

ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭМИССИЮ CO₂ ИЗ ПАХОТНОЙ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Н.А. Воронкова, доктор сельскохозяйственных наук, Н.Ф. Балабанова, кандидат сельскохозяйственных наук

Омский аграрный научный центр,
644012, Омск, просп. Королёва, 26
E-mail: natascha.balabanowa@mail.ru

Исследования проводили с целью определения продуцирования CO₂ из пахотных почв в зависимости от температуры воздуха, количества осадков, возделывания сельскохозяйственных культур и применения минеральных удобрений. Работу выполняли в 2019–2022 гг. в лесостепной зоне Западной Сибири. Объектом исследования была лугово-чернозёмная почва среднетяжелосуглинистая. Отбор почвенных проб выполняли на трех площадках: парующая (без применения удобрений); под яровой мягкой пшеницей по паровому предшественнику с внесением минеральных удобрений в дозе N₁₈P₄₂ на 1 га севооборотной площади и без их применения. Эмиссию CO₂ определяли в режиме оперативного мониторинга с интервалом в семь суток абсорбционным методом. Почва под растениями яровой пшеницы в период их интенсивного роста (18.06–19.07) характеризовалась большими потерями углерода в виде CO₂, чем в паровом поле. Это связано со значительным вкладом в его суммарный сток дыхания корневой системы растений. При снижении влагообеспеченности происходило уменьшение эмиссионной составляющей CO₂, что обусловлено торможением микробиологических процессов в почве. Использование минеральных удобрений в агроценозе увеличило секвестрацию и депонирование органического углерода. Запасы мортмассы в почве под растениями яровой мягкой пшеницы при внесении удобрений возрасли на 11 %, содержание гумуса – на 0,12 %, в сравнении с вариантом без их использования. Одновременно в этом варианте отмечено снижение минерализационных и усиление иммобилизационных процессов, коэффициент минерализации составил 0,69, иммобилизации – 1,44.

INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON CO₂ EMISSIONS FROM ARABLE MEADOW-CHERNOZEM SOIL OF FOREST-STEPPE WESTERN SIBERIA

Voronkova N. A., Balabanova N. F.

Omsk Agrarian Scientific Center,
644012, Omsk, prosp. Koroleva, 26
E-mail: natascha.balabanowa@mail.ru

Studies were carried out to determine the production of CO₂ from arable soils depending on air temperature, precipitation, crop cultivation and the use of mineral fertilizers. The work was carried out in 2019–2022 in the forest-steppe zone of Western Siberia. The object of the study was a meadow-chnozem soil, medium thick, medium humus, heavy loamy. Soil sampling was carried out at three sites: fallow (without fertilizers); under spring soft wheat on a fallow predecessor with the application of mineral fertilizers at a dose of N₁₈P₄₂ per 1 ha of crop rotation area and without their use. CO₂ emission was determined in the operational monitoring mode with an interval of seven days by the absorption method. A comparative assessment of the fallow field and spring wheat during the growing seasons showed that large losses of carbon in the form of CO₂ are typical for soils under spring wheat plants and are associated with a significant contribution to the total respiration runoff of the plant root system during the period of intensive growth (June 18–July 19). With a decrease in moisture availability, there was a decrease in the emission component of CO₂, which is due to the inhibition of microbiological processes in the soil. The use of mineral fertilizers in the agroecosystem increased sequestration and deposition of organic carbon. The stocks of mortmass in the soil under the plants of spring soft wheat increased by 11% when fertilizing, the humus content increased by 0.12% abs. units in comparison with the option without fertilizers. Microbiological studies have established that in this variant there was a decrease in mineralization processes by 10% and an increase in immobilization, the mineralization coefficient was 0.69, and the immobilization coefficient was 1.44.

Ключевые слова: агроценоз, эмиссия CO₂, органический углерод, лугово-черноземная почва, экологические факторы.

Key words: agroecosystem, CO₂ emission, organic carbon, meadow-chnozem soil, environmental factors.

