

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-28-36>

УДК: 502.521:631.445.51:631.433.3:546.264-31:614.76:001.891.53

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЭМИССИЮ CO₂ СВЕТЛО- И ТЕМНО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВАМИ В ДЛИТЕЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Е. Н. Поливкина*, Е. В. Корнилаев, Е. С. Сысоева, А. Т. Меньдубаев, Е. В. Мустафина, А. О. Айдарханов

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: polivkina@nnc.kz

Проведен длительный лабораторный эксперимент для оценки направленности влияния химического загрязнения на эмиссию CO₂ светло- и темно-каштановой почвами Казахстана. Химическое загрязнение почвенных образцов производили растворами солей нитрата калия (KNO₃) и кристаллогидрата сульфата меди (II) (CuSO₄·5H₂O) в дозе 1 и 5 ПДК. Для имитации растительного покрова использовали культуру люцерны (*Medicago*). Измерение эмиссии CO₂ проводили закрытым динамическим камерным методом.

Определенной закономерности влияния монозагрязнения нитратом калия (KNO₃) и солью меди (CuSO₄·5H₂O) при внесенной дозе 1 и 5 ПДК не установлено. Отмечено, что эмиссия CO₂ с поверхности СК почвы при дозе нитратов 1 и 5 ПДК спустя месяц превышала контроль на 12%, через 6 месяцев – 6 и 7%, соответственно. Для образца ТК почвы увеличение эмиссии CO₂ на 10% отмечено только при дозе нитратов 5 ПДК спустя 6 месяцев. При загрязнении медью в дозе 1 и 5 ПДК эмиссия CO₂ с образца СК почвы через месяц увеличивалась на 11%, через 6 месяцев не отличалась от контроля. Для образца ТК почвы при дозе меди 1 ПДК отмечено увеличение эмиссии CO₂ на 10% только спустя 6 месяцев, при дозе 5 ПДК – в среднем на 12% через 1 и 6 месяцев.

Отсутствие публикаций, посвященных влиянию химического загрязнения на показатель эмиссии CO₂ региональных почв Казахстана обуславливает актуальность проведения исследований в данной области для оценки и прогнозирования состояния почвенного покрова в антропогенных экосистемах, так как почвенный CO₂-газообмен является важнейшей частью не только биогеохимического цикла углерода, но и отражает биологическую активность и здоровье почв.

Ключевые слова: почвенное дыхание, эмиссия, углекислый газ (CO₂), светло-каштановая почва, темно-каштановая почва, химическое загрязнение.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из глобальных проблем XXI века является изменение климата, которое оказывает значительное влияние на биогеохимический цикл углерода. По данным Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и мнению большинства ученых [1–7] концентрация CO₂ в атмосфере возросла примерно на 30% и «глобальное потепление», начавшееся с середины XX века, практически не вызывает сомнений. В данном аспекте, роль почвы в углеродном цикле может стать определяющей, так как в ней протекают процессы, формирующие основную часть потоков углерода в биосфере и в окружающей среде в целом. Если с одной стороны почвенный покров планеты депонирует углерод в органическом веществе (гумусе), то с другой стороны, в результате почвенного дыхания происходит эмиссия климатически активных газов в атмосферу, в том числе и CO₂. Глобальная интенсивность углеродного потока с поверхности почвенного покрова оценивается в диапазоне 73–91 млрд т С/год и продолжает увеличиваться в ходе современного потепления климата со средней скоростью 0,1 млрд т С/год [8].

Дыхание почвы является мощным, постоянно действующим фактором углеродного баланса природных и антропогенных экосистем [8]. Значительные нарушения естественного почвенного покрова

оказывают существенное влияние на интенсивность почвенного дыхания [9]. Множество факторов, влияющих на эмиссию CO₂, можно разделить на природные и хозяйственные [8]. Действие природных факторов обусловлено почвенной микробной биомассой, сезонной динамикой гидротермических условий и т.д. [7, 8, 10, 11]. В результате активной сельскохозяйственной деятельности, а также открытой разработки месторождений полезных ископаемых происходят значительные нарушения естественного почвенного покрова, а значит и углеродного потока с поверхности почвы [12–14]. Таким образом, если природные факторы непосредственно влияют на почвенное дыхание и, соответственно, газообмен, то хозяйственные «корректируют» воздействие природных, причем не всегда положительным образом. Так, например, одним их основных хозяйственных факторов, влияющих на почвенный покров в промышленных городах, является загрязнение тяжелыми металлами (ТМ), в аграрных экосистемах – загрязнение нитратами. Изучению влияния хозяйственных факторов на почвенное дыхание посвящено много работ, выполненных как в лабораторных условиях [15–19] так и в натурных [20–24]. Однако, результаты по оценке влияния загрязнения почвы на эмиссию CO₂, полученные в естественных условиях, весьма противоречивы вследствие многофакторности.

