

УДК 631.433.3

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЛЫВАЕМЫХ КУЛЬТУР И УДОБРЕНИЙ НА ДЫХАНИЕ ПОЧВЫ (ДЛИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ ТИМИРЯЗЕВСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ)

© 2024 г. О. Э. Суховеева^{1, *}, А. В. Рыжов¹, А. В. Почикалов¹,
Д. В. Карелин¹, И. А. Заверткин², В. А. Николаев²

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2024 г.

После доработки 19.06.2024 г.

Принята к публикации 18.07.2024 г.

Исследование посвящено оценке влияния возделываемых культур и вносимых удобрений на дыхание почвы — самый мощный поток CO_2 из наземных экосистем в атмосферу. В качестве объекта выступал Длительный полевой опыт Тимирязевской сельскохозяйственной академии, где для проведения измерений были выбраны ключевые культуры Нечерноземья — озимая рожь, ячмень, картофель, а также чистый пар, которые включены в севооборот с известкованием и внесением различных вариантов удобрений. Измерения проводились методом закрытых динамических камер с помощью портативных инфракрасных газоанализаторов с мая 2023 по апрель 2024 г. Они были разделены на две серии: вегетационный период и период с оголенной почвой, границей между которыми служила вспашка. При сопоставлении дыхания почвы за вегетационный период по отдельным делянкам было получено, что для большинства из них характерен большой разброс значений, а скорости эмиссии CO_2 статистически не отличаются. Выявленные для некоторых делянок зависимости дыхания почвы от температуры воздуха и влажности почвы не носят всеобщий характер. Двухфакторный дисперсионный анализ показал значимое влияние культуры и удобрений на дыхание почвы по отдельности, но несущественность их совместного воздействия. Скорость эмиссии CO_2 из почвы закономерно возрастала по вариантам: без удобрений < NPK < NPK + навоз, а при осреднении по культурам увеличивалась в ряду картофель < чистый пар < ячмень < озимая рожь. Для содержания органического углерода и общего азота в почве выявленные последовательности повторялись для вариантов удобрений и не повторялись для культур, где более важными факторами были признаны предшественник в севообороте и положение участка в микрорельефе. В период с оголенной почвой осреднение проводилось по вариантам удобрений, значимых различий между которыми не было выявлено, а по количественным оценкам дыхание почвы под снежным покровом было ниже в 10–20 раз, чем в вегетационный период.

Ключевые слова: эмиссия CO_2 из почвы, озимая рожь, ячмень, картофель, чистый пар, органический углерод, общий азот, критерий Манна-Уитни, PERMANOVA

DOI: 10.31857/S2587556624040041 EDN: RQFVAX

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Дыхание почвы, или эмиссия CO_2 из почвы, — один из важнейших потоков в цикле углерода, направленных из экосистем в атмосферу, а также один из ключевых показателей здоровья и плодородия почвы (Ward et al., 2017). Этой теме посвящено множество исследований, но даже после двух десятилетий ее изучения, несмотря на несомненные успехи, остается много неопределенностей (Bond-Lamberty et al., 2024).

Дыхание почвы состоит преимущественно из дыхания корней (автотрофного) и дыхания микроорганизмов (гетеротрофного). Дыхание корней предопределяется корневой биомассой и скоростью переноса продуктов фотосинтеза из листьев. Дыхание микроорганизмов является результатом процессов разложения, которые зависят от количества и качества органических соединений, популяционной динамики различных групп микроорганизмов и физико-химиче-

ских свойств почвы, включая ее влажность, температуру, снабжение кислородом, кислотность и окислительно-восстановительный потенциал (Rochette and Hutchinson, 2005).

В агроценозах дыхание пахотных почв определяется как природными, так и антропогенными факторами. Среди ключевых факторов, помимо температуры почвы и воздуха, влажности почвы, исследователи называют содержание органического углерода в верхнем слое почвы, которое в некоторых случаях объясняет более 90% дисперсии ее дыхания (Li et al., 2019). К важным факторам, определяющим почвенное дыхание, также относятся содержание аммонийного и аммиачного азота (Sosulski et al., 2021), глубина почвенных горизонтов, крутизна склона, доля илистой фракции (Adhikari et al., 2023). Среди антропогенных факторов следует особенно отметить внесение удобрений; оно приводит к увеличению разнообразия состава почвенного бактериального сообщества и, как следствие, к усилению ее дыхания (Wang et al., 2022), но временной эффект продолжается не более двух недель, после чего уровень дыхания снижается до исходных значений (Kulachkova et al., 2023). Внутрисезонная динамика эмиссии CO_2 из пахотных почв также зависит от стадии роста растений, ширины междурядий и обработки почвы, поскольку вспашка из-за перемешивания слоев почвы способствует усилению разложения растительных остатков и, соответственно, эмиссии диоксида углерода (Zapata et al., 2021).

Учесть все многообразие названных факторов в реальных производственных условиях и их влияние на почвенное дыхание — чрезвычайно трудоемкая задача, поэтому подобные идеи могут быть реализованы только в рамках длительных полевых опытов (Ward et al., 2017), которые могут воссоздать полнофакторный эксперимент. На сегодняшний день в мире насчитывается 14 длительных полевых опытов, возраст которых превышает 100 лет. Старейшему из них — Ротамстеду (Англия) — уже более 180 лет, а возраст Гриньона (Франция), Иллинойса (США) и Галле (Германия) приближается к 150 годам (Мазиров, Арефьева, 2012). Изначально они создавались для того, чтобы на компактной территории оценить влияние природных (погодные условия, характеристики почвенного покрова, водный режим) и антропогенных (внесения удобрений, мелиорации, севооборота, подбора сортов, агротехники) факторов на урожайность культур и сохранение почвенного плодородия. Сегодня в опытах изучают влияние таких факторов, как разные варианты удобрений (Cerhanová et al., 2006), влияние севооборота и бессменных посевов (Завьялова и др., 2020; Sosulski et al., 2021), вспашка и система нулевой обработки (Gelybó et al., 2022).

Длительные опыты дают возможность отбирать полевые образцы для оценки характеристик растений и почвы, особенно для изучения тех свойств, изменения которых происходят медленно и влияют на плодородие. Архивные материалы являются бесценным источником информации для будущих исследований, а также для построения моделей, описывающих процессы, происходящие в системе “почва—растение” (Johnston and Poulton, 2018). Несмотря на то, что длительные опыты достаточно дороги и требуют многолетней логистической поддержки, они, тем не менее, являются наиболее экономически эффективным методом исследования, поскольку полученные научные знания позволяют не только повысить урожайность и качество продукции, но и снизить негативное воздействие сельского хозяйства на окружающую среду, поддержать качество почвы и сохранить природные ресурсы (Körschens, 2006).

В рамках нашего исследования была поставлена цель определить влияние двух важнейших факторов — вида возделываемой культуры и типа вносимых удобрений — на дыхание пахотной почвы.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования выступал Длительный полевой опыт Тимирязевской сельскохозяйственной академии (ТСХА). Он заложен в 1912 г. профессором А.Г. Дояренко с целью оценки влияния типа вносимых удобрений, наличия практики известкования и севооборота на урожайность сельскохозяйственных культур (Мазиров, Сафонов, 2010). Площадь участка составляет 1.5 га, площадь учетной делянки 50 м². Опыт разделяется на две части — бессменные посевы и севооборот. Схема чередования культур: черный пар—озимая рожь—картофель—ячмень—клевер—лен.