Интенсивность потока CO₂ с поверхности почвы – один из важных показателей углеродного цикла наземных экосистем. Количество углекислого газа, выделяемое почвами, зависит от определенных экологических факторов [1, 2]. Из биологических факторов – это, прежде всего пул микробиоценоза и дыхание корней растений, из абиотических – температура воздуха и почвы, количество осадков и др. В современных условиях большое внимание уделяют агрогенным факторам (система удобрения, обработки почвы и др.), с использованием которых в зависимости от научно обоснованного применения можно целенаправленно регулировать потоки углерода [3, 4].

Системное взаимодействие этих факторов проявляется в агробиоценозах, характеризующихся динамичным балансом органического вещества. Снижение содержания углерода в пахотных почвах при нерациональном

использовании превращает агроэкосистему в источник парниковых газов, в том числе диоксида углерода, а повышение продуктивности агроценозов, естественное или искусственное восстановление травянистой растительности способствует связыванию атмосферного CO₂ и ослаблению парникового эффекта в рамках региона и планеты в целом [5, 6].

Секвестрация и депонирование органического углерода – сложный поликомпонентный процесс, который зависит от качественных и количественных характеристик органического вещества почвы. Оно гетерогенно по составу и условно делится на два пула: легкоминерализуемые органические соединения и устойчивые к биодеградации гумусовые вещества [7, 8, 9]. Процессы минерализации и гумификации в почвах протекают одновременно, легкоминерализуемые (лабильные) органические вещества почвы, служат материалом для

разложения и эмиссии CO₂ в атмосферу и одновременно источником углерода для синтеза гумуса.

В условиях лесостепной зоны Западной Сибири интенсивность продуцирования CO₂ почвой при различных уровнях интенсификации и типах землепользования слабо изучена, имеются лишь фрагментальные сведения о влиянии этих факторов на углеродный цикл агроэкосистем [10, 11].

В связи с изложенным, цель исследования – количественное определение продуцирования CO₂ пахотной почвой в зависимости от экологических факторов.

Методика. Работу проводили в 2019–2021 гг. на опытном полигоне лаборатории агрохимии ФГБНУ «Омский АНЦ» в южной лесостепной зоне Западной Сибири в стационарном опыте, заложенном в 1987 г. на основе пятипольного зернопарового севооборота: пар чистый – яровая пшеница – соя – яровая пшеница – ячмень. Севооборот развернут во времени и пространстве.

Территориально опытный участок расположен на Евразийском континенте (географическая привязка 55,01° с.ш. и 73,23° в.д.) в лесостепной зоне Западно-Сибирской низменности. Климат региона – типично континентальный с продолжительной зимой и коротким жарким летом, поздними весенними и ранними осенними заморозками. Западно-Сибирская низменность с запада ограждена Уральским хребтом, а с востока – Средне-Сибирским нагорьем, совершенно открыта с севера и мало защищена с юга. В результате этого на территорию свободно вторгаются холодные арктические воздушные массы и теплые сухие из пустынь и степей Казахстана и Средней Азии. Для лесостепной зоны Западной Сибири характерны холодная и суровая зима, жаркое лето, ветреная и сухая весна, непродолжительная осень, короткий безморозный период, резкие колебания температуры от месяца к месяцу, от одного дня к другому и даже в течение суток. Годовая амплитуда температуры воздуха достигает 80...90 °С, что подчеркивает резкую континентальность местного климата. Среднегодовая сумма осадков в южной лесостепи Омской области составляет 300...320 мм.

Объект исследования – пахотная лугово-черноземная среднесиловая среднетяжелосуглинистая почва. Содержание в пахотном слое подвижного фосфора и калия (по Чирикову) составляет 105...128 и 350...420 мг/кг соответственно, обменного Ca²⁺ и Mg²⁺ (по ГОСТ 26487-85) – 88 и 11 ммоль/100 г почвы соответственно, рН_{водн} (по ГОСТ 26483-85) – 6,7.