Слабая изученность закономерностей эмиссии CO₂ типичными почвами Казахстана в условиях техногенеза делает совершенно необходимыми исследования в этой области, учитывая роль почвенного углеродного потока в решении проблемы парниковых газов и сохранения почвенного плодородия как на региональном, так и на глобальном уровне. В связи с чем, основная цель работы заключалась в количественной оценке направленности влияния химического загрязнения на эмиссию CO₂ светло- и темно-каштановой почвами в длительном лабораторном эксперименте.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Лабораторный эксперимент

В качестве объектов исследования для проведения длительного лабораторного эксперимента выбраны наиболее распространенные почвы природных ландшафтов Казахстана – светло-каштановые (СК) и темно-каштановые (ТК). Названия почв даны в соответствии с международной классификации почв WRB [25].

Почвенные образцы для проведения эксперимента отбирали на фоновых территориях (рисунок 1), где отсутствует химическое загрязнение.

Отобранные почвенные образцы просеивали через сито (d – 10 мм), затем гомогенизировали. Далее подготовленную почву помещали в пластиковых вегетационных сосудах с перфорированным дном (V – 12 л).

Для имитации химического загрязнения почвы использовали селитру (KNO₃) и соль меди (II) (CuSO₄·5H₂O). Выбор агрогенного токсиканта (KNO₃) обусловлен тем, что проблема нитратного загрязнения приобретает все большую актуальность в связи с неизбежной химизацией сельского хозяйства [26].

Дозы техногенного и агрогенного токсикантов в каждой серии эксперимента соответствовали 1 и 5 ПДК (в пересчете на медь и азот, соответственно) [27]. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.

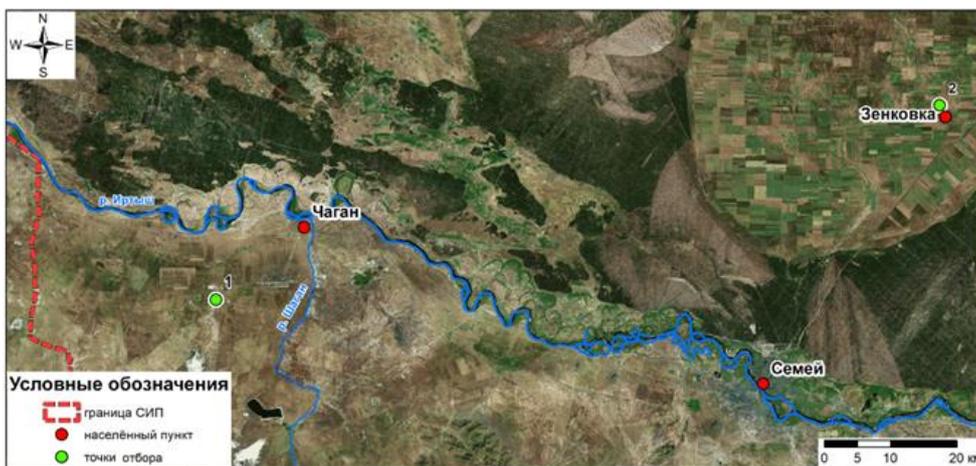


Рисунок 1. Место отбора фоновых почв для проведения долгосрочного эксперимента

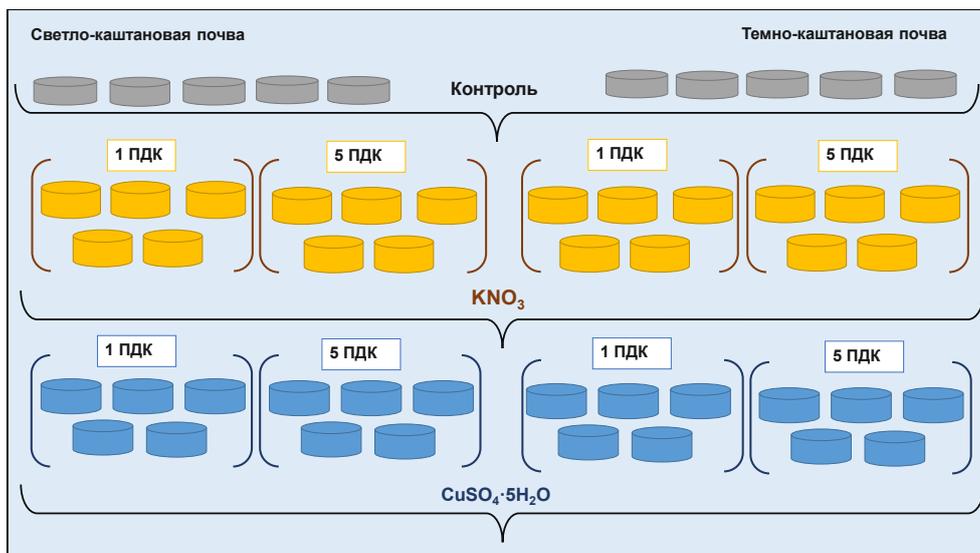


Рисунок 2. Схема эксперимента

Токсиканты вносили в почву в растворенном виде. Почву после искусственного загрязнения тщательно перемешивали и оставляли на 7 дней при комнатной температуре для равномерного распределения элементов по всему объему почвы. Контролем служили почвенные образцы без внесения токсикантов.