Поперек полей наложены варианты удобрений (9 вариантов в севообороте и 11 вариантов на бессменных посевах): N, P, K, 0 (без удобрений), NP, NK, PK, NPK + навоз, NPK и дополнительно на бессменных посевах навоз и 0. С 1973 г. на всех делянках четных полей севооборота вносят полное минеральное удобрение NPK (и учитывается последствие вносимых ранее вариантов удобрений), а варианты дифференцированного удобрения сохраняются только на нечетных полях. Дозы удобрений за более чем 100-летний период также неоднократно менялись, и на сегодняшний день они составляют 100 кг N/га в виде аммиачной селитры, 150 кг P/га в виде двойного суперфосфата, 120 кг K/га в виде хлористого калия, а также 20 т/га навоза. На продольной половине каждой делянки производится известкование

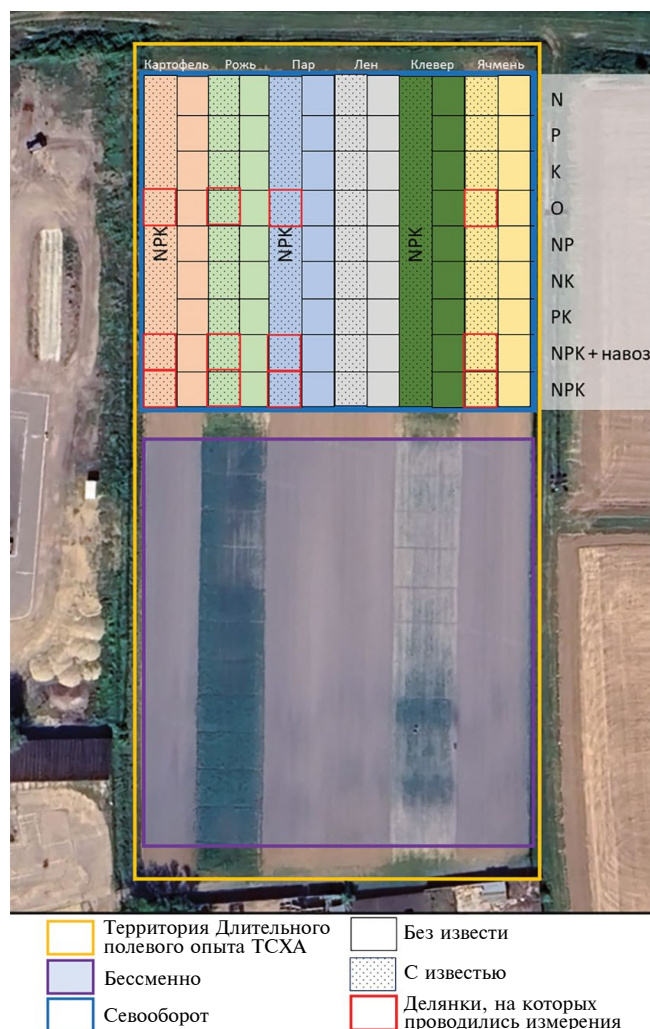


Рис. 1. Схема Длительного полевого опыта Тимирязевской сельскохозяйственной академии (ТСХА) с расположением исследуемых делянок в 2023 г.

почвы один раз за ротацию по величине гидролитической кислотности (4,5 т/га), вносится доломитизированный известняк (Мазиров, Сафонов, 2010). Последний раз известкование проводилось осенью 2022 г.

Почвы участка старопашотные, находятся под пашней более 200 лет. Несмотря на небольшую площадь Опыта, его почвенный покров довольно пестрый и представлен тремя типами почв (Хитров, 2012): агродерново-подзолистыми Stagnic Cutanic Albeluvisol (Siltic, Eutric, Ruptic), агродерново-подзолами иллювиально-железистыми Stagnic Albic Podzol (Siltic, Eutric, Ruptic), агроземами Haplic Regosol (Siltic, Eutric). Причем первый тип преимущественно встречается на бессменных посевах, а второй и третий — на территории севооборота. Мощность антропогенно преобразованного поверхностного горизонта, который когда-либо подвергался механической обработке, варьирует от 25 до 55 см (Хитров, 2012).

Для проведения измерений была выбрана территория севооборота, как самая близкая к реальным производственным условиям, и подобраны наиболее значимые для Нечерноземья культуры — озимая рожь, ячмень и картофель, а также чистый пар. Следует отметить, что в 2023 г. картофель и чистый пар попали на четные поля, где нет разделения по вариантам удобрений, и на все делянки вносится полное минеральное удобрение $N_{100}P_{150}K_{120}$, а озимая рожь и ячмень попали на нечетные поля, где удобрения вносятся по девяти вариантам. Из них были выбраны три контрастных: полное минеральное удобрение (вариант $N_{100}P_{150}K_{120}$, далее по тексту NPK), сочетание минеральных и органических (вариант $N_{100}P_{150}K_{120}$ + навоз 20 т/га, далее по тексту NPK + навоз) и вариант без удобрений. Таким образом, всего анализировалось 12 делянок, все с внесением извести (рис. 1).

Измерения проводились с мая 2023 г. по апрель 2024 г. с периодичностью раз в две недели в вегетационный период и раз в месяц в период оголенной почвы в пятикратной повторности на каждой делянке. Значимым рубежом между сезонами была признана вспашка: в вегетационный период (май–сентябрь) осреднение проводилось как по культурам, так и по вариантам удобрений; а после вспашки (октябрь–апрель) осреднение выполнялось только по вариантам удобрений, поскольку почва была перемешана между участками с разными культурами. Общий объем выборки составил 108 осредненных значений за вегетационный период и 24 осредненных значения за период с оголенной почвой.

Измерения эмиссии CO_2 из почвы проводились по единой стандартизированной методике (Курганова и др., 2024). Применялся метод закрытых динамических камер, использовались портативные инфракрасные CO_2 -анализаторы на основе датчика AZ 77535 (AZ Instruments, Тайвань), модифицированные для полевых работ (патент 174321 U1). На каждой делянке устанавливались пять непрозрачных цилиндрических ПВХ-камер площадью 90 см² и высотой 20 см: для озимой ржи и ячменя в междурядьях, для картофеля на вершинах гребней, на чистом пару в случайно выбранных точках. Одновременно оценивалась температура воздуха и температура почвы на глубинах 5 и 10 см (HI 98509, Hanna Instruments, США), а также объемная влажность почвы (SM 150 Kit, Delta-T, Великобритания).

В июле на каждой делянке отбирались смешанные пробы почвы из слоя 0–20 см. В них после высушивания, просеивания и обработки соляной кислотой определялось содержание органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота ($N_{общ}$) с помощью элементного CHNS-анализатора Vario EL Cube (Elementar, Германия) на базе Центра коллективного пользования “Лаборатория

радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН". Дополнительно измерялся водный pH почвенных образцов (HI 98121, Hanna instruments, США).