Почвенную секвестрацию органического углерода и депонирование его под растениями яровой мягкой пшеницы оценивали по количеству мортмассы и содержанию гумуса в почве в зависимости от применения минеральных удобрений.

Эмиссию CO₂ определяли в режиме оперативного мониторинга с интервалом в 7 суток в период с 9.06 по 2.09 2019–2021 гг. в трехкратной повторности абсорбционным методом [12]. Использовали полипропиленовые сосуды (d=10 см, h=15 см) с крышками. Сосуд врезали в почву на глубину 5 см и оставляли в таком положении на протяжении всего периода измерений. Внутри ставили чашечку (d=5 см) с 10 мл 1 н NaOH. Сосуд плотно закрывали крышкой на 24 ч, после экспозиции чашечку извлекали и остаток щелочи оттитровывали раствором 0,1 н HCl по фенолфталеину. Выделенное почвой за экспозицию количество CO₂ рассчитывали с учетом холодно-титрования, для чего щелочь на период экспозиции помещали в сосуд без почвы объемом равным объему свободного пространства в рабочем сосуде. Содержание углерода в почве (слой 0...25 см) определяли по методу Тюрина в модификации Никитина с колориметрическим окончанием по Орлову-Гриндель, мортмассы – путем отмывки негумифицированного органического вещества водой на сите с диаметром ячеек 0,25 мм [13].

Для определения биологической активности отбор почвенных проб осуществляли на глубину 0...20 см. Исследования выполнены методом инкубации микроорганизмов на твердых питательных средах: бактерий-сапрофитов – на мясопептонном агаре (МПА), микроорганизмов, потребляющих азот в минеральной форме, – на крахмало-аммиачном агаре (КАА) [14].

Наблюдения за эмиссией CO₂ с поверхности почвы проводили во взаимосвязи с погодными условиями (тем-

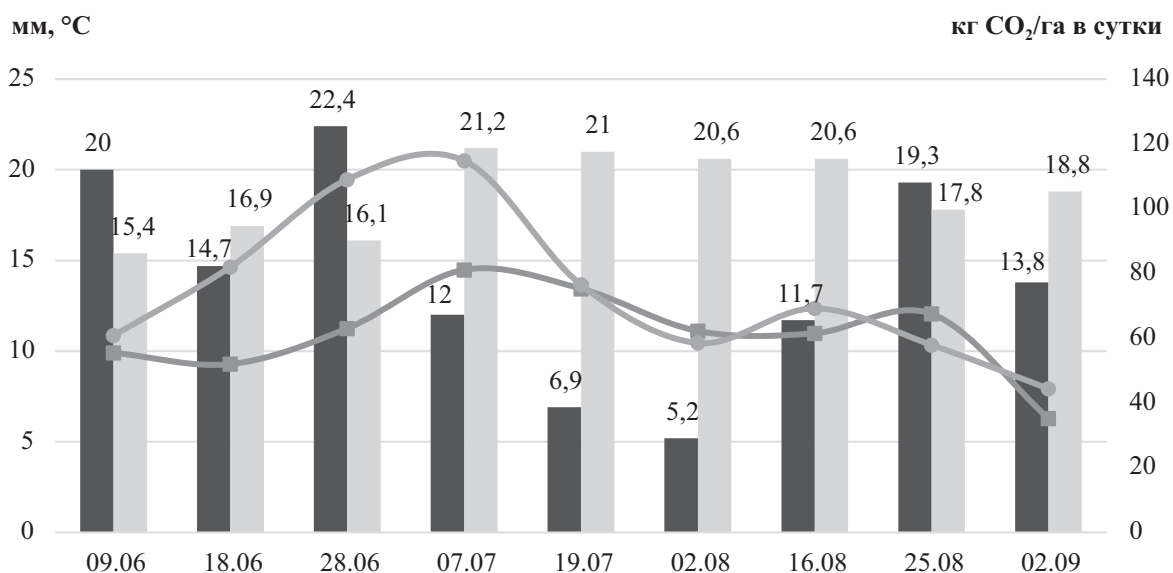


Рис. 1. Динамика эмиссии CO₂ из пахотной почвы за вегетационный период (в среднем 2019–2021 гг.): ■ – сумма осадков, мм; ■ – температура воздуха, °C; ■ – парующаяся площадка; ● – площадка под мягкой пшеницей (без удобрений).