Через 7 дней после внесения солей в почву производили посев люцерны (*Medicago*) для имитации растительного покрова, который играет одну из ключевых ролей в регулировании почвенного дыхания [28]. Выбор люцерны обусловлен ее распространенным использованием в качестве кормовой культуры, быстрой всхожестью и неприхотливостью к условиям произрастания.

Измерение почвенной эмиссии CO₂

Для количественной оценки эмиссии CO₂ с поверхности загрязненных почв применяли закрытый динамический камерный метод [12]. Измерение потока CO₂ осуществляли с использованием портативной системы «Smart chamber» (LI-7810, США).

Измерение эмиссии CO₂ на искусственно загрязненных образцах производили в 3-х кратной повторяемости через 1 и 6 месяцев после внесения токсикантов. Все измерения проводили с 10:00 до 15:00 часов местного времени с целью минимизации возможного смещения оценок из-за суточной динамики почвенного дыхания.

Непосредственно перед каждым измерением надземную часть люцерны срезали. Затем в почву устанавливали пластиковые кольца диаметром 21,5 см и высотой 11 см на глубину до 5,5 см. Во избежание искажения результатов в результате латеральной диффузии почвенных газов кольца оставляли на 2–3 часа для достижения равновесия. Далее на кольцо устанавливали измерительную камеру (рисунок 3). Время измерения – 1 мин, количество повторных измерений в каждом сосуде – 3.



Рисунок 3. Измерение почвенной эмиссии CO₂.

Общий объем газов, используемый при расчете потока CO₂, составлял в среднем 6000 см³. Площадь поверхности измерения почвы в камере составляла 314 см².

Параллельно измеряли основные микроклиматические показатели, определяющие динамику эмиссии CO₂, влажность и температуру почвы. Измерение микроклиматических показателей осуществлялось специальным датчиком (HydraProbe – Stevens Water Monitoring Systems), которым оснащена система «Smart chamber». После каждого измерения снова производили посев люцерны.

Анализ физико-химических свойств почвенных образцов

Содержание гумуса в почве определяли по методу Тюрина [29]. Определение pH почвенного раствора производили потенциометрическим методом [30], количества поглощенных оснований – трилонометрическим методом [31], водорастворимых солей и карбонатов – объемным методом [32–34], гранулометрического состава – пипет-методом [35].

Камеральная обработка результатов

Первичная обработка результатов измерений эмиссии CO₂ выполнена с использованием программного обеспечения «SoilFluxPro». Для оценки достоверности различий использовали непараметрический критерий Колмогорова-Смирнова [36]. Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ STATISTICA 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические характеристики почв, использованных в лабораторном эксперименте представлены в таблице (таблица 1).

Согласно данным таблицы 1, образцы СК и ТК почвы, использованные в лабораторном эксперименте, характеризуются слабощелочной реакцией. Содержание гумуса, илистой фракции и емкость катионного обмена в образце СК почвы ниже, чем в образце ТК почвы в среднем на 1,4 раза. Содержание физической глины в образце СК почвы выше по сравнению с ТК всего в 1,1 раза.

Измерение эмиссии CO₂ с поверхности контрольных образцов представлены в таблице 2.

Согласно результатам, представленным в таблице 2, среднее значение эмиссии CO₂ с поверхности фоновых почв для СК составило (424±3), для ТК – (421±10) мкмоль м⁻² с⁻¹. Коэффициент вариации изменяется в диапазоне 1,2–4,6%, что указывает однородность полученных результатов. Статистически достоверной разницы между потоком CO₂ с поверхности фоновых контрольных образцов СК и ТК почв при относительно равных значениях влажности почвы, а также температуры воздуха и почвы (таблица 2) не установлено.

Результаты измерения эмиссии CO₂ с поверхности искусственно загрязненных почвенных образцов представлены в таблицах 3 и 4. В ходе эксперимента с загрязненными СК и ТК почвами значения температуры воздуха варьировали от 14 до 30 °С, температуры и влажность почвы – от 14 до 28 °С и от 0,1 до 0,4 м³ м⁻³, соответственно.

**ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЭМИССИЮ CO₂
СВЕТЛО- И ТЕМНО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВАМИ В ДЛИТЕЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Достоверность различий «случай-контроль» оценивали по непараметрическому критерию Колмогорова-Смирнова при $p = 0,05$.

Как видно из таблицы 3, эмиссия CO₂ с поверхности СК почвы после внесения нитрата калия в дозе 1 ПДК спустя месяц возросла на 12% относительно контрольного варианта. Через 6 месяцев эмиссия углерода превышала контрольные значения только на 6%. При дозе 5 ПДК аналогичные изменения углеродного потока с поверхности СК почвы составили 12 и 7%, соответственно. Для эмиссии CO₂ с поверхности ТК почвы при дозе нитрата калия 1 ПДК спустя 1 и 6 месяцев не установлено достоверных изменений относительно контрольного варианта. При дозе 5 ПДК только через 6 месяцев наблюдалось незначительное усиление почвенного дыхания на 10%. В экс-

периментах с внесением птичьего помета [37], богатого нитратами, в чернозем также наблюдалось повышение эмиссии углекислоты в 1,9–3,7 раза по сравнению с контролем.

