводит также к повышению интенсивности дыхания почвы (Эседуллаев и др., 2016). В связи с этим в посевах люцерны второго года пользования эмиссия углерода была на 13–22 % (4,2–13,7 кг С/га в сутки) выше, чем в посевах яровой пшеницы. Динамика изменения скорости дыхания при этом была подобна яровой пшенице и кукурузе и увеличивалась в умеренно увлажненном 2023 г. с мая по июль с 20,6 до 32,0 кг С/га в сутки и в дальнейшем опускалась к октябрю до 8,6 кг С/га в сутки. В избыточно увлажненном 2024 г. эмиссия углерода с июня по сентябрь была более высокая, где значения были на 22–58 % (4,1–18,4 кг С/га в сутки) выше, чем в умеренно увлажненном 2023 году. Более высокая динамика продуцирования CO_2 в избыточно увлажненном году связана с тем, что достаточное увлажнение почвы даже в период, когда начинался дефицит атмосферных осадков, позволяло почвенной микробиоте развиваться и активно участвовать в процессе трансформации органического вещества. В умеренно увлажненном году в течение вегетации также отмечался периодический дефицит осадков, однако из-за малой влажности почвы биохимические процессы и колонии микроорганизмов в почве начинали уменьшаться.

Дыхание почвы в занятом пару зависит от видов смеси используемых культур. Преобладание в смеси бобовых культур над злаковыми будет приводить к более активному дыханию почвы из-за симбиоза с азотофиксирующими бактериями. На продуцирование углерода будут напрямую влиять сроки посева и уборки, так как именно от них будет зависеть активность роста корневой системы и ее мощность. Дополнительно влияние будет оказывать предшественник, а именно: биомасса побочной продукции, оставленной на поле, дозы и виды используемых на нем удобрений. В связи с тем, что посев однолетних трав проводили после посева яровой пшеницы и кукурузы, а именно в конце мая, а уборку – в середине июля, это приводило к тому, что корневая система не успевала набрать большую массу, а азотофиксаторы – существенно увеличить численность колоний. В результате этого весомого влияния данных факторов на дыхание почвы не отмечалось. В связи с этим на протяжении всего периода вегетации эмиссия углерода была на 14–72 % (1,8–22,7 кг С/га в сутки) меньше, чем под посевами яровой пшеницы. При этом была отмечена схожая с другими культурами динамика дыхания почвы, где в умеренно увлажненном 2023 г. продуцирование углерода повышалось с 10,8

до 16,0 кг С/га в сутки с мая по июль и в дальнейшем опускалась до 4,2 кг С/га в сутки к октябрю. В избыточно увлажненном 2024 г. динамика была такой же, однако в мае и августе продуцирование углерода было на 21–61 % (2,3–6,6 кг С/га в сутки) меньше, а в июне и июле – на 16–21 % (2,5–3,3 кг С/га в сутки) больше, чем в 2023 году. Более высокая эмиссия в июне и июле в условиях хорошего увлажнения наверняка связана с тем, что активно работала почвенная микробиота, что приводило к более высокой эмиссии диоксида углерода. Более поздний посев однолетних трав в 2024 г. и ранняя уборка привели к тому, что вклад корневой системы в дыхание почвы в начале развития (май) и после уборки (август) был минимальным.