Статистическая обработка результатов проводилась в программе PAST (Hammer et al., 2001). Использовались следующие методы:

- корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона, уровень значимости $p = 0.05$) для оценки зависимости скорости дыхания почвы от гидротермических показателей среды (температура воздуха и почвы, объемная влажность почвы, pH);
- множественное сравнение с помощью критерия Манна-Уитни (с последовательной поправкой Бонферрони; уровень значимости $p = 0.05$) для сопоставления скорости дыхания почвы под разными культурами и вариантами удобрений. Этот метод был применен ввиду того, что рассматривались небольшие выборки с разными групповыми дисперсиями;
- перестановочный двухфакторный дисперсионный анализ (two-way PERMANOVA) для разделения и оценки значимости влияния двух факторов на дыхание почвы – возделываемой культуры и вносимых удобрений (применен только для вегетационного сезона; уровень значимости $p = 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ по делянкам. Графический анализ дыхания почвы на 12 целевых делянках (рис. 2) показывает, что для каждой из них характерен достаточно большой разброс значений. Тем не менее дисперсии пересекаются, а уровни медиан расположены относительно близко друг к другу ($0.063\text{--}0.178 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), независимо от вариантов вносимых удобрений; средние значения чаще всего больше медиан ($0.074\text{--}0.253 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$). Исключение составляет озимая рожь в варианте NPK + навоз (в среднем $0.430 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), где эмиссия CO_2 из почвы существенно превышает значения в других ценозах.

Попарное непараметрическое сравнение показывает, что дыхание почвы в вегетационный период на большинстве делянок с различными культурами и удобрениями действительно не отличается друг от друга: из 66 сравниваемых пар значимая разница была отмечена только для 21 пары, т.е. менее, чем для трети (табл. 1). Наибольшее количество отличий, как и ожидалось, было получено для дыхания почвы под озимой рожью в варианте NPK + навоз. Немного меньшее количество отличающихся пар (по пять) отмечено для эмиссии CO_2 в агроценозах ячменя в варианте NPK + навоз, а также для картофеля при сплошном внесении NPK с различным последствием. И наоборот, практически полное

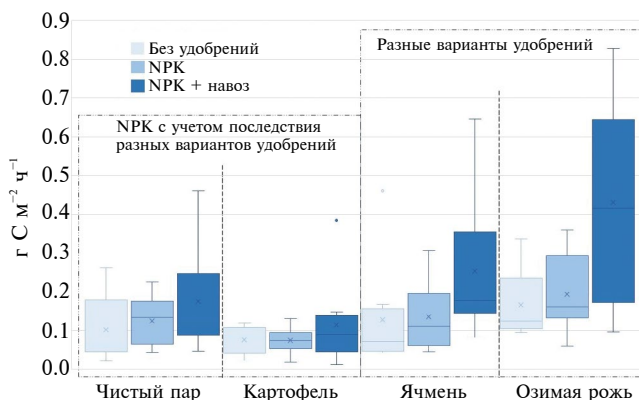


Рис. 2. Дыхание почвы в вегетационный период с разделением по делянкам.

совпадение эмиссии CO_2 из почвы со всеми другими делянками наблюдалось для ячменя в вариантах NPK и без удобрений, а также для чистого пара при сплошном внесении NPK.

Получены сильные положительные корреляции эмиссии CO_2 из почвы с гидротермическими характеристиками среды (табл. 2). Однако какую-то общую тенденцию влияния температуры и влажности на дыхание почвы выделить нельзя, поскольку разные культуры и разные варианты удобрений демонстрируют здесь существенные отличия. Для делянок со сплошным внесением NPK хорошо выражена зависимость эмиссии CO_2 из почвы от температуры воздуха; а среди них, для ранее не удобрявшихся посевов значима связь с температурой почвы на разных глубинах. Для ржи и картофеля существенна зависимость дыхания почвы от ее влажности. В то же время для ячменя не было получено ни одной значимой корреляции. Также не отмечено зависимости дыхания почвы от величины pH. Это связано с тем, что этот показатель слабо меняется в пределах Опыта, оставаясь в диапазоне 6.0–6.7 (реакция почвенного раствора слабокислая и близкая к нейтральной), что является следствием известкования.

Анализ по факторам. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (табл. 3) показывают, что для делянок под чистым паром и картофелем, где применяется сплошное внесение NPK, дыхание почвы закономерно зависит только от возделываемой культуры. Тогда как для озимой пшеницы и ячменя, где есть разделение по вариантам вносимых удобрений, и культура, и удобрения имеют значимое влияние на поток CO_2 из почвы, хотя их парное воздействие несущественно.

Сходный вывод можно сделать, если представить результаты сравнения графически (рис. 3). При осреднении по культурам эмиссия CO_2 из почвы увеличивается в ряду картофель < пар < ячмень < рожь. Низкое дыхание почвы

Таблица 1. Результаты попарного сравнения дыхания почвы на исследуемых делянках в вегетационный период

Культура	Вариант удобрений	NPK с последствием разных вариантов удобрений						Разные варианты удобрений					
		Чистый пар			Картофель			Ячмень			Озимая рожь		
		NPK (без удобрений)	NPK (NPK) (NPK)	NPK (NPK + навоз)	NPK (без удобрений)	NPK (NPK) (NPK)	NPK (NPK + навоз)	Без удобрений	NPK	NPK + навоз	Без удобрений	NPK	NPK + навоз
Чистый пар	NPK (без удобрений)*	–	0.427	0.133		0.930	0.480	0.736	0.360	0.038	0.064	0.112	0.004
	NPK (NPK)	–	–	0.566		0.085	0.480	0.336	0.962	0.061	0.427	0.233	0.010
	NPK (NPK + навоз)	–	–	–	0.034	0.019	0.216	0.149	0.665	0.269	0.825	0.401	0.027
Картофель	NPK (без удобрений)	–	–	–		0.724	0.330	0.885	0.163	0.003	0.004	0.002	0.001
	NPK (NPK)	–	–	–		–	0.289	0.885	0.163	0.002	0.003	0.004	0.001
	NPK (NPK + навоз)	–	–	–		–	–	0.596	0.665	0.024	0.093	0.052	0.003
Ячмень	Без удобрений	–	–	–		–	–	–	0.344	0.031	0.092	0.075	0.006
	NPK	–	–	–		–	–	–	–	0.128	0.361	0.163	0.011
	NPK + навоз	–	–	–		–	–	–	–	–	0.248	0.413	0.178
Озимая рожь	Без удобрений	–	–	–		–	–	–	–	–	–	0.331	0.022
	NPK	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	0.034
	NPK + навоз	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	–

Примечания: 1) представлены величины уровня значимости *p* для критерия Манна-Уитни. Значимые отличия (*p* < 0.05) выделены красным;
2) * в скобках указаны варианты удобрений, которые были на этих делянках до 1973 г., последствие которых учитывается.

Таблица 2. Корреляции дыхания почвы с гидротермическими показателями в вегетационный сезон

Фактор	Варианты удобрений и культуры	NPK с последствием разных вариантов удобрений					Разные варианты удобрений						
		Чистый пар			Картофель			Ячмень			Озимая рожь		
		NPK (без удобрений)*	NPK (NPK)	NPK (NPK + навоз)	NPK (без удобрений)	NPK (NPK)	NPK (NPK + навоз)	Без удобрений	NPK	NPK + навоз	Без удобрений	NPK	NPK + навоз
Температура воздуха, °C		0.796 0.010	0.721 0.044	0.698 0.037	0.816 0.014	—	—	—	—	—	—	—	—
Температура почвы на глубине 5 см, °C		0.784 0.021	—	—	0.800 0.017	—	—	—	—	—	—	—	—
Температура почвы на глубине 10 см, °C		0.772 0.025	—	—	0.757 0.030	—	—	—	—	—	—	—	—
Объемная влажность почвы, %		—	—	—	—	—	0.793 0.019	—	—	—	0.816 0.013	0.716 0.045	—

Примечания: 1) представлены коэффициенты корреляции Пирсона r в числителе и уровни значимости p в знаменателе; 2) “—” значимые корреляции не были получены; 3) в скобках указаны варианты удобрений, которые были на этих делянках до 1973 г., последствие которых учитывается.