Вероятно, что наблюдаемое незначительное усиление углеродного потока при нитратном загрязнении СК и ТК почв не связано с токсичностью. С одной стороны, азот является важнейшим макроэлементом [26] как для микроценоза почвы, так и для растений. С другой стороны, в почве постоянно происходит микробиологическая «утилизация» нитратов в процессе денитрификации [38].

Результаты измерения эмиссии CO₂ с поверхности почвенных образцов искусственно загрязненных солью меди (II) представлены в таблице 4.

Таблица 1. Физико-химические свойства светло- и темно-каштановой почв

Тип почвы	pH	Гумус (%)	Физическая глина (%)	Илистая фракция (%)	Емкость катионного обмена (мг-экв/100 г)
Светло-каштановая	7,3	2,1	40,2	15,1	12,1
Темно-каштановая	7,1	2,6	35,7	20,2	19,6

Таблица 2. Эмиссия CO₂ поверхностью СК и ТК почв в контрольном варианте

Серия	Количественные показатели (Ср.±ст.откл.)				V, % (φ CO ₂)
	φ CO ₂ (мкмоль м ⁻² с ⁻¹)	T _{возд.} (°C)	T _{почвы} (°C)	Влажность почвы (м ³ м ⁻³)	
СК _{фон}	424±3	24±1	15±2	0,3±0,04	1,2
ТК _{фон}	421±10	20±1	17±4	0,3±0,04	4,6

Примечание: φ – мольная доля эмиссии газа; T – температура; Ср.±ст.откл. – среднее и стандартное отклонение; V – коэффициент вариации; n=15 (для каждого варианта на каждый период измерения).

Таблица 3. Эмиссия CO₂ поверхностью СК и ТК почв в варианте с внесением нитрата калия

Серия	Период эксп. (мес.)	Количественные показатели (Ср.±ст.откл.)				V, % (φ CO ₂)
		φ CO ₂ (мкмоль м ⁻² с ⁻¹)	T _{возд.} (°C)	T _{почвы} (°C)	Влажность почвы (м ³ м ⁻³)	
1ПДК	1	477±25	24±1	22±1	0,1±0,01	18,7
	6	449±13	29±1	19±1	0,1±0,01	10,9
5ПДК	1	475±24	23±1	20±1	0,1±0,01	10,1
	6	456±12	29±0,5	23±0,5	0,2±0,01	13,5
1ПДК	1	424±35	29±1	27±1	0,4±0,01	10,3
	6	452±18	14±0,5	15±0,5	0,2±0,01	10,9
5ПДК	1	440±19	29±0,5	27±1	0,4±0,01	12,3
	6	463±19	15±0,5	14±0,8	0,3±0,01	10,2

Примечание: φ – мольная доля эмиссии газа; T – температура; Ср.±ст.откл. – среднее и стандартное отклонение; V – коэффициент вариации; n=15 (для каждого варианта на каждый период измерения).

Таблица 4. Эмиссия CO₂ поверхностью СК и ТК почв в варианте с внесением соли меди (II)

Серия	Время экспозиции (мес.)	Количественные показатели (Ср.±ст.откл.)				V, % (φ CO ₂)
		φ CO ₂ (мкмоль м ⁻² с ⁻¹)	T _{возд.} (°C)	T _{почвы} (°C)	Влажность почвы (м ³ м ⁻³)	
1ПДК	1	468±18	25±1	27±1	0,1±0,01	15,7
	6	423±21	28±1	25±1	0,2±0,01	13,7
5ПДК	1	475±23	24±1	24±1	0,1±0,01	12,2
	6	427±21	30±1	24±1	0,1±0,01	13,8
1ПДК	1	433±45	28±1	28±1	0,3±0,01	10,8
	6	465±20	14±1	14±1	0,2±0,02	11,2
5ПДК	1	463±35	27±1	28±1	0,3±0,02	11,2
	6	477±21	14±1	14±1	0,2±0,01	10,6

Примечание: φ – мольная доля эмиссии газа; T – температура; Ср.±ст.откл. – среднее и стандартное отклонение; V – коэффициент вариации; n=15 (для каждого варианта на каждый период измерения).

Анализ полученных результатов (таблица 4) показал, что эмиссия CO₂ с поверхности СК почвы после внесения сульфата меди в дозе 1 и 5 ПДК спустя месяц возрастала в среднем на 11% относительно контрольного варианта, а через 6 месяцев снижалась до уровня в контроле.