В черном пару в связи с отсутствием посевов и периодическими механическими обработками практически полностью отсутствуют растения в течение вегетации. Это приводит к тому, что в дыхании почвы принимает участие только почвенная микробиота, которая участвует в биохимических процессах, протекающих в почве. В результате этого с мая по октябрь эмиссия углерода на данном участке существенно – на 12–79 % (2,5–25,0 кг С/га в сутки) – меньше, чем под посевами яровой пшеницы. Динамика изменения интенсивности дыхания почвы в течение вегетации была схожа с другими изучаемыми участками. С мая по июль 2023 г. происходило увеличение дыхания почвы с 10,2–21,1 кг С/га в сутки и в дальнейшем продуцирование CO_2 снижалось до 4,0 кг С/га в сутки к октябрю. В более увлажненный год отмечалось снижение дыхания почвы относительно умеренно увлажненного в мае, июле и августе на 34–46 % (3,6–7,3 кг С/га в сутки). В другие периоды достоверных отличий не наблюдалось. Снижение уровня дыхания почвы в 2024 г. может быть связано с рядом причин: первая – более низкие запасы органического углерода в почве, вторая – меньшее поступление растительных (органических) остатков от предшественника. Это, несмотря на более благоприятные для развития микрофлоры условия, могло являться ограничивающим фактором в повышении численности колоний микроорганизмов и, как следствие, дыхания почвы. В ряде работ отмечается подобная тенденция, где в паровых полях наблюдается более низкая эмиссия диоксида углерода в сравнении с участками, занятыми сельскохозяйственными культурами. Л. Г. Соколова со своими коллегами (2021) в работе подтверждает, что на варианте с сидерацией фиксировалось повышение эмиссии CO_2 в период вегетации растений в 1,1–2,5 раза относительно черного пара. Автор связывает усиление эмиссии CO_2 в период вегетации с увеличением вклада корневого дыхания и дыхательной активности ризосферной микрофлоры по мере активного прироста биомассы и корневой экскреции (Соколова и др., 2021). О. Э. Суховеева и др. (2024) со сво-

ими коллегами отмечает, что общая эмиссия диоксида углерода за вегетацию по культурам увеличивается в ряду «картофель < чистый пар < ячмень < озимая рожь». При этом автор объясняет, что низкое дыхание почвы под картофелем обусловлено применяемым при его возделывании гребневанием, в результате которого в летний период существенно повышается температура почвы и резко падает влажность. Активное дыхание почвы под озимой рожью возникает благодаря мощной растительной биомассе и коневой системе, что позволяет в затененной почве сохранить влагу и более активно участвовать коневой системе в дыхании почвы (Суховеева и др., 2024).

Поступающие в почву растительные остатки при возделывании сельскохозяйственных культур являются основным и практически единственным источником органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в агроценозах. Смена землепользования с естественных угодий в агроэкосистему приводит к значительному сокращению поступающих в почву органических остатков и, как показывают некоторые исследования, ведет к снижению содержания гумуса (Еремин и Демин, 2023). Это происходит по причине того, что на фоне дефицита растительных остатков и повышения аэрации в результате механических обработок почвы минерализации начинают подвергаться не только вновь поступившие органические остатки растений, но и стабильные гумусовые вещества почвы.

В связи с этим для оценки динамики изменения баланса углерода и подбора оптимальной структуры севооборота в почвах в зависимости от погодно-климатических условий необходимо определение массы поступающих растительных остатков и содержания в них $C_{\text{орг}}$ при возделывании определенных видов культурных растений.

В посевах зерновых культур на полях остаются солома, корневые и пожнивные остатки. В 2023-м умеренно увлажненном году в посевах яровой пшеницы выход побочной продукции составлял около 5 т/га абсолютно сухого вещества, из которых на солому и корне-пожвные остатки приходилось примерно поровну (табл. 1). В более увлажненном 2024 г. масса растительных остатков, оставшаяся в поле, была на 31 % (1,54 т/га) больше значений 2023 года. Увеличение при этом в значительной мере произошло из-за повышения массы корне-пожвных остатков. Стоит отметить, что содержание $C_{\text{орг}}$ в соломе, независимо от погодных условий года и составляет 46,6 % от сухого вещества. Однако концентрация $C_{\text{орг}}$ в корне-пожвных остатках в умеренно увлажненном 2023 г. составляла 41,2 %, а в избыточно увлажненном 2024 г. была на 2,5 % меньше.