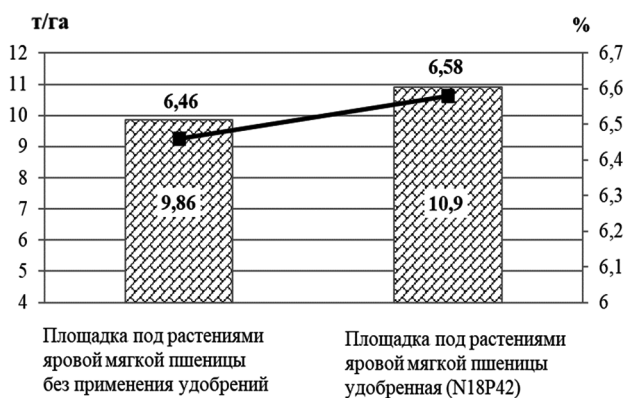


Рис. 2. Запасы мортмассы ($HCP_{05} = 0,86$ т/га) и содержание гумуса ($HCP_{05} = 0,08$ %) в пахотной почве (слой 0...25 см): – запасы мортмассы, т/га; – содержание гумуса в почве, %.

пературы воздуха, количества осадков), возделывания сельскохозяйственных культур и применения минеральных удобрений. Отбор почвенных проб выполняли на трех площадках: парующая (без применения удобрений); под яровой мягкой пшеницей сорта Мелодия по паровому предшественнику с внесением минеральных удобрений в дозе $N_{18}P_{42}$ на 1 га севооборотной площади и без их применения.

Результаты и обсуждение. В литературе имеются данные, что продуцирование CO_2 почвами различно в течение вегетационного периода и зависит от видового состава и густоты растительного покрова, состояния микробиоценоза и др. [11, 15, 16]. Результаты исследований на опытном полигоне показали, что при начальном определении (в первой декаде июня, в фазе кущения) количество выделяемого из почвы диоксида углерода по вариантам опыта существенно не различалось и составляло 55,5...60,8 кг CO_2 /га в сутки (рис. 1). В фазе цветения (18.06-19.07) при активном росте культуры продуцирование CO_2 под растениями яровой пшеницы было выше, чем на паровом участке. Это объясняется в первую очередь значительным вкладом в суммарный сток CO_2 дыхания корневой системы растений. В последний летний месяц дифференциации по эмиссии CO_2 в вариантах опыта не наблюдали.

Анализ динамики эмиссии CO_2 за вегетационный период в зависимости от тепло- и влагообеспеченности отчетного периода показал, что при снижении количества осадков с 19.07 по 16.08 (фаза колошения, начала налива зерна) происходило плавное уменьшение эмиссионной составляющей CO_2 . Складывающиеся в этот период исследований условия, высокая температура воздуха и низкая полевая влагемкость, вызвали торможение микробиологических процессов в почве, снизив тем самым почвенное дыхание.

Анализируя количественные параметры эмиссии CO_2 , необходимо рассматривать функционал почвы как основного ландшафтообразующего элемента биоценоза, так как ее растительный покров служит неотъемлемым компонентом, определяющим физико-химические и биологические свойства педосферы. Агроценозы, по сравнению с естественными растительными формациями, характеризуются одновидовым составом растений и отчуждением значительной части продукции, что сказывается на количестве поступающего в почву растительного материала [13], который способствует пополнению фонда лабильного органического вещества (ЛЮВ).