Внесение сульфата меди в дозе 1 ПДК в ТК почву вызвало достоверное увеличение эмиссии CO₂ на 10% по сравнению с контрольным образцом только спустя 6 месяцев. При дозе сульфата меди 5 ПДК спустя 1 и 6 месяцев наблюдалось усиление почвенного дыхания в среднем на 12%. Таким образом, как и в варианте с нитратным загрязнением, медное загрязнение в дозе от 1 до 5 ПДК незначительно повышало выделение CO₂. Как и в случае нитратного загрязнения, данный эффект не связан с токсичностью. Во-первых, медь является одним из важнейших микроэлементов [39, 40]. Во-вторых, согласно литературным данным [26], пределы содержания Cu в почве и растений одни из самых высоких. В-третьих, почвы обладают резистентностью к меди за счет емкости катионного обмена и содержания гумуса, которые в совокупности способствуют поглощению и нейтрализации токсичных катионов Cu²⁺ за счет сорбции [41] и хелатирования [42, 43]. Возможно, при более высоких концентрациях нитратов и меди, ожидаемый эффект будет иметь противоположный характер вследствие угнетения микробиологической активности почвы и растительности, которые играют ключевую роль в почвенном CO₂-газообмене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен длительный лабораторный эксперимент для оценки направленности влияния химического загрязнения на эмиссию CO₂ светло- и темно-каштановой почвами Казахстана. Средние значения эмиссии CO₂ с поверхности фоновых образцов СК и ТК почв достоверно не отличались и составили (424±3) и (421±10) мкмоль м⁻² с⁻¹, соответственно. Определенной закономерности влияния нитрата калия (KNO₃) и соли меди (CuSO₄·5H₂O) при уровне 1 и 5 ПДК не выявлено. Установлено, что эмиссия CO₂ с поверхности СК почвы при дозе нитратов 1 и 5 ПДК спустя месяц превышала контроль на 12%, через 6 месяцев – 6 и 7%, соответственно. Для образца ТК почвы увеличение эмиссии CO₂ на 10% отмечено только при дозе нитратов 5 ПДК спустя 6 месяцев. При загрязнении медью в дозе 1 и 5 ПДК эмиссия CO₂ с образца СК почвы через месяц увеличивалась на 11%, через 6 месяцев не отличалась от контроля. Для образца ТК почвы при дозе меди 1 ПДК отмечено увеличение эмиссии CO₂ на 10% только спустя 6 месяцев, при дозе 5 ПДК – в среднем на 12% через 1 и 6 месяцев.

Отсутствие публикаций, посвященных влиянию химического загрязнения на показатель эмиссии CO₂ региональных почв Казахстана, обуславливает актуальность проведения исследований в данной области для оценки и прогнозирования состояния почвенного

покрова в антропогенных экосистемах, так как почвенный CO₂-газообмен является важнейшей частью не только биогеохимического цикла углерода, но и отражает биологическую активность и здоровье почв.

Исследования выполнены при финансовой поддержке МНВО РК (BR21881915 «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата», продолжен модельный эксперимент с фоновой темно- и светло-каштановой почвой).

ЛИТЕРАТУРА

1. Budyko, M. I. Anthropogenic Climatic Change / M. I. Budyko, Y. A. Izrael (eds.). – Tucson: University of Arizona Press, 1991.
2. Houghton, J. T. Climate Change: the IPCC Scientific Assessment / J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
3. IPCC. Climate Change: Synthesis Report / R. T. Watson, Core Writing Team (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 398 с.
4. IPCC. Climate Change 2007: Mitigation. In: Metz, B., et al. (Eds.) / Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88011-4 (pb: 978-0-521-70598-1)
5. Denman, K. L. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis / K. L. Denman, et al. (eds. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Avery K. B., Tignor M., Miller H. L.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – P. 499–587.
6. Stocker, T. F. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – P. 867–869.
7. Piao, S. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming / S. Piao et al. // Nature. – 2008. – V. 451. – P. 49–53.
8. Суховеева О. Э., Карелина Д. В., Золотухина А. Н., Почикалов А. В. Дыхание почвы в аграрных и природных экосистемах европейской территории России // Почвоведение. – 2023. – № 9. – С. 1077–1088. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600488>
9. Anokye J., Logah V., Opoku A. Soil carbon stock and emission: estimates from three land-use systems in Ghana // Ecological Processes. – 2021. – V. 10. – P. 11. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>
10. 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. – V. 124. – P. 101–116. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10224-2>