В посевах кукурузы на полях в нашем регионе остаются только корне-пожвные остатки, так как в хозяйствах ее используют для получения сочных кормов, а для получения зерна заняты лишь незначительные посевные площади. Под кукурузой в 2023 г. масса корне-по-

жневных остатков была на 1,3 т/га больше, чем под яровой пшеницей, а содержание $C_{\text{орг}}$ в ней достигало 42,3 %. В год с избыточным увлажнением масса корне-пожневных остатков повышалась на 22 % (0,86 т/га), содержание $C_{\text{орг}}$ снижалось на 1,7 %.

Большинство посевов люцерны в Тюменской области используется для заготовки сенажа или сена и лишь незначительная часть посевов используется под семенные цели. В связи с этим на полях под люцерной стабильно остаются лишь корневые и пожвные остатки. Корневая система многолетних трав значительно мощнее, чем у зерновых культур, и она набирает массу на протяжении всего периода использования. В умеренно увлажненном году масса корне-пожвных остатков у люцерны второго года пользования составляла 8,74 т/га, что практически в 1,7 раза больше, чем образовавшиеся растительные остатки в посевах яровой пшеницы, и в 2,2 раза больше, чем под кукурузой. Содержание органического углерода при этом в корне-пожвных остатках люцерны было на 4,3 и 2,2 % больше, чем у пшеницы и кукурузы соответственно. Это связано с особенностью химического состава корне-пожвных остатков бобовых культур, в которых концентрация белковых соединений значительно выше, чем в зерновых (Sukhoveeva, 2022). В избыточно увлажненном 2024 г. масса образовавшихся корне-пожвных остатков у люцерны выросла на 0,5 т/га, и была выше, чем общая масса побочной продукции зерновых культур на 41–91 % (2,7–4,4 т/га). Содержание $C_{\text{орг}}$ в сравнении с прошлым годом снижалось на 1,7 %, несмотря на это, оно было на 3,2–5,1 % больше, чем в зерновых.

В занятом пару производят уборку смеси однолетних трав на зеленую массу в фазу бутонизации бобовых культур, в некоторых случаях уборку проводят в начале колошения овса. Это приводит к тому, что на полях остаются только корневые и пожвные остатки. Несмотря на то что уборку проводят в относительно раннюю фазу, на полях остается достаточно большое количество корневых и пожвных остатков. Это происходит по причине того, в агроэкосистеме образуется межвидовой симбиоз между бобовой и злаковой культурами, а количество растений на единице площади становится больше. В умеренно увлажненном 2023 г. масса корневых и пожвных остатков под занятым паром (однолетними травами) составила 2,46 т/га, что не отличалось от массы корне-пожвных остатков яровой пшеницы. В избыточно увлажненном году масса корне-пожвных остатков увеличивалась относительно прошлого года на 26 % и была ниже, чем у яровой пшеницы, на 22 %. Существенное различие в массе корне-пожвных остатков в избыточно увлажненном году может быть связано с тем, что корневая система у яровой пшеницы интенсивно развивалась вплоть до уборки, в то время как однолетние

травы убрали на раннем этапе. Стоит отметить, что $C_{орг}$ в корне-поживных остатках однолетних трав в 2023 г. составляло 39,3 % сухого ве-

щества и было на 1,9 % меньше, чем у яровой пшеницы. В 2024 г. достоверных различий в содержании Сорг с пшеницей не наблюдалось.