Внесение минеральных удобрений под яровую пшеницу обеспечивало увеличение сбора зерна более чем 30 %. Как правило, в совокупности с зерновой продуктивностью формируется соответствующее количество дополнительного органического вещества (солома, корни и др.). Это и определяет приходную статью почвенного органического углерода. Запасы мортмассы в почве под растениями яровой мягкой пшеницы при внесении удобрений возрастали на 11 % (рис. 2). Это дает возможность говорить о повышении секвестрации органического углерода при улучшении условий минерального питания культуры. Содержание гумуса в почве на этой опытной площадке увеличилось, в сравнении с соответствующим вариантом без удобрений, на 0,12 %. Прослеживалась тенденция к депонированию органического углерода. Так как содержание гумуса – консервативный показатель почвенного плодородия, оценку влияния агрогенных факторов необходимо осуществлять через более широкий временной интервал.

Направленность и превалирование почвенных процессов (минерализация или иммобилизация) зависит, по мнению В.М. Семенова [17], от микробиологического пула. Почвенные микроорганизмы – обязательный компонент любой агроисотемы. Количество их в хорошо окультуренной почве может достигать нескольких миллиардов в 1 г почвы, а общая масса – 10 т/га. Они обладают мощным ферментативным аппаратом, выполняют многообразные функции в круговороте веществ, обеспечивая постоянное функционирование экосистем в целом [18, 19].

Изучаемая лугово-черноземная почва характеризовалась высокой биогенностью. За период исследований общая численность микроорганизмов, растущих на МПА, варьировала от 24,2 до 33,7 млн КОЕ/г, на КАА – 18,4...23,4 млн КОЕ/г (см. табл.). Биологическая активность почвы в большей степени зависла от фона удобренности, систематическое внесение удобрений в севообороте позволило увеличить численность бактерий – аммонификаторов, растущих на МПА, на 39 %, усваивающих минеральные формы азота на КАА – на 27 %, в сравнении парующей площадкой без применения удобрений. На сегодняшний день имеется достаточно много работ, в которых оценивается влияние удобрений на плодородие почвы по изменению общей численности микроорганизмов [18, 20]. Ее увеличение при внесении удобрений, по мнению И.Н. Шаркова [13] и других учёных, связано с наибольшим поступлением

Биологическая активность лугово-черноземной почвы (в среднем за вегетацию 2019-2021 гг.)

Вариант	Бактерии, млн КОЕ/г		КАА/МПА	МПА/КАА
	на МПА	на КАА		
Парующая площадка (фон без удобрений)	24,2	18,4	0,76	1,32
Площадка под яровой мягкой пшеницей, предшественник – пар (фон без удобрений)	26,8	20,1	0,75	1,33
Площадка под яровой мягкой пшеницей, предшественник – пар, (фон внесение минеральных удобрений в дозе N18P42)	33,7	23,4	0,69	1,44
HCP_{05}	6,3	4,5		

в почву энергетического материала в виде листового опада, корне-поживных остатков растений.

К важным показателям интенсивности микробиологических процессов трансформации азотсодержащих соединений относят коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и иммобилизации (МПА/КАА). Увеличение соотношения КАА/МПА свидетельствует о преобладании в почве процесса минерализации и интенсивном использовании азота почвы, а его снижение – об усилении гумификационных процессов [18]. В наших исследованиях при внесении минеральных удобрений в дозе $N_{18}P_{42}$ отмечалось снижение минерализационных процессов на 10% и усиление иммобилизационных, что вполне закономерно, запасы мортмассы и содержание гумуса и под яровой мягкой пшеницей, высеваемой по паровому предшественнику на удобренном фоне были наибольшими. Коэффициент минерализации в этом варианте был наименьшим (0,69), а иммобилизации самым высоким (1,44). Следовательно, оптимизация минерального питания сельскохозяйственных культур путем внесения минеральных удобрений позволяет не только повышать продуктивность агроценозов, но и сохранять почвенное плодородие пополняя фонд лабильного органического углерода.