11. Bond–Lamberty B., Thomson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // *Nature*. – 2010. – V. 464. – P. 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>
12. Luo Y., Zhou X. Soil respiration and the environment. – Burlington: Academic Press, 2006. – 316 p.
13. Kang X., Hao Y., Cui X., Chen H., Li C., Rui Y., Tian J., Kardol P., Zhong L., Wang J., Wang Y. Effects of grazing on CO₂ balance in a semiarid steppe: field observations and modeling // *Journal of Soils and Sediments*. – 2013. – V. 13. – P. 1012–1023. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0675-5>.
14. Gerosa G., Finco A., Boschetti F., Brenna S., Marzuoli R. Measurements of soil carbon dioxide emissions from two maize agroecosystems at harvest under different tillage conditions // *The Scientific World Journal*. – 2014. – V. 2014. – P. 141345. <https://doi.org/10.1155/2014/141345>
15. Cotrufo M.F., De Santo A.V., Alfani A., Bartoli G., De Cristofaro A. Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in *Quercus ilex* L. woods // *Environmental Pollution*. – 1995. – V. 89. – No. 1. – P. 81–87.
16. Kaye J.P., McCulley R.L., Burke I.C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems // *Global Change Biology*. – 2005. – V. 11. – No. 4. – P. 575–587.
17. Ohya H., Fujiwara S., Komai Y., Yamaguchi M. Microbial biomass and activity in urban soils contaminated with Zn and Pb // *Biology and Fertility of Soils*. – 1988. – V. 6. – No. 1. – P. 9–13.
18. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2010. – V. 165. – No. 1–4. – P. 193–203.
19. Yuangen Y., Paterson E., Campbell C.D. Urban soil microbial features and their environmental significance as exemplified by Aberdeen City, UK // *Chinese Journal of Geochemistry*. – 2001. – V. 20. – No. 1. – P. 34–44.
20. Кадулин М.С., Копчик М.Н. Эмиссия CO₂ почвами в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель» в Кольской Субарктике // *Почвоведение*. – 2013. – № 11. – С. 1387–1396. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110063>
21. Сморгалов И.А., Воробейчик Е.Л. Почвенное дыхание лесных экосистем в градиентах загрязнения среды выбросами медеплавильных заводов // *Экология*. – 2011. – № 6. – С. 429–435.
22. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota: Comparative analysis of 18 contaminated areas. – Dordrecht: Springer, 2009. – 466 p.
23. Ramsey P.W., Rillig M.C., Feris K.P., Moore J.N., Gannon J.E. Mine waste contamination limits soil respiration rates: A case study using quantile regression // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2005. – V. 37. – No. 6. – P. 1177–1183.
24. Ramsey P.W., Rillig M.C., Feris K.P., Gordon N.S., Moore J.N., Holben W.E., Gannon J.E. Relationship between communities and processes: new insights from a field study of a contaminated ecosystem // *Ecology Letters*. – 2005. – V. 8. – No. 11. – P. 1201–1210.
25. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/> (дата обращения: 12.09.2024).
26. Соколов О. А. Нитраты в окружающей среде/ Соколов О. А., Семёнов В.М., Агаев В.А. – Пушкино.: ОНТИ НЦБН АН СССР, 1988. – 303 с.
27. Kloke A. Orientierung sdaten fur tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kultureboden // *Mitteilungen VDLVFA*. – 1980. – H. 2. – S. 32–38.
28. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник П.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы / Антропогенная трансформация природной среды. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
29. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213-91; введен 2022-06-03. – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2021. – 7 с.
30. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. – Введен 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.
31. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке. – Введен 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
32. ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке. – Введен 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
33. ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке. – Введен 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.
34. ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке. – Введен 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 4 с.
35. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Взамен ГОСТ 12536-79; введен 2016-09-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 18 с.
36. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – С. 484–486. – 816 с.
37. Шиндорикина О.В., Ульянова О.А., Чупрова В.В. Влияние удобрений на эмиссию CO₂ из агрочернозема в условиях Красноярской лесостепи // *Вестник КрасГАУ*. – 2015. – №10. – С. 174–179.
38. Benjamin Z. Houlton, Edith Bai. Imprint of denitrifying bacteria on the global terrestrial biosphere // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2009. – Vol. 106 (51). – P. 21713–21716. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912111106>
39. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. – 2005. – Vol. 109. – P. 125–140.
40. Wu X., Cobbina S.J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. Vol. 23. – P. 8244–8259.
41. Vlcek, V., Pohanka, M. Adsorption of copper in soil and its dependence on physical and chemical properties // *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.* – 2018. – Vol. 66. – P. 219–224.
42. Wuana, R.A., Okieimen, F.E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best

available strategies for remediation // *ISRN Ecology*. – 2011. – Vol. 265. – P. 1–20.

43. Minkina, T., Motuzova, G., Mandzhieva, S., Nazarenko, O. Ecological resistance of the soil–plant system to contamination by heavy metals // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – Vol. 123. – P. 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.021>