Таблица 1. Масса и содержание $C_{орг}$ в соломе и корне-поживных остатках (КПО) различных сельскохозяйственных культур
Table 1. Mass and content of $C_{орг}$ in straw and root-crop residues (RCR) of various agricultural crops

Варианты	Выход побочной продукции, т/га				Содержание $C_{орг}$, % сухого вещества			
	солома		КПО		солома		КПО	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
Яровая пшеница	2,38	2,60	2,65	3,97	46,6	46,6	41,2	38,7
Кукуруза	–	–	3,96	4,82	–	–	42,3	40,6
Люцерна	–	–	8,74	9,24	–	–	45,5	43,8
Занятый пар	–	–	2,46	3,09	–	–	39,3	38,6
НСР ₀₅	–	–	0,30	0,64	–	–	1,2	1,8

Проведенный расчет баланса углерода в почве под яровой пшеницей позволил установить, что в умеренно увлажненный 2023 г. с одного гектара эмиссия углерода составляла практически 2,4 т/га, назад с растительными остатками поступило около 2,2 т/га. Это привело к тому, что образовывался отрицательный баланс, который составлял –0,2 т/га (табл. 2). В избыточно увлажненном 2024 г. потери углерода в результате дыхания почвы достигали за вегетацию на 1,0 т/га больше прошлого года, при этом возврат углерода в почву с соломой и корне-поживными остатками был также на 0,5 т/га выше. Несмотря на это, баланс был отрицательным – 0,6 т/га, что в 3 раза выше прошлого года.

В посевах кукурузы в 2023 и 2024 гг. эмиссия углерода за вегетацию составляла 3,2 и 3,7 т/га, с корне-поживными остатками в почву вернулось 1,7 и 2,0 т/га $C_{орг}$, что привело к отрицательной динамики углерода в почве, где потери $C_{орг}$ из почвы достигали 1,5 т/га в умеренно увлажненном и 1,7 т/га в избыточно увлажненном годах.

В посевах люцерны в умеренно увлажненном году потери углерода в результате дыхания почвы достигали 3,8 т/га, в избыточно увлажненном они повышались на 32 % – до 4,6 т/га. Поступление $C_{орг}$ с корне-поживными остат-

ками при этом было примерно одинаковым – 4,0 т/га в 2023 г. и 4,1 т/га в 2024 году. Это привело к тому, что при умеренном уровне увлажнения отмечался положительный баланс углерода в почве, где на 0,2 т/га повышались его запасы, а в избыточно увлажненном году, наоборот, уменьшались на 0,5 т/га.

В занятом пару в 2023 г. дыхание почвы привело к потере 2,0 т/га $C_{орг}$, а в 2024 г. этот показатель снижался до 1,6 т/га. Возврат $C_{орг}$ с корне-поживными остатками составлял при этом 1,0 и 1,2 т/га. Это привело к тому, что в умеренно увлажненном году в занятом пару потери углерода за год достигали 1,0 т/га, а в избыточно увлажненном – 0,4 т/га.

В черном пару была подобная тенденция, где в умеренно увлажненном году отчуждение углерода за год было 1,8 т/га, в избыточно увлажненном – 1,3 т/га. Меньшая интенсивность дыхания в паровых полях, возможно, связана с тем, что в период отсутствия культур на поле избыточные атмосферные осадки способствовали снижению аэрации почвы и уменьшению активности почвенной микробиоты, и, как следствие, ее дыхания, в то время как на занятых под посевами полях поступающая влага хорошо использовалась растениями, что не приводило к негативному влиянию на дыхание почвы.

Таблица 2. Баланс органического углерода при возделывании различных сельскохозяйственных культур и паров, кг/га
Table 2. Organic carbon balance during cultivation of various agricultural crops and fallows, kg/ha

Варианты	Эмиссия углерода за вегетацию		Поступление $C_{орг}$ с побочной продукцией		Баланс $C_{орг}$	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
Яровая пшеница	2,4	3,4	2,2	2,7	-0,2	-0,6
Кукуруза	3,2	3,7	1,7	2,0	-1,5	-1,7
Люцерна	3,8	4,6	4,0	4,1	0,2	-0,5
Занятый пар	2,0	1,6	1,0	1,2	-1,0	-0,4
Черный пар	1,8	1,3	–	–	-1,8	-1,3

Выводы.