Таким образом, продуцирование диоксида углерода лугово-черноземной почвой в условиях лесостепи Западной Сибири зависит от погодных условий и типа землепользования. Эмиссия углекислого газа почвой в севообороте под растениями яровой мягкой пшеницы выше, чем в почве парового участка. Систематическое применение удобрений обеспечивает депонирование органического углерода благодаря активизации почвенной биоты, обеспечивающей превалирование процессов сохранения и воспроизводства почвенного плодородия.

Литература.

1. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский и др. / М.: Наука, 2007. 315 с.
2. Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Шапова Л.Н. Оценка гумусного состояния и продуцирования CO₂ почвами природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России // Почвоведение. 2017. №1. С. 48-55.
3. *Effects of Environmental Drivers and Agricultural Management on Soil CO₂ and N₂O Emissions* / M. Dencs, A. Horel, I. Bogunovic et al. // *Agronomy*. 2021. No. 11(1). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/1/54> (дата обращения: 15.02.2022).
4. Семенова М.В., Ильин Ю.М. Влияние оросительной мелиорации на эмиссию углерода с наземных геосистем Селенгинской Даурии // *Вестник КрасГАУ*. 2017. №6. С. 121-128.
5. Семенов В.М., Козут Б.М., Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС. 2015. 233 с.
6. Meena R.S., Kumar S., Yadav G.S. *Soil carbon sequestration in crop production, Nutrient dynamics for sustainable crop production*. Singapore: Springer Nature. 2019. 39 p.
7. Курганова И.Н., Семенов В.Н., Кудеяров В.Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах // *Доклады академии наук*. 2019. №6. С. 646-650.
8. *Содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве при длительном применении удобрений* / Н.Ф. Балабанова, Н.А. Воронкова, В.А. Волкова и др. // *Земледелие*. 2020. №2. С. 7-9.
9. Чупрова В. В. Запасы, состав и трансформация органического вещества в пахотных почвах Средней Сибири // *Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2017. № 90. С. 96-115.
10. Титлянова А.А., Наумов А.В. Потери углерода из почв Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*. 1995. №11. С. 1357-1362.
11. Шепелев А.Г., Самохвалова Л.М. Взаимосвязи дыхания чернозема с составом органического вещества почвы в условиях центральной лесостепи Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета*. 2017. № 37. С.6-16.
12. Шарков И.Н. Абсорбционный метод определения эмиссии CO₂ из почв // *Методы исследований органического вещества почв*. М.: РАСХН, ГНУ ВНИП-ТИОУ, 2005. С. 401-407.
13. И.Н. Шарков, Л.М. Самохвалова, А.Г. Шепелев. Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири // *Почвоведение*. 2014. №4. С. 473-479.
14. Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. *Практикум по микробиологии / 4-е изд., перераб. и доп.* М.: Колос, 1993. 175 с.
15. Liang L.L., Grantz D.A., Jenerette G.D. Multivariate regulation of soil CO₂ and N₂O pulse emissions from agricultural soils // *Glob. Chang. Biol*. 2016. No. 22. P. 1286-1298.
16. *Response of soil surface greenhouse gas fluxes to crop residue removal and cover crops under a corn-soybean rotation* / B.R. Wegner, K.S. Chalise, S. Singh, et al. // *Journal of Environmental Quality*. 2018. No. 5. P. 1146-1154.
17. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // *Агрохимия*. 2020. №6. С. 78-116.
18. *Биологическая активность лугово-черноземных почв Омского Прииртышья* / О.Ф. Хамова, Л.В. Юшкевич, Н.А. Воронкова и др. Омск: Омскбланкиздат, 2019. 94 с.
19. Звягинцев Д. Г., Бабьева Н.П. *Биология почв*. М.: МГУ, 2005. 445 с.
20. Добровольский П.В., Никитин Е.Д. *Функции почв в биосфере и экосистемах*. М.: Наука, 1990. 261 с.

Поступила в редакцию 11.04.2022

После доработки 23.05.2022

Принята к публикации 27.06.2022