REFERENCES

1. Budyko, M. I. *Anthropogenic Climatic Change* / M. I. Budyko, Y. A. Izrael (eds.). – Tucson: University of Arizona Press, 1991.
2. Houghton, J. T. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment* / J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
3. IPCC. *Climate Change: Synthesis Report* / R. T. Watson, Core Writing Team (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 398 p.
4. IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation*. In: Metz, B., et al. (Eds.) / *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88011-4 (pb: 978-0-521-70598-1)
5. Denman, K. L. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* / K. L. Denman, et al. (eds. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Avery K. B., Tignor M., Miller H. L.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – P. 499–587.
6. Stocker, T. F. *Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – P. 867–869.
7. Piao, S. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming / S. Piao et al. // *Nature*. – 2008. – V. 451. – P. 49–53.
8. Sukhoveeva O. E., Karelina D. V., Zolotukhina A. N., Pochivalov A.V. Soil respiration in agricultural and natural ecosystems of the European territory of Russia // *Soil Science*. – 2023. – No. 9. – P. 1077–1088. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600488>
9. Anokye J., Logah V., Opoku A. Soil carbon stock and emission: estimates from three land-use systems in Ghana // *Ecological Processes*. – 2021. – V. 10. – P. 11. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>
10. Apostolakis A., Schöning I., Michalzik B., Klaus V.H., Boeddinghaus R.S., Kandeler E., Marhan S., Bolliger R., Fischer M., Prati D., Hänsel F., Naus 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. – V. 124. – P. 101–116. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10224-2>
11. Bond–Lamberty B., Thomson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // *Nature*. – 2010. – V. 464. – P. 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>
12. Luo Y., Zhou X. *Soil respiration and the environment*. – Burlington: Academic Press, 2006. – 316 p.
13. Kang X., Hao Y., Cui X., Chen H., Li C., Rui Y., Tian J., Kardol P., Zhong L., Wang J., Wang Y. Effects of grazing on CO₂ balance in a semiarid steppe: field observations and modeling // *Journal of Soils and Sediments*. – 2013. – V. 13. – P. 1012–1023. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0675-5>
14. Gerosa G., Finco A., Boschetti F., Brenna S., Marzuoli R. Measurements of soil carbon dioxide emissions from two maize agroecosystems at harvest under different tillage conditions // *The Scientific World Journal*. – 2014. – V. 2014. – P. 141345. <https://doi.org/10.1155/2014/141345>
15. Cotrufo M.F., De Santo A.V., Alfani A., Bartoli G., De Cristofaro A. Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in *Quercus ilex* L. woods // *Environmental Pollution*. – 1995. – V. 89. – No. 1. – P. 81–87.
16. Kaye J.P., McCulley R.L., Burke I.C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems // *Global Change Biology*. – 2005. – V. 11. – No. 4. – P. 575–587.
17. Ohya H., Fujiwara S., Komai Y., Yamaguchi M. Microbial biomass and activity in urban soils contaminated with Zn and Pb // *Biology and Fertility of Soils*. – 1988. – V. 6. – No. 1. – P. 9–13.
18. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2010. – V. 165. – No. 1–4. – P. 193–203.
19. Yuangen Y., Paterson E., Campbell C.D. Urban soil microbial features and their environmental significance as exemplified by Aberdeen City, UK // *Chinese Journal of Geochemistry*. – 2001. – V. 20. – No. 1. – P. 34–44.
20. Kadulin M.S., Koptsik M.N. CO₂ emission by soils in the zone of influence of the Severonickel mining and Metallurgical combine in the Kola Subarctic // *Soil Science*. – 2013. – No. 11. – pp. 1387–1396. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110063>
21. Smorkalov I.A., Vorobeichik E.L. Soil respiration of forest ecosystems in environmental pollution gradients from copper smelters // *Ecology*. – 2011. – V. 6. – P. 429–435.
22. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota: Comparative analysis of 18 contaminated areas. – Dordrecht: Springer, 2009. – 466 p.
23. Ramsey P.W., Rillig M.C., Feris K.P., Moore J.N., Gannon J.E. Mine waste contamination limits soil respiration rates: A case study using quantile regression // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2005. – V. 37. – No. 6. – P. 1177–1183.
24. Ramsey P.W., Rillig M.C., Feris K.P., Gordon N.S., Moore J.N., Holben W.E., Gannon J.E. Relationship between communities and processes: new insights from a field study of a contaminated ecosystem // *Ecology Letters*. – 2005. – V. 8. – No. 11. – P. 1201–1210. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/> (date of access: 09/12/2024).
25. Sokolov O. A. Nitrates in the environment/ Sokolov O. A., Semenov V.M., Agaev V.A. – Pushchino.: ONTI National Library of the USSR Academy of Sciences, 1988. – 303 p.
26. Kloke A. Orientierung sdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturenboden // *Mitteilungen VDLVFA*. – 1980. – H. 2. – S. 32–38.
27. Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Analytical review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. *Environmental problems / Anthropogenic trans-*

