

УДК 631.453

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭМИССИИ CO₂ ИЗ ПОЧВ ГОРОДА КУРСКА

© 2021 г. Н. П. Неведров^{а, *}, Д. А. Саржанов^б, Е. П. Проценко^а, И. И. Васенев^б

^аКурский государственный университет, ул. Радищева, 33, Курск, 305000 Россия

^бРГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550 Россия

*e-mail: 9202635354@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2019 г.

После доработки 26.02.2020 г.

Принята к публикации 24.04.2020 г.

Оценена пространственно-временная изменчивость почвенной эмиссии CO₂ различных по структуре землепользования, уровню загрязнения и генезису почв города Курска. Изучена сезонная динамика эмиссии диоксида углерода из фоновых (облесенных участков рекреационных зон) и испытывающих значительную антропогенную нагрузку городских почв. Установлено, что динамика почвенной эмиссии CO₂ обусловлена влиянием ряда факторов: временем года, типом почвы, содержанием органического вещества в почве, антропогенной преобразованностью почвенного профиля, гидротермическими условиями, загрязнением почв тяжелыми металлами. Почвенные гидротермические условия в большей степени определяли интенсивность и особенности сезонной динамики почвенных потоков CO₂, что подтвердилось максимальной скоростью эмиссии в летний период. В антропогенно-преобразованных почвах отмечена разнонаправленная трансформация почвенных потоков CO₂. Интенсивность эмиссии CO₂ заметно отличалась в разных по генезису почвах города Курска. Загрязнение почв тяжелыми металлами оказало неоднозначное влияние на процессы почвенного дыхания: интенсивность эмиссии CO₂ из урбанозема собственно (Urbic Technosol) по сравнению с фоновым аналогом черноземом выщелоченным (Luvic Chernozem (Loamic, Pachic)) возросла на 16.4%, для урбосерой типичной (Technic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) почвы данный показатель наоборот уменьшается на 47% по сравнению с ее фоновым аналогом – серой типичной почвой (Greyzemic Phaeozem (Loamic)). В загрязненных тяжелыми металлами подзолах песчаных иллювиально-железистых (Carbic Podzols (Arenic)) усредненная эмиссия CO₂ в целом аналогична эмиссии из фоновой незагрязненной тяжелыми металлами почвы.

Ключевые слова: парниковые газы, тяжелые металлы, городские почвы, почвенное дыхание, Naplic Chernozems Loamic Pachic, Greyzemic Phaeozems Loamic, Carbic Podzols Arenic, Technic Greyzemic Phaeozems Loamic, Technosols

DOI: 10.31857/S0032180X21010111

ВВЕДЕНИЕ

Почвы городских территорий являются базовым компонентом урбоэкосистем, выполняющих важнейшие экологические функции. На фоне повышения уровня антропогенного воздействия экосистемные услуги (функции) почв городов в значительной степени ограничены (нарушены) [4, 9, 11].

Почвы являются не только своеобразным депо для органического углерода, но и источником его эмиссии в атмосферу [14, 18, 27]. В результате многоплановой хозяйственной деятельности человека происходит механическое нарушение почвенного профиля, формирование почвоподобных конструкций, химическое загрязнение почв, уплотнение, изреживание растительного покрова. Эти изменения почвенно-растительного покрова приводят к смещению баланса углерода в сторону эмиссии в атмосферу [16, 24, 25].

Одним из часто встречающихся видов химического загрязнения почв городов является загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) [8, 10, 11, 15]. Высокие концентрации ТМ запускают процессы реорганизации трофической структуры, изменения численности и видового состава почвенной биоты [1, 20, 22, 23], вследствие чего могут возникать значительные изменения объема и интенсивности эмиссии CO₂. При загрязнении почв ТМ, в одних случаях поток CO₂ возрастает, в других значительно уменьшается [3, 6, 16, 17, 19]. Это связано с уровнем загрязнения почв ТМ и различными реакциями почвенной биоты на эти загрязнения [3, 6].

При оценке оптимального состояния почв городских территорий очень существенной проблемой является вопрос рационального и обоснованного выбора эталона. Городские почвы испытывают значительную антропогенную нагрузку.

При оптимизации функций почв и реализации мероприятий по уменьшению негативного воздействия на них в условиях города необходимо понимание факта невозможности возвращения почв к их нативному состоянию. Поэтому оценка экологического состояния почв по эталонным значениям (почв заповедных зон, почв участков вне городской среды) показателей свойств для этих целей не совсем корректна. Необходимо выбирать эталонную (условно фоновую) территорию внутри города. Такая оценка может позволить качественно и количественно оценивать экологическую устойчивость почв городов и рационально регулировать антропогенное воздействие на них.