1. В умеренно увлажненном году эмиссия углерода в посевах яровой пшеницы варьировала от 4,0 до 24,1 кг С/га в сутки,

под посевами кукурузы и люцерны значения эмиссии углерода были выше на 2,0–11,7 и 4,5–13,7 кг С/га в сутки соответственно, а в паровых полях были ниже – 1,8–8,2 кг С/га в сутки.

В избыточно увлажненный год эмиссия углерода увеличивалась на 22–143 % в посевах яровой пшеницы, кукурузы и люцерны.

2. В умеренно увлажненный год поступление $C_{орг}$ с растительными остатками в посевах яровой пшеницы составляло 2,2 т/га, под кукурузой и занятым паром – 1,7 и 1,0 т/га соответственно, а под люцерной – 4,0 т/га. В избыточно увлажненный год поступление $C_{орг}$ с растительными остатками на всех вариантах было на 0,1–0,5 т/га больше.

3. В умеренно увлажненный год баланс углерода под посевами яровой пшеницы и кукурузой был отрицательным: -0,2 и -1,5 т/га, в паровых полях: -1,0–1,8 т/га. Положительный баланс отмечался лишь в посевах люцерны: +0,2 т/га. В избыточно увлажненный год под посевами яровой пшеницы, кукурузы и люцерны баланс углерода в почве ухудшался, ежегодно потери составляли -0,5–1,7 т/га, тогда как в паровых полях потери углерода из почвы уменьшались до -0,4–1,3 т/га.

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

Библиографический список

1. Абрамов Н. В., Акимова Ю. А., Бакшеев Л. Г., Белкина Р. И., Иваненко А. С., Игловиков А. В., Кабанин И. Б., Казак А. А., Кулясова О. А., Логинов Ю. П., Миллер С. С., Рзаева В. В., Степанов А. Ф., Тоболова Г. В., Федоткин В. А., Фисунов Н. В., Фуртаев К. В., Якубышина Л. И. Система адаптивно-ландшафтного земледелия в природно-климатических зонах Тюменской области. Тюмень: Тюменский издательский дом, 2019. 472 с.
2. Башкин В. Н. Агрогеохимические технологии управления потоками CO_2 в агроэкосистемах. Факторы управления микробным звеном агрогеохимического круговорота // Агрохимия. 2023. № 6. С. 81–96. DOI: 10.31857/S0002188123060042
3. 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
4. Иванов А. В., Замолотчиков Д. Г., Сало М. А., Кондратова А. В., Пилецкая О. А., Брянин С. В. Дыхание почв лесных экосистем юга Дальнего Востока // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1023–1033. DOI: 10.31857/S0032180X23600397
5. Лаврентьева И. Н., Меркушева М. Г., Убугунов Л. Л. Оценка запасов органического углерода и потоков CO_2 в травяных экосистемах Западного Забайкалья // Почвоведение. 2017. № 4. С. 411–426. DOI: 10.7868/S0032180X17040050
6. Романенков В. А., Мешалкина Ю. Л., Горбачева А. Ю., Кренке А. Н., Петров И. К., Голозубов О. М., Рухович Д. И. Карты потенциала секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России // Почвоведение. 2024. № 5. С. 677–692. DOI: 10.31857/S0032180X24050037
7. Савельева А. В. Роль продовольственной проблемы в современной мировой экономике // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2013. Т. 17, № 3. С. 524–539.
8. Свирина В. А., Черногаев В. Г. Влияние различных технологий обработки почвы на плодородие почвы, засоренность и урожайность культур в севообороте // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 66–73. DOI: 10.28983/asj.y2023i10pp66-73
9. Соколова Л. Г., Зорина С. Ю., Белоусова Е. Н., Поморцев А. В., Дорофеев Н. В. Эмиссия CO_2 из почвы при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1262–1273. DOI: 10.31857/S0032180X21100117
10. Суховеева О. Э., Рыжов А. В., Почикалов А. В., Карелин Д. В., Заверткин И. А., Николаев В. А. Влияние возделываемых культур и удобрений на дыхание почвы (Длительный опыт Тимирязевской сельскохозяйственной академии) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2024. Т. 88, № 4. С. 508–520. DOI: 10.31857/S2587556624040041
11. Эседуллаев С. Т., Шмелева Н. В. Особенности аккумуляции азота многолетними бобовыми травами в чистых и смешанных посевах в Верхневолжье // Плодородие. 2016. № 6(93). С. 16–18.
12. Cannon A. J. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. Nature Climate Change. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8> (дата обращения: 25.02.2025). DOI: 10.1038/s41558-025-02247-8
13. Demichev V., Dashieva B. S., Filatov I. I. Characterization of Russian regions by variation in average temperature, precipitation, and agricultural development // Sabrao Journal of Breeding and Genetics. 2024. Vol. 56, № 2. P. 616–627. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.2.14
14. Demin E. Production of carbon dioxide in crops of various seedings and fallows in the conditions of the forest-steppe zone of Western Siberia // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 139, DOI: 10.1051/bioconf/202413913001
15. Eghbal O., Emami H., Reza K. Comparison some physical and chemical characteristics of the soil under cultivation of alfalfa, wheat, barley, cumin and chickpeas. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/386101034> (дата обращения: 25.02.2025).
16. Sukhoveeva O. E. Input of Organic Carbon to Soil with Post-Harvest Crop Residues // Eurasian Soil Science. 2022. № 55. P. 810–818. DOI: 10.1134/S1064229322060126