- formation of the natural environment. – 2021. – Vol. 7. – No. 1. – pp. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
29. GOST 26213-2021. Soils. Methods for the determination of organic matter. Instead of GOST 26213-91; introduced on 2022-06-03. – Minsk: Eurasian Council for Standardization, Metrology and Certification, 2021. – 7 p.
30. GOST 26423-85. Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH, and dense residue of aqueous extract. – Introduced 1986-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1985. – 7 p.
31. GOST 26428-85. Soils. Methods for the determination of calcium and magnesium in aqueous extract. – Introduced 1986-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1985. – 8 p.
32. GOST 26425-85. Soils. Methods for the determination of chloride ion in aqueous extract. – Introduced 1986-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1985. – 9 p.
33. GOST 26426-85. Soils. Methods for the determination of sulfate ion in aqueous extract. – Introduced 1986-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1985. – 7 p.
34. GOST 26424-85. Soils. A method for the determination of carbonate and bicarbonate ions in an aqueous extract. – Introduced 1986-01-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1985. – 4 p.
35. GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition. – Instead of GOST 12536-79; introduced on 2016-09-01. – Moscow: Standartinform, 2019. – 18 p.
36. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and researchers. – M.: Fizmatlit, 2006. – P. 484–486. – 816 p.
37. Shindorikova O.V., Ulyanova O.A., Chuprova V.V. The effect of fertilizers on CO₂ emissions from agrochernozem in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe // Bulletin of KrasGAU. – 2015. – No. 10. – P. 174–179.
38. Benjamin Z. Houlton, Edith Bai. Imprint of denitrifying bacteria on the global terrestrial biosphere // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2009. – V. 106 (51). – P. 21713–21716. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912111106>
39. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2005. – V. 109. – P. 125–140.
40. Wu X., Cobbina S.J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – V. 23. – P. 8244–8259.
41. Vlcek, V., Pohanka, M. Adsorption of copper in soil and its dependence on physical and chemical properties // Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun. – 2018. – V. 66. – P. 219–224.
42. Wuana, R.A., Okieimen, F.E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // ISRN Ecology. – 2011. – V. 265. – P. 1–20.
43. Minkina, T., Motuzova, G., Mandzhieva, S., Nazarenko, O. Ecological resistance of the soil–plant system to contamination by heavy metals // Journal of Geochemical Exploration. – 2012. – V. 123. – P. 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.021>

ҰЗАҚ ЗЕРТХАНАЛЫҚ ТӘЖІРІБЕДЕ БАРЫСЫНДА ХИМИЯЛЫҚ ЛАСТАНУДЫҢ АШЫҚ ЖӘНЕ ҚОЮ ҚЫЗҒЫЛТ ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ CO₂ ЭМИССИЯСЫНА ӘСЕР ЕТУ БАҒЫТЫН БАҒАЛАУ

Е. Н. Поливкина*, Е. В. Корнилаев, Е. С. Сысоева, А. Т. Меньдубаев, Е. В. Мустафина, А. О. Айдарханов

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: polivkina@nnc.kz

Ұзақ зертханалық тәжірибе барысында химиялық ластанудың ашық және қою қызғылт топырақтарының CO₂ эмиссиясына әсер ету бағытына бағалау берілген. Топырақ үлгілерінің химиялық ластануы 1 және 5 ШРК дозасында калий нитраты (KNO₃) және мыс (II) сульфаты кристаллогидраты (CuSO₄×5H₂O) тұздарының ерітінділерімен өндірілді. CO₂ эмиссиясын өлшеу жабық динамикалық камералық әдіспен жүргізілді. Калий нитраты мен мыс (II) сульфатының жасанды ластануы ашық және қою қызғылт топырақтарының үлгілерінің бетінен ластану дозасына, экспозиция уақытына және топырақ түріне байланысты CO₂ ағынын 6-дан 12%-ға дейін арттырғаны анықталды. Ашық қызғылт топырақ нитраттың ластануына, ал қою қызғылт топырақ мысқа сезімтал екені анықталды. Жалпы алғанда, химиялық ластану жағдайында аймақтық топырақ типтерінің CO₂ эмиссиясын зерттеу техногендік ластануға ұшыраған аумақтарда топырақтың тыныстауын болжау үшін егжей-тегжейлі зерттеуді қажет етеді.

Түйін сөздер: топырақтың тыныс алуы, шығарылуы, көмірқышқыл газы (CO₂), ашық қызғылт топырағы, қою қызғылт топырағы, химиялық ластану.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CHEMICAL POLLUTION ON CO₂ EMISSIONS FROM LIGHT
AND DARK CHESTNUT SOILS IN A LONG-TERM LABORATORY EXPERIMENT

Ye. N. Polivkina^{*}, E. V. Kornilaev, Ye. S. Sussoeva, A. T. Mendubaev, Ye. V. Mustafina, A. O. Aidarkhanov

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: polivkina@nnc.kz*

In a long-term laboratory experiment, an assessment was made of the direction of the influence of chemical pollution on CO₂ emissions from light and dark chestnut soils. Chemical contamination of soil samples was carried out with solutions of salts of potassium nitrate (KNO₃) and copper (II) sulfate crystallohydrate (CuSO₄×5H₂O) at doses of 1 and 5 MPC. CO₂ emissions were measured using a closed dynamic chamber method. It was found that artificial contamination with potassium nitrate and copper (II) sulfate increased the CO₂ flux from the surface of the samples of LC and DC soils in the range from 6 to 12%. depending on the contamination dose, exposure time, and soil type. It was found that the light chestnut soil is more sensitive to nitrate contamination, and dark chestnut soil is more sensitive to copper contamination. In general, the study of CO₂ emissions by regional soil types under conditions of chemical pollution requires a more detailed study to predict soil respiration in territories subject to anthropogenic pollution.

Keywords: *soil respiration, emission, carbon dioxide (CO₂), light chestnut soil, dark chestnut soil, chemical pollution.*