Целью работы являлась оценка пространственно-временной изменчивости эмиссии CO₂ в условиях загрязнения ТМ различных по структуре землепользования и генезису почв Курска.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Курск находится в западной части Центрально-Черноземного региона и является одним из старейших городов Центральной России. Город расположен на Среднерусской возвышенности в пределах лесостепной зоны. В черте города протекают реки Сейм, Тускарь, Кур.

Территория города исходно представлена четырьмя типами нативных почв, исторически сформированных в ходе голоцена — серыми и темно-серыми лесными и черноземами выщелоченными на лёссовидных суглинках, подзолами песчаными, сформированными на древнеаллювиальных и флювиогляциальных песчаных отложениях в надпойменных террасах реки Сейм и аллювиальными почвами пойм рек на древнеаллювиальных отложениях [8]. Степень урбанизации в Курске достаточно высока, население города насчитывает 449,6 тыс. — 40,6% от численности населения Курской области [7]. В ходе многолетнего хозяйственного использования земель Курска пестрота почвенного покрова значительно возросла, появился целый ряд антропогенно-преобразованных городских почв, среди которых преобладают запечатанные почвы, урбаноземы, урбочерноземы, урбосерые, агрочерноземы, техноземы, реплантоземы, хемоземы [8, 13].

Город расположен в зоне неустойчивого увлажнения земель. В течение лета запасы почвенной влаги постепенно убывают, периодически доходя до минимума — уровня влаги увядания растений. Среднегодовая температура в Курске составляет +5,7°C, средние температуры января — -8,6°C, июля — +19,3°C. Среднегодовое количество осадков — около 530–630 мм в год [5].

Озелененные части территории города представлены природными, природно-антропогенными

и антропогенными типами растительных сообществ: широколиственными лесами, материковыми и пойменными лугами, лесопарками, газонами, пустырями [12].

Исследование проводилось на шести участках представительных экосистем г. Курска — фоновых и загрязненных. В качестве фоновых (условно фоновых) территорий в условиях городской агломерации были выбраны участки с ненарушенными почвами, не загрязненными ТМ: серой типичной среднесуглинистой на среднем лёссовидном суглинке (Greyzemic Phaeozems Loamic), чернозема выщелоченного миграционно-мицелярного среднесуглинистого на тяжелом карбонатном лёссовидном суглинке (Haplic Chernozems Loamic Pachic), подзола песчаного иллювиально-железистого на древнеаллювиальных и флювиогляциальных песчаных отложениях (Cambic Podzols Arenic). Данные фоновые почвы явились исходными для исследуемых почв с антропогенно-преобразованным профилем и загрязненных ТМ: урбосерой типичной почвы (Technic Greyzemic Phaeozems Loamic), урбанозема собственно (Technosols) и подзола песчаного иллювиально-железистого (табл. 1). Диагностику и классификацию осуществляли на основе современных представлений о классификации городских почв [13, 26].

Для изучения морфологических и физико-химических свойств почв на каждом из изученных участков закладывалось по одному почвенному разрезу и по 2 скважины агрохимическим буром для репрезентативности выборки. Отбор проб проводился из каждого генетического горизонта (ГОСТ 28168–89). Определение физических и химических свойств почв осуществлялось по стандартным методикам (по 3 пробы для каждого генетического горизонта): рН_{KCl} (ГОСТ 26483-85), содержание органического вещества (ГОСТ 26213-91 по Тюрину), гранулометрический состав — по методу Н.А. Качинского, содержание подвижных форм ТМ (Pb, Cd) — методом атомно-абсорбционной спектроскопии, пробоподготовка — согласно РД 52.18.289-90, применялась вытяжка ацетатно-аммонийного буфера рН — 4,8.

На всех шести участках почвенного экологического мониторинга (табл. 1) было установлено стационарное оборудование для измерения почвенных потоков парниковых газов камерным методом. На каждом участке напочвенные основания (диаметром 20 см) в пятикратной повторности врезались в почву на глубину 5 см. С помощью зажимов на них закреплялась экспозиционная камера, чтобы препятствовать диффузии газов из внешней среды. Прямое измерение потоков CO₂ осуществлялось *in situ* с помощью мобильного высокоточного инфракрасного газоанализатора Li-820. На врезанные в почву осно-