под картофелем обусловлено применяемым при его возделывании гребневанием, в результате которого в летний период существенно повышается температура почвы (в среднем 25.6°C по сравнению с 23.0°C под чистым паром) и резко падает ее влажность (в среднем 5.9% по сравнению с 9.3% под чистым паром). Активное дыхание почвы под озимой рожью возникает благодаря мощной растительной биомассе, развиваемой этой культурой, что позволяет в затененной почве сохранить влагу (в среднем 12.8% по сравнению с 9.0% под ячменем) и не допустить существенного повышения ее температуры (в среднем 22.7°C по сравнению с 23.3°C под ячменем). По вариантам удобрений дыхание почвы закономерно возрастает в ряду: без удобрений < NPK < NPK + навоз. При этом диапазон

изменений дыхания почвы при осреднении по вариантам удобрений (0.149–0.347 г С м⁻² ч⁻¹) несколько шире, чем при осреднении по культурам (0.089–0.264 г С м⁻² ч⁻¹).

Аналогично через осреднение по культурам и вариантам удобрений представлены результаты определения содержания органического углерода и общего азота в почве (рис. 4). При ранжировании содержания $C_{орг}$ и $N_{общ}$ по вариантам удобрений отмеченные выше закономерности подтверждаются, но для культур – не соответствует выделенной последовательности. Эти элементы содержатся в большем количестве на чистом пару и картофеле, чем на ячмене. Вероятно, здесь основную роль играет предшественник: ячмень в севообороте идет после картофеля, который оставляет после себя мало растительных остатков; кроме того, делянки ячменя в 2023 г. были расположены на вершине склона, откуда идет сток талых и дождевых вод и, соответственно, вынос элементов вниз по склону.

Анализ периода с оголенной почвой. Статистический анализ показывает, что в период, когда на полях отсутствуют культуры, дыхание почвы на разных вариантах удобрений значимо не отличается (табл. 3). Наблюдается сильная положительная корреляция с температурой воздуха для вариантов NPK ($r = 0.826$; $p = 0.011$) и NPK + навоз ($r = 0.838$; $p = 0.009$), но на делянках без удобрений такая связь не была выявлена.

Интересен графический анализ эмиссии CO₂ в период с оголенной почвой (рис. 5). Его

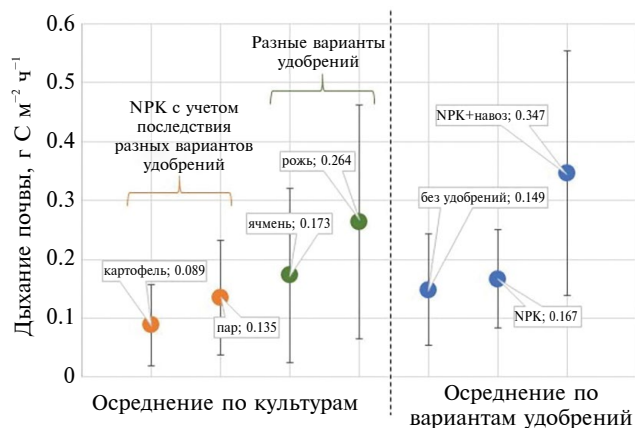


Рис. 3. Средние скорости дыхания почвы и их стандартные отклонения за вегетационный период.

Таблица 3. Результаты попарного сравнения дыхания почвы по вариантам удобрений в период с оголенной почвой

Вариант удобрений	Без удобрений	NPK	NPK + навоз
Без удобрений	—	0.431	0.270
NPK	—	—	0.875
NPK + навоз	—	—	—

Примечания: представлены величины уровня значимости *p* для критерия Манна-Уитни. Значимых отличий нет.

Таблица 4. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для дыхания почвы в вегетационный период

Источник дисперсии	<i>df</i> (число степеней свободы)	<i>F</i> (критерий Фишера) <i>F</i> _{табл} = 3.18	<i>p</i> (уровень значимости)
Чистый пар и картофель – NPK с последствием			
Культура	1	4.062	0.047
Удобрения	2	2.266	0.108
Взаимодействие Культура * Удобрения	2	0.225	0.802
Озимая рожь и ячмень – разные варианты удобрений			
Культура	1	4.071	0.041
Удобрения	2	7.939	0.001
Взаимодействие Культура * Удобрения	2	0.635	0.479

Примечание: значимые факторы (*F* > *F*_{табл}, *p* < 0.05) выделены цветом.

можно разделить на подпериоды: зимний, с отрицательными температурами воздуха и снежным покровом, и граничащие с ним осенний и весенний отрезки с положительными температурами. Заметен довольно широкий разброс значений осенью и весной, тогда как под снежным покровом дыхание почвы резко падает и составляет 0.006–0.018 г С м^{–2} ч^{–1}, что почти в 10–20 раз ниже, чем в вегетационный период.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на свою научную значимость, Длительный опыт ТСХА достаточно часто подвергается критике. Во-первых, из-за неоднородности рельефа: крутизна склона, на котором расположен опытный участок составляет 1.7° с уклоном на северо-запад (Хитров, 2012), что создает неодинаковые микроклиматические условия в верхней и нижней его частях. Обработка и посев ведутся вдоль склона; ливневые и талые воды пе-

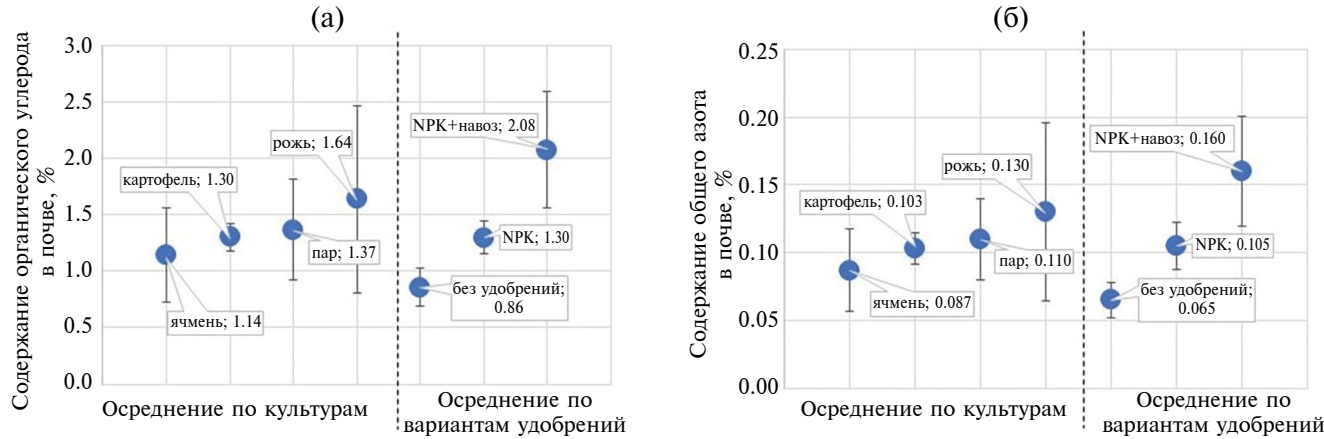


Рис. 4. Содержание органического углерода (а) и общего азота (б) в почве при различных вариантах осреднения. Приведены средние и их стандартные отклонения.