References

1. Abramov N. V., Akimova Yu. A., Baksheev L. G., Belkina R. I., Ivanenko A. S., Iglovikov A. V., Kabanin I. B., Kazak A. A., Kulyasova O. A., Loginov Yu. P., Miller S. S., Rzaeva V. V., Stepanov A. F., Tobolova G. V., Fedotkin V. A., Fisinin N. V., Furtaev K. V., Yakubysheva L. I. Sistema adaptivno-landshaftnogo zemledeliya v prirodno-klimaticheskikh zonakh Tyumenskoi oblasti [The system of adaptive-landscape agriculture in the natural-climatic zones of the Tyumen region]. Tyumen': Tyumenskii izdatel'skii dom, 2019. 472 s.

2. Bashkin V. N. Agrogeokhimicheskie tekhnologii upravleniya potokami CO₂ v agroekosistemakh. Faktory upravleniya mikrobnym zvenom agrogeokhimicheskogo krugovorota [Agrogeochemical technologies for managing CO₂ in agroecosystems. Factors for managing the microbial link of the agrogeochemical cycle] // *Agrokimiya*. 2023. № 6. S. 81–96. DOI: 10.31857/S0002188123060042
3. Eremin D. I., Demin E. A. Vliyanie dlitel'nogo sel'skokhozyaistvennogo ispol'zovaniya na zapasy organicheskogo ugleroda v chernozeme vyshchelochennom [The effect of long-term agricultural use on organic carbon reserves in leached blackearth] // *Zemledelie*. 2023. № 4. S. 35–39. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-4-35-39
4. Ivanov A. V., Zamolodchikov D. G., Salo M. A., Kondratova A. V., Piletskaya O. A., Bryanin S. V. Dykhanie pochv lesnykh ekosistem yuga Dal'nego Vostoka [Soil respiration in forest ecosystems in the south of the Far East] // *Pochvovedenie*. 2023. № 9. S. 1023–1033. DOI: 10.31857/S0032180X23600397
5. Lavrent'eva I. N., Merkusheva M. G., Ubugunov L. L. Otsenka zapasov organicheskogo ugleroda i potokov SO₂ v travyanykh ekosistemakh Zapadnogo Zabaikal'ya [Estimation of organic carbon reserves and CO₂ in grass ecosystems of Western Transbaikalia] // *Pochvovedenie*. 2017. № 4. S. 411–426. DOI: 10.7868/S0032180X17040050
6. Romanenkov V. A., Meshalkina Yu. L., Gorbacheva A. Yu., Krenke A. N., Petrov I. K., Golozubov O. M., Rukhovich D. I. Karty potentsiala sekvestratsii pochvennogo ugleroda v pakhotnykh pochvakh Rossii [Maps of soil carbon sequestration potential in arable soils of Russia] // *Pochvovedenie*. 2024. № 5. S. 677–692. DOI: 10.31857/S0032180X24050037
7. Savel'eva A. V. Rol' prodovol'stvennoi problemy v sovremennoi mirovoi ekonomike [The role of the food problem in the modern world economy] // *Ekonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki*. 2013. T. 17, № 3. S. 524–539.
8. Svirina V. A., Chernogaev V. G. Vliyanie razlichnykh tekhnologii obrabotki pochvy na plodorodie pochvy, zasorennost' i urozhainnost' kul'tur v sevooborote [The effect of various soil cultivation technologies on soil fertility, weed infestation and crop productivity in crop rotation] // *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*. 2023. № 10. S. 66–73. DOI: 10.28983/asj.y2023i10pp66-73