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Тип почвы	Объект	Функциональная зона, особенности землепользования, локализация	Растительность	Координаты
Серая типичная среднесуглинистая	Фон 1	Селитебная зона, земли поселений, луг косимый, Агробиостанция КГУ	<i>Lolium perenne</i> L., <i>Taraxacum officinale</i> Webb. s.l., <i>Medicago falcata</i> L., <i>Plantago major</i> L. s.l., <i>Trifolium pratense</i> L.	51°79' с. ш. 36°20' в. д.
Урбосерая типичная среднесуглинистая	Техногенез 1	Граница промышленной и селитебной зон с постройками сельского типа, луг сенокосный/пастбищный, котельная северо-западного микрорайона	<i>Trifolium repens</i> L., <i>Medicago falcata</i> L., <i>Lolium perenne</i> L., <i>Artemisia absinthium</i> L., <i>Achillea millefolium</i> L., <i>Poa pratensis</i> L.	51°76' с. ш. 36°13' в. д.
Чернозем выщелоченный миграционно-мицелярный, среднесуглинистый	Фон 2	Земли для садоводства и огородничества, луг на дачном участке, СНТ Лавсан	<i>Prunus cerasus</i> L., <i>Acer negundo</i> L., <i>Taraxacum officinale</i> Webb. s.l., <i>Leucanthemum vulgare</i> , <i>Lolium perenne</i> L.	51°63' с. ш. 36°07' в. д.
Урбанозем собственно среднесуглинистый	Техногенез 2	Промышленная зона, пустырь вблизи промышленной площадки, ТЭЦ-1	<i>Robinia pseudoacacia</i> L., <i>Acer negundo</i> L., <i>Taraxacum officinale</i> Webb. s.l., <i>Leucanthemum vulgare</i> , <i>Lolium perenne</i> L.	51°66' с. ш. 36°11' в. д.
Подзол песчаный иллювиально-железистый	Фон 3	Рекреационная зона, земли под лесными насаждениями, урочище Горелый лес	<i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Moehringia trinervia</i> (L.) Clairv, <i>Mycelis muralis</i> (L.), <i>Chelidonium majus</i> L., <i>Impatiens parviflora</i> DC, <i>Bryophyta</i>	51°72' с. ш. 36°25' в. д.
Подзол песчаный иллювиально-железистый	Техногенез 3	Рекреационная зона, земли под лесными насаждениями, Гуторевый бор	<i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Chelidonium majus</i> L., <i>Mycelis muralis</i> (L.), <i>Bryophyta</i>	51°66' с. ш. 36°07' в. д.

вания герметично закреплялась экспозиционная камера (диаметром 20 см, высотой 15 см), соединенная с газоанализатором входящим и исходящим воздухопроводными шлангами. Воздух из камеры нагнетался в газовый анализатор с помощью встроенного насоса, за счет чего на приборе регистрировали прирост концентрации CO₂ в камере с частотой 1 Гц. Газоанализатор оснащен нетбуком с установленным программным обеспечением для Li-820. Измерения осуществлялись ежемесячно. Измерения проводились один раз в сутки с 9.00 до 13.00 ч, определение эмиссии диоксида углерода из почв именно в этот промежуток времени оптимально отражает среднесуточные значения этого показателя [16, 17].

Одновременно с измерением эмиссии CO₂ в каждой точке определяли температуру (термометром Checktemp, Hanna, Германия; усреднение проведено для слоя 0–10 см, измерение в 5 см от основания) и влажность почвы (датчик SM300, Eijkelkamp, Нидерланды; интегрирован по глубине 0–7 см, измерение в 5 см от камеры) внутри и

снаружи основания в трех повторениях, температура воздуха снаружи и внутри камеры.

Условия проведения опыта характеризовались чередованием длительных засушливых периодов и периодов интенсивного выпадения осадков (рис. 1).

Данные по потокам обработаны статистически и представлены в виде среднего значения ± доверительный интервал за каждый день отбора с каждого участка. Существенность различий средних арифметических оценивалась по пересечению/не пересечению доверительных интервалов средних арифметических. Статистическая обработка осуществлена с помощью программного обеспечения STATISTICA 6.0, графический дизайн – с использованием средств Microsoft Excel 2007. Корреляционный (корреляция Пирсона) и регрессионный анализ проводился по 35-ти измерениям (5 измерений 1 раз в месяц) исследуемых параметров для каждого ключевого участка.