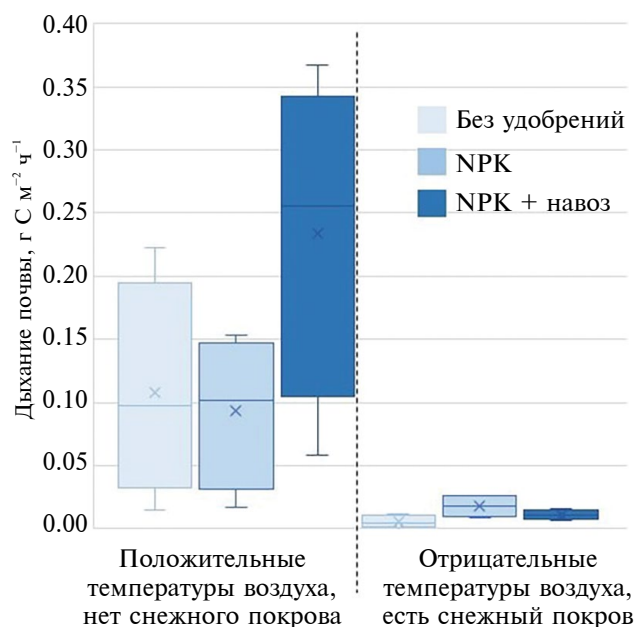


Рис. 5. Дыхание почвы в период с оголенной поверхностью.

реносят почву и удобрения, а также семена сорняков и возбудители болезней вдоль склона (Лошаков, 2013). Во-вторых, из-за разного размера частей Опыта: на бессменной части 11 вариантов удобрений, тогда как в севообороте их только 9. Более того, отсутствие повторностей затрудняет статистическую обработку полученных результатов (Лошаков, 2013). В-третьих, некоторую разнородность вносит уже упомянутая пестрота почвенного покрова и существенная неоднородность профиля по гранулометрическому составу (Хитров, 2012).

Выявленные нами положительные зависимости дыхания почвы от ее температуры и влажности многократно обсуждались. Стимулирующее влияние температуры на интенсивность эмиссии CO₂ из почвы отмечалось как в производственных условиях (Anokye et al., 2021; Brito et al., 2015; Lei et al., 2022; Wang et al., 2023), так и в полевых опытах (Kong et al., 2019; Kulachkova et al., 2023). Причем эффект повышения температуры ярче проявляется в более влажных условиях, а также на участках с более низкими значениями pH и высоким содержанием органического углерода в почве (Yang et al., 2023).

Связь с характером увлажнения обычно нелинейная — почвенное дыхание снижается как при уменьшении количества осадков (Apostolakis et al., 2022), так и при избыточном увлажнении (Yilmaz, 2019). И только в аридных экосистемах, где влажность выступает лимитирующим фактором, выпадение осадков всегда приводит к значимому усилению дыхания почвы (Francioni et al., 2020; Morris et al., 2022).

Следует акцентировать внимание на полученной нами зависимости дыхания почвы от типа вносимых удобрений. Действительно, многие авторы отмечают, что органические удобрения значительно усиливают эмиссию CO₂ из почвы. Так, по оценкам Шиловой (2014), минеральные удобрения увеличивают ее на 20%, тогда как внесение органоминерального удобрения усиливает эмиссию в 1.3–1.5 раза. Отсутствие минеральных удобрений существенно подавляет почвенное дыхание (Sosulski et al., 2021). В нашем случае (рис. 4) усиление дыхания составило 12% для варианта NPK и 133% (2.3 раза) для варианта NPK + навоз по сравнению с делянками без удобрений. В то же время важно отметить, что органические удобрения, помимо активизации эмиссии, усиливают нетто-поглощение углерода почвой (Yang et al., 2018), тем самым существенно увеличивая содержание в ней углерода и азота (Wang et al., 2023). Действительно, в нашем примере содержание C_{орг} и N_{общ} в вариантах NPK + навоз превышает контрольный уровень в 2.4 раза (см. рис. 4).

Важно сравнить наши результаты двухфакторного анализа, подтверждающие сходный вклад культуры и удобрений в эмиссию CO₂ из почвы (табл. 4), с данными других исследователей. Аналогичные выводы были получены в длительном полевом опыте в Польше, где было признано, что дыхание легких по составу почв больше зависит от вида возделываемой культуры и типа вносимых удобрений, чем от системы севооборота (например, эмиссия CO₂ из почвы под озимой рожью в варианте NPK + навоз с внесением извести на бессменных посевах не отличалась от таковой в севообороте) (Sosulski et al., 2021). Тогда как по результатам опыта в Чехии более сильное влияние на дыхание почвы оказывает культура, а не удобрения (Cerhanová et al., 2006).

До настоящего времени никто не измерял дыхание почвы в Длительном опыте ТСХА круглогодично; данные измерений есть только за вегетационный период. Тем не менее, интересно сопоставить некоторые показатели, полученные на тех же делянках. В более ранних исследованиях было сформулировано иное распределение культур по скорости дыхания почвы: рожь > картофель > ячмень (Савоськина, Полин, 2015), тогда как полученные нами данные позволяют ранжировать культуры в порядке рожь > ячмень > (пар) > картофель. Вероятная причина иного расположения участков с картофелем в этом ряду — отличия в методах измерения эмиссии, поскольку в упомянутом исследовании авторы применяли манометрический метод с использованием аппарата Варбурга, при котором почва изымается с поля. В методе закрытых динамических камер, который применялся в на-

шей работе, почва остается в характерных для нее условиях. Как мы отмечали ранее, на гребнях картофеля она существенно перегревается и пересыхает, что способствует снижению уровня дыхания.

Измеренная ранее другой группой исследователей на территории Длительного опыта ТСХА эмиссия CO_2 из почвы на бессменном чистом пару была равна $0.009\text{--}0.035 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, а на бессменном ячмене составила $0.043\text{--}0.113 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ (Чистотин, Сафонов, 2016). На расположенном рядом на том же типе почв Опыте точного земледелия дыхание почвы под картофелем в севообороте в течение года колебалось в интервале от 0.054 до $0.324 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ (Мазиров и др., 2015). Наши измерения показали, что дыхание почвы в севообороте в среднем больше, как для чистого пара ($0.135 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), так и для ячменя ($0.173 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$), тогда как для картофеля уровень эмиссии находился в том же интервале ($0.089 \text{ г С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$).

Аналогичные варианты удобрений были применены на опытных полях ВНИИОУ во Владимирской области для того же типа дерново-подзолистых почв. Дыхание почвы закономерно возрастало в последовательности без удобрений $< \text{NPK} < \text{NPK} + \text{навоз}$ и составило за вегетационный сезон для ячменя 1554, 2461 и 2792 кг С/га, а для картофеля 1902, 2471 и 2658 кг С/га, соответственно (Шилова, 2014). Если пересчитать полученные нами данные с учетом продолжительности вегетационного периода, то диапазоны изменения дыхания почвы будут больше и составят 2800–5500 кг С/га для ячменя и 2100–3300 кг С/га для картофеля. Во Владимирском опыте при осреднении по культурам в варианте без удобрений эмиссия CO_2 составляла на чистом пару 1296, на картофеле 1753 и на озимой пшенице 1959 кг С/га за вегетационный период (Лукин, 2015; Шилова, 2014). Рассчитанные для Длительного опыта ТСХА аналогичные значения равны 2900, 2100 и 4800 кг С/га соответственно, т.е. в 1.2–2.4 раза выше. Наиболее вероятная причина – также разница в методах измерения эмиссии, поскольку во ВНИИОУ использовался менее точный метод поглощения щелочью.