9. Sokolova L. G., Zorina S. Yu., Belousova E. N., Pomortsev A. V., Dorofeev N. V. Emissiya SO₂ iz pochvy pri vvedenii kratkosrochnoi sideratsii v parovoe pole v usloviyakh lesostepnoi zony Pribaikal'ya [CO₂ emission from soil when introducing short-term green manure into a fallow field in the forest-steppe of the Baikal region] // *Pochvovedenie*. 2021. № 10. S. 1262–1273. DOI: 10.31857/S0032180X21100117
10. Sukhoveeva O. E., Ryzhov A. V., Pochikalov A. V., Karelin D. V., Zavertkin I. A., Nikolaev V. A. Vliyanie vozdel'yaemykh kul'tur i udobrenii na dykhanie pochvy (Dlitel'nyi opyt Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii) [The effect of cultivated crops and fertilizers on soil respiration (Long-term experience of the Timiryazev Agricultural Academy)] // *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2024. T. 88, № 4. S. 508–520. DOI: 10.31857/S2587556624040041
11. Esedullaev S. T., Shmeleva N. V. Osobennosti akumulatsii azota mnogoletnimi bobovymi travami v chistykh i smeshannykh posevakh v Verkhnevolzh'e [Features of nitrogen accumulation by perennial legumes in pure and mixed crops in the Upper Volga region] // *Plodorodie*. 2016. № 6(93). S. 16–18.
12. Cannon A. J. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. *Nature Climate Change*. 2025. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8> (data obrashcheniya: 25.02.2025). DOI: 10.1038/s41558-025-02247-8
13. Demichev V., Dashieva B. S., Filatov I. I. Characterization of Russian regions by variation in average temperature, precipitation, and agricultural development // *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*. 2024. Vol. 56, № 2. P. 616–627. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.2.14
14. Demin E. Production of carbon dioxide in crops of various seedings and fallows in the conditions of the forest-steppe zone of Western Siberia // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 139, DOI: 10.1051/bioconf/202413913001
15. Eghbal O., Emami H., Reza K. Comparison some physical and chemical characteristics of the soil under cultivation of alfalfa, wheat, barley, cumin and chickpeas. 2024. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/386101034> (data obrashcheniya: 25.02.2025).
16. Sukhoveeva O. E. Input of Organic Carbon to Soil with Post-Harvest Crop Residues // *Eurasian Soil Science*. 2022. № 55. P. 810–818. DOI: 10.1134/S1064229322060126

Поступила: 05.03.25; доработана после рецензирования: 16.06.25; принята к публикации: 17.06.25.

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. Демин 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.