Некоторые авторы сопоставляли и другие факторы в Опыте, которые не вошли в нашу работу: дыхание почвы в севообороте и бессменных посевах, а также с внесением и отсутствием извести. На севообороте эмиссия CO_2 из почвы выше, чем на бессменных посевах из-за различного качества растительных остатков и более широкого видового состава микроорганизмов. При внесении извести интенсивность дыхания также уменьшается, поскольку она не только повышает реакцию среды от кислой до нейтральной, но и снижает содержание в почве подвижных форм органического вещества, а также

способствует его закреплению с минеральной частью (Савоськина, Полин, 2015).

Дополнительно можно сравнить некоторые характеристики почвенного покрова. Так, по данным Савоськиной и Полина (2015), кислотность на известкованной части севооборота слабая и нейтральная, в среднем 6.0. Наши измерения водного pH показывают довольно близкие значения, и в среднем он равен 6.3. Через 60 лет после закладки опыта углерод гумуса в среднем составлял 1.03%, общий азот 0.079%, $\text{C/N} = 13$ (Мазиров, Сафонов, 2010). В пробах, отобранных в 2023 г., т.е. через 110 лет после закладки и через 50 лет после предыдущего определения, $\text{C}_{\text{орг}}$ в среднем составлял 1.36%, $\text{N}_{\text{общ}}$ был равен 0.108%, $\text{C/N} = 12.6$. Отсюда можно заключить, что применение удобрений способствует росту почвенного плодородия и увеличению содержания биогенных элементов; но с другой стороны, такое повышение значений может быть просто связано с усовершенствованием методов химического анализа. В любом случае, это требует более детального изучения. Для сравнения, в европейских длительных полевых опытах содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ колеблется от 0.15% на песчаных почвах до 2.29% на черноземах (чаще всего менее 1.0%); минеральные удобрения увеличивают его содержание на 0.06–0.08% по сравнению с неудобренными участками, а органические – на 0.24% $\text{C}_{\text{орг}}$ ежегодно (Körschens, 2021).

ВЫВОДЫ

1. Вносимые удобрения и возделываемая культура оказывают равное по силе влияние на дыхание почвы, тогда как их совместное воздействие, а также последствие удобрений незначимо.
2. В вегетационный период дыхание почвы отличается чрезвычайно высокой дисперсией и для большинства делянок статистически не отличается.
3. В период с оголенной почвой ее дыхание не отличается между вариантами удобрений, а под снежным покровом оно ниже в 10–20 раз, чем в вегетационный период.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств гранта РНФ № 23–26–00191.

FUNDING

The study was funded by the Russian Science Foundation grant no. 23–26–00191.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2020. № 3. С. 372–378.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20030120>
- Курганова И.Н., Гончарова О.Ю., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Суховеева О.Э., Хорошаев Д.А. Определение эмиссии CO₂ из почв камерным методом в различных типах экосистем. М.: Перо, 2024. 28 с.
- Лошаков В.Г. Прошлое и настоящее Длительного опыта МСХА им. К.А. Тимирязева // Агрохимия. 2013. № 12. С. 75–80.
- Лукин С.М. Эмиссия углекислого газа в агроценозах картофеля на дерново-подзолистой супесчаной почве // Владимирский земледелец. 2015. № 3–4 (74). С. 22–23.
- Мазиров И.М., Боротов Б.Н., Лакеев П.С., Щепелева А.С., Васенев И.И. Почвенные потоки углекислого газа в агроэкосистемах в условиях Московского региона // Земледелие. 2015. № 8. С. 17–19.
- Мазиров М.А., Арефьева В.А. Краткий обзор результатов научных исследований в мировых длительных полевых опытах // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур: матер. Междунар. науч.-практич. конф. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. С. 23–31.
- Мазиров М.А., Сафонов А.Ф. Длительный полевой опыт РГАУ-МСХА: сущность и этапы развития // Изв. ТСХА. 2010. Вып. 2. С. 66–75.
- Савоськина О.А., Полин В.Д. Влияние длительного применения удобрений и известкования на дыхание дерново-подзолистой почвы при возделывании полевых культур бессменно и в севообороте // Агрофизика. 2015. № 4. С. 26–30.
- Хитров Н.Б. Почвы Длительного полевого опыта ТСХА // Изв. ТСХА. 2012. Вып. 3. С. 62–78.
- Чистотин М.В., Сафонов А.Ф. Динамика дыхания агродерново-подзолистой почвы в зависимости от содержания органического вещества и метеорологических факторов // Проблемы агрохимии и экологии. 2016. № 3. С. 52–58.
- Шилова Н.А. Динамика выделения CO₂ в посевах полевых культур на дерново-подзолистых и торфяных почвах // Почвоведение и агрохимия. 2014. № 1. С. 104–112.
- Adhikari K., Anderson K.R., Smith D.R., Owens P.R., Moore Jr.P.A., Libohova Z. Identifying key factors controlling potential soil respiration in agricultural fields // Agricultural & Environ. Let. 2023. Vol. 8. Art. e20117.
<https://doi.org/0.1002/ael2.20117>
- Anokye J., Logah V., Opoku A. Soil carbon stock and emission: estimates from three land-use systems in Ghana // Ecological Processes. 2021. Vol. 10. Art. 11.
<https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>
- Apostolakis A., Schöning I., Michalzik B., Klaus V.H., Boeddinghaus R.S., Kandeler E., Marhan S., Bolliger R., Fischer M., Prati D., Hänsel F., Nauss T., Hölzel N., Kleinebecker T., Schrupp M. Drivers of soil respiration across a management intensity gradient in temperate grasslands under drought // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2022. Vol. 124. P. 101–116.
<https://doi.org/10.1007/s10705-022-10224-2>
- Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2024. Vol. 129. Art. e2023JG007637.
<https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
- Brito L.F., Azenha M.V., Januszkiewicz E.R., Cardoso A.S., Morgado E.S., Malheiros E.B., La Scala N.Jr., Reis R.A., Ruggieri A.C. Seasonal fluctuation of soil carbon dioxide emission in differently managed pastures // Agronomy J. 2015. Vol. 107. P. 957–962.
<https://doi.org/10.2134/agronj14.0480>
- Cerhanová D., Kubát J., Nováková J. Respiration activity of the soil samples from the long-term field experiments in Prague // Plant, Soil and Environment. 2006. Vol. 52. P. 21–28.
- Francioni M., Trozzo L., Toderi M., Baldoni N., Allegranza M., Tesi G., Kishimoto-Mo A.W., Foresi L., et al. Soil respiration dynamics in Bromus erectus-dominated grasslands under different management intensities // Agriculture. 2020. Vol. 10. Art. 9.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10010009>
- Gelybó G., Barcza Z., Dencső M., Potyó I., Kása I., Horel Á., Pokovai K., Birkás M., Kern A., Hollós R., Tóth E. Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate // Soil and Tillage Res. 2022. Vol. 216. Art. 105239.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105239>
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4 (1). 9 p.
- Johnston A.E., Poulton P.R. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experience // European J. of Soil Sci. 2018. Vol. 69 (1). P. 113–125.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12521>
- Kong D., Liu N., Wang W., Akhtar K., Li N., Ren G., Feng Y., Yang G. Soil respiration from fields under three crop rotation treatments and three straw retention treatments // PLoS One. 2019. Vol. 14 (9). Art. e0219253.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219253>
- Körschens M. The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research – A review // Plant, Soil and Environment. 2006. Vol. 52. P. 1–8.

- Körschens M. Long-Term Field Experiments (LTEs) – Importance, Overview, Soil Organic Matter. In: Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. Innovations in Landscape Research / L. Mueller, V.G. Sychev, N.M. Dronin, F. Eulenstein (Eds.). Springer, 2021. P. 215–231.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_8
- Kulachkova S.A., Derevenets E.N., Korolev P.S., Pronina V.V. The Effect of Mineral Fertilizers on Soil Respiration in Urban Lawns // Moscow Univ. Soil Sci. Bul. 2023. Vol. 78. P. 281–291.
https://doi.org/10.3103/S0147687423030080
- Lei N., Wang H., Zhang Y., Chen T. Components of respiration and their temperature sensitivity in four reconstructed soils // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 6107.
https://doi.org/10.1038/s41598-022-09918-y
- Li W., Wang J., Li X., Wang S., Liu W., Shi S., Cao W. Nitrogen fertilizer regulates soil respiration by altering the organic carbon storage in root and topsoil in alpine meadow of the north-eastern Qinghai-Tibet Plateau // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Art. 13735.
https://doi.org/10.1038/s41598-019-50142-y
- Morris K.A., Hornum S., Crystal-Ornelas R., Pennington S.C., Bond-Lamberty B. Soil respiration response to simulated precipitation change depends on ecosystem type and study duration // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2022. Vol. 127. Art. e2022JG006887.
https://doi.org/10.1029/2022JG006887
- Rochette P., Hutchinson G.L. Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. In: Micrometeorology in Agricultural Systems / J.L. Hatfield, J.M. Baker (Eds.). ASA, 2005. P. 247–286.
https://doi.org/10.2134/agronmonogr47.c12
- Sosulski T., Szymańska M., Szara E., Sulewski P. Soil Respiration under 90 Year-Old Rye Monoculture and Crop Rotation in the Climate Conditions of Central Poland // Agronomy. 2021. Vol. 11. Art. 21.
https://doi.org/10.3390/agronomy11010021
- Wang J., Xie J., Li L., Effah Z., Xie L., Luo Z., Zhou Y., Jiang Y. Fertilization treatments affect soil CO₂ emission through regulating soil bacterial community composition in the semiarid Loess Plateau // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 20123.
https://doi.org/10.1038/s41598-022-21108-4
- Wang Y., Li Q., Li C. Organic fertilizer has a greater effect on soil microbial community structure and carbon and nitrogen mineralization than planting pattern in rainfed farmland of the Loess Plateau // Frontiers in Envir. Sci. 2023. Vol. 11. Art. 1232527.
https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1232527
- Ward D., Kirkman K., Hagenah N., Tsvuura Z. Soil respiration declines with increasing nitrogen fertilization and is not related to productivity in long-term grassland experiments // Soil Biology and Biochemistry. 2017. Vol. 115. P. 415–422.
https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.035
- Yang L., Pan J., Wang J., Tian D., Zhang C., Zhao X., Hu J., Yang W., Yan Y., Ma F., Chen W., Quan Q., Wang P., Niu S. Soil microbial respiration adapts to higher and longer warming experiments at the global scale // Environ. Res. Lett. 2023. Vol. 18 (3). Art. 034044.
https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbecb
- Yang S., Xiao Y., Xu J. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation // Environ. Sci. and Pollution Res. 2018. Vol. 25. P. 9958–9968.
https://doi.org/10.1007/s11356-018-1285-y
- Yilmaz G. Seasonal variations in soil CO₂ emissions under continuous field crop production in semi-arid southeastern Turkey // Appl. Ecology and Environ. Res. 2019. Vol. 17. P. 6563–6579.
https://doi.org/10.15666/aeer/1703_65636579
- Zapata D., Rajan N., Mowrer J., Casey K., Schnell R., Hons F. Long-term tillage effect on within season variations in soil conditions and respiration from dryland winter wheat and soybean cropping systems // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Art. 2344.
https://doi.org/10.1038/s41598-021-80979-1

Influence of Cultivated Crops and Fertilizers on Soil Respiration (Long-Term Field Experiment of Timiryazev Agricultural Academy)

O. E. Sukhoveeva^{a, *}, A. V. Ryzhov^a, A. V. Pochikalov^a, D. V. Karelin^a,

I. A. Zavertkin^b, and V. A. Nikolaev^b

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

The study is devoted to assessing the impact of cultivated crops and applied fertilizers on soil respiration—the most intensive CO₂ flux from terrestrial ecosystems to the atmosphere. The object was the Long-term field experiment of the Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy, where the main crops of the Non-Chernozem zone—winter rye, barley, potato, and bare fallow, which are included in crop rotation with liming and application of different fertilizers variants—were selected for

measurements. They were carried out by the method of closed dynamic chambers with portable infrared gas analyzers from May 2023 to April 2024. They were divided into two series: vegetation period and period with bare soil, the boundary between which was plowing. Comparing soil respiration during the growing season for individual plots, it was found that most of them were characterized by a wide range of values, and the CO₂ emission rates were not statistically different. The dependence of soil respiration on air temperature and soil moisture revealed for some plots is not universal. Two-way analysis of variance showed a significant effect of crop and fertilizer on soil respiration separately, but insignificance of their cumulative effect. The rate of CO₂ emission from the soil naturally increased in the variants: no fertilizer < NPK < NPK + manure, and when averaged over crops increased in the sequence potato < fallow < barley < winter rye. For soil organic carbon and total nitrogen content, the identified sequences were repeated for fertilizer variants and were not repeated for crops where the predecessor in the crop rotation and the position of the plot in the microrelief were found to be more important factors. During the period with bare soil, averaging was carried out for fertilizer variants, no significant differences were found between them, and quantitative estimates of soil respiration under snow cover were 10–20 times lower than in the vegetation period.

Keywords: CO₂ emission from soil, winter rye, barley, potato, fallow, soil organic carbon, total nitrogen, Mann-Whitney criterion, PERMANOVA

REFERENCES

- Adhikari K., Anderson K.R., Smith D.R., Owens P.R., Moore Jr.P.A., Libohova Z. Identifying key factors controlling potential soil respiration in agricultural fields. *Agricult. Environ. Lett.*, 2023, vol. 8, art. e20117. <https://doi.org/10.1002/acl2.20117>
- Anokye J., Logah V., Opoku A. Soil carbon stock and emission: estimates from three land-use systems in Ghana. *Ecol. Proc.*, 2021, vol. 10, art. 11. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>
- Apostolakis A., Schöning I., Michalzik B., Klaus V.H., Boeddinghaus R.S., Kandeler E., Marhan S., Bolliger R., Fischer M., Prati D., Hänsel F., Nauss T., Hölzel N., Kleinebecker T., Schrumpf M. Drivers of soil respiration across a management intensity gradient in temperate grasslands under drought. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2022, vol. 124, pp. 101–116. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10224-2>
- Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., Rey A., Vargas R. Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *J. Geophysic. Res. Biogeosci.*, 2024, vol. 129, art. e2023JG007637. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
- Brito L.F., Azenha M.V., Januszkiewicz E.R., Cardoso A.S., Morgado E.S., Malheiros E.B., la Scala N.Jr., Reis R.A., Ruggieri A.C. Seasonal fluctuation of soil carbon dioxide emission in differently managed pastures. *Agronomy J.*, 2015, vol. 107, pp. 957–962. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0480>
- Cerhanová D., Kubát J., Nováková J. Respiration activity of the soil samples from the long-term field experiments in Prague. *Plant Soil Environ.*, 2006, vol. 52, pp. 21–28.
- Chistotin M.V., Safonov A.F. Respiration dynamics of agrodermovo-podzolic soil depending on the content of organic matter and meteorological factors. *Probl. Agrokhim. Ekol.*, 2016, no. 3, pp. 52–58. (In Russ.).
- Francioni M., Trozzo L., Toderi M., Baldoni N., Allegranza M., Tesei G., Kishimoto-Mo A.W., Foresi L., et al. Soil respiration dynamics in Bromus erectus-dominated grasslands under different management intensities. *Agriculture*, 2020, vol. 10, art. 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010009>
- Gelybó G., Barcza Z., Dencső M., Potyó I., Kása I., Horel Á., Pokovai K., Birkás M., Kern A., Hollós R., Tóth E. Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil Till. Res.*, 2022, vol. 216, art. 105239. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105239>
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol. Electron.*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 1–9.
- Johnston A.E., Poulton P.R. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experience. *Europ. J. Soil Sci.*, 2018, vol. 69, no. 1, pp. 113–125. <https://doi.org/10.1111/ejss.12521>
- Khitrov N.B. Soils of the Long-term field experience of the MTAA. *Izv. Timiryazev. Sel'skokhoz. Akad.*, 2012, no. 3, pp. 62–78. (In Russ.).
- Kong D., Liu N., Wang W., Akhtar K., Li N., Ren G., Feng Y., Yang G. Soil respiration from fields under three crop rotation treatments and three straw retention treatments. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 9, art. e0219253. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219253>
- Körschens M. Long-Term Field Experiments (LTEs) – Importance, Overview, Soil Organic Matter. In *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. Innovations in Landscape Research*. Mueller L., Sychev V.G., Dronin N.M., Eulenstein F., Eds. Springer, 2021, pp. 215–231. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_8
- Körschens M. The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research – A review. *Plant Soil Environ.*, 2006, vol. 52, pp. 1–8.

- Kulachkova S.A., Derevenets E.N., Korolev P.S., Pronina V.V. The effect of mineral fertilizers on soil respiration in urban lawns. *Mosc. Univ. Soil Sci. Bull.*, 2023, vol. 78, pp. 281–291.
<https://doi.org/10.3103/S0147687423030080>
- Kurganova I.N., Goncharova O.Yu., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Lopes de Gerenu V.O., Moshkina E.V., Osipov A.F., Sukhoveeva O.E., Khoroshaev D.A. *Opredelenie emissii CO₂ iz pochv kamernym metodom v razlichnykh tipakh ekosistem* [Determination of CO₂ Emission from Soils by Chamber Method in Different Types of Ecosystems]. Moscow: Pero Publ., 2024. 28 p.
- Lei N., Wang H., Zhang Y., Chen T. Components of respiration and their temperature sensitivity in four reconstructed soils. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. 6107.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-09918-y>
- Li W., Wang J., Li X., Wang S., Liu W., Shi S., Cao W. Nitrogen fertilizer regulates soil respiration by altering the organic carbon storage in root and topsoil in alpine meadow of the north-eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 13735.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50142-y>
- Loshakov V.G. Past and present of the Long-term experiment of K.A. Timiryazev MAA. *Agrokhimiya*, 2013, no. 12, pp. 75–80. (In Russ.).
- Lukin S.M. Carbon dioxide emission in potato agroecosystems on sod-podzolic sandy loam soil. *Vladimir. Zemledel.*, 2015, no. 3–4, pp. 22–23. (In Russ.).
- Mazirov M.A., Arefieva V.A. A brief review of the results of scientific research in global long-term field experiments. In *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy vosproizvodstva plodorodniya pochv i urozhnost' sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Theoretical and Technological Foundations of Soil Fertility Reproduction and Crop Yields]. Moscow: RGAU-MTAA, 2012, pp. 23–31. (In Russ.).
- Mazirov I.M., Borotov B.N., Lakeev P.S., Shchepeleva A.S., Vasenev I.I. Soil carbon dioxide fluxes in agroecosystems in the conditions of the Moscow region. *Zemledel.*, 2015, no. 8, pp. 17–19. (In Russ.).
- Mazirov M.A., Safonov A.F. Long-term field experience RGAU-MTAA: essence and stages of development. *Izv. Timiryazev. Sel'skokhoz. Akad.*, 2010, no. 2, pp. 66–75. (In Russ.).
- Morris K.A., Hornum S., Crystal-Ornelas R., Pennington S.C., Bond-Lamberty B. Soil respiration response to simulated precipitation change depends on ecosystem type and study duration. *J. Geophysic. Res.: Biogeosci.*, 2022, vol. 127, art. e2022JG006887.
<https://doi.org/10.1029/2022JG006887>
- Rochette P., Hutchinson G.L. Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. In *Micrometeorology in Agricultural Systems*. Hatfield J.L., Baker J.M., Eds. ASA, 2005, pp. 247–286.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr47.c12>
- Savoskina O.A., Polin V.D. Influence of long-term application of fertilizers and liming on respiration of sod-podzolic soil under cultivation of field crops without shifts and in crop rotation. *Agrofizika*, 2015, no. 4, pp. 26–30. (In Russ.).
- Shilova N.A. Dynamics of CO₂ release in field crops on sod-podzolic and peat soils. *Pochboved. Agrokhim.*, 2014, no. 1, pp. 104–112. (In Russ.).
- Sosulski T., Szymańska M., Szara E., Sulewski P. Soil Respiration under 90 Year-Old Rye Monoculture and Crop Rotation in the Climate Conditions of Central Poland. *Agronomy*, 2021, vol. 11, art. 21.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11010021>
- Wang J., Xie J., Li L., Effah Z., Xie L., Luo Z., Zhou Y., Jiang Y. Fertilization treatments affect soil CO₂ emission through regulating soil bacterial community composition in the semiarid Loess Plateau. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. 20123.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-21108-4>
- Wang Y., Li Q., Li C. Organic fertilizer has a greater effect on soil microbial community structure and carbon and nitrogen mineralization than planting pattern in rainfed farmland of the Loess Plateau. *Front. Environ. Sci.*, 2023, vol. 11, art. 1232527.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1232527>
- Ward D., Kirkman K., Hagenah N., Tsvuura Z. Soil respiration declines with increasing nitrogen fertilization and is not related to productivity in long-term grassland experiments. *Soil Biol. Biochem.*, 2017, vol. 115, pp. 415–422.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.035>
- Yang L., Pan J., Wang J., Tian D., Zhang C., Zhao X., Hu J., Yang W., Yan Y., Ma F., Chen W., Quan Q., Wang P., Niu S. Soil microbial respiration adapts to higher and longer warming experiments at the global scale. *Environ. Res. Lett.*, 2023, vol. 18, no. 3, art. 034044.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbecb>
- Yang S., Xiao Y., Xu J. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation. *Environ. Sci. Poll. Res.*, 2018, vol. 25, pp. 9958–9968.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1285-y>
- Yilmaz G. Seasonal variations in soil CO₂ emissions under continuous field crop production in semi-arid southeastern Turkey. *Appl. Eco. Env. Res.*, 2019, vol. 17, pp. 6563–6579.
https://doi.org/10.15666/aeer/1703_65636579
- Zapata D., Rajan N., Mowrer J., Casey K., Schnell R., Hons F. Long-term tillage effect on within season variations in soil conditions and respiration from dryland winter wheat and soybean cropping systems. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, art. 2344.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-80979-1>
- Zavyalova N.E., Vasbieva M.T., Fomin D.S. Microbial biomass, respiratory activity and nitrogen fixation in soddy-podzolic soils of the Pre-Urals area under various agricultural uses. *Eurasian Soil Sci.*, 2020, vol. 53, no. 3, pp. 383–388.
<https://doi.org/10.1134/S1064229320030126>