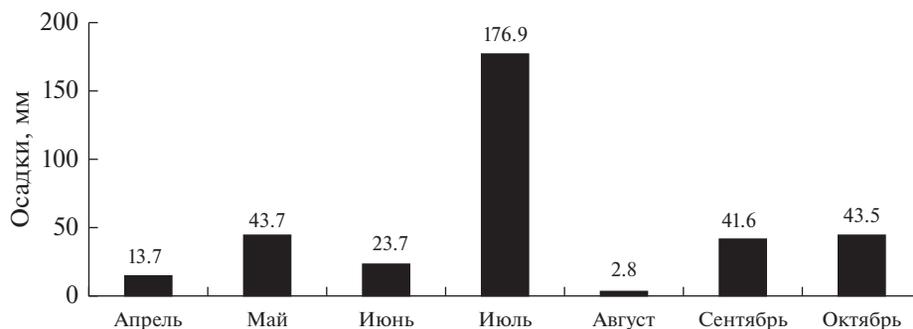


Рис. 1. Сезонная динамика количества осадков, выпавших в г. Курске в период проведения исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства почв. Параллельно анализируемые фоновые и антропогенно-измененные почвы ключевых участков г. Курска (Фон 1 – Техногенез 1, Фон 2 – Техногенез 2, Фон 3 – Техногенез 3) имели сходство по характеру распределения органического вещества в почвенном профиле и кислотно-основным условиям. Однако наблюдались отличия в количественном содержании органического вещества и плавности его убывания вниз по профилю (табл. 2).

Максимальное количество органического вещества отмечалось в урбаноzone (Техногенез 2), в гумусово-аккумулятивном горизонте его содержание достигало 4.9%. Минимальное содержание органического вещества было характерно для подзола песчаного – 0.5% (Фон 3). Мощность профиля варьировала от 75 см в подзоле песчаном

Таблица 2. Строение профилей и базовые показатели экологического состояния изучаемых почв

Объект, почва	Индексы диагностических горизонтов (нижняя граница, см)	Органическое вещество, %	pH (KCl)	Содержание подвижных форм тяжелых металлов в гумусово-аккумулятивных горизонтах, мг/кг*	
				Pb	Cd
Фон 1, серая типичная	AУ (18)	3.3 ± 1.22	5.3 ± 0.1	1.81 ± 0.7	0.13 ± 0.04
	AEL (28)	1.2 ± 0.54	5.0 ± 0.3		
	BEL (68)	1.1 ± 0.11	5.4 ± 0.4		
	Bt (114)	0.6 ± 0.35	5.5 ± 0.2		
Техногенез 1, урбосерая типичная	AУ _{urb} (15)	2.9 ± 0.68	5.1 ± 0.1	7.41 ± 0.5	0.09 ± 0.01
	AEL (24)	0.7 ± 0.18	4.8 ± 0.2		
	BEL (66)	0.8 ± 0.42	5.2 ± 0.1		
	Bt (98)	0.3 ± 0.27	5.3 ± 0.3		
Фон 2, чернозем выщелоченный	AU (47)	4.9 ± 1.2	6.8 ± 0.2	2.46 ± 0.6	0.18 ± 0.04
	AB (69)	1.7 ± 0.38	6.9 ± 0.2		
	BCAmc (102)	1.1 ± 0.63	6.9 ± 0.1		
	BCca (130)	1.0 ± 0.56	7.0 ± 0.1		
Техногенез 2, урбанозем собственно	U1 (10)	2.6 ± 1.49	7.2 ± 0.6	23.44 ± 1.4	0.74 ± 0.03
	U2 (62)	2.7 ± 0.98	7.3 ± 0.8		
	[B] (100)	1.8 ± 0.76	7.8 ± 0.5		
Фон 3, подзол песчаный	O (3)	0.50 ± 0.44	5.2 ± 0.2	2.64 ± 0.4	0.01 ± 0.01
	E (14)	0.38 ± 0.31	4.7 ± 0.2		
	BF (78)	0.15 ± 0.15	5.2 ± 0.1		
Техногенез 3, подзол песчаный	O (4)	2.1 ± 1.09	4.0 ± 0.1	43.2 ± 3.8	0.82 ± 0.22
	E (15)	0.37 ± 0.21	4.2 ± 0.1		
	BF (75)	0.21 ± 0.25	4.5 ± 0.2		

* Значение ПДК Pb – 6 мг/кг [ГН 2.1.7.2041-06], среднее (фоновое для Курска) содержание подвижных форм Cd в почвах рекреационных и санитарно-защитных зон – 0.2 мг/кг [8].

до 130 см в черноземе выщелоченном. Значительное уменьшение содержания органического вещества, наблюдаемое по всему профилю урбосерой почвы, можно объяснить сенокосным и пастбищным режимами, которые приводили к многолетнему отчуждению образующейся фитомассы.

Подзол песчаный (Фон 3), серая типичная (Фон 1) и урбосерая типичная (Техногенез 1) почвы относились к группе слабокислых почв ($5.1 < \text{pH} < 5.3$). Подзол песчаный на участке Техногенез 3 имел сильноокислую реакцию среды ($\text{pH} 4.0$). Чернозем типичный и урбанозем собственно относились к нейтральным и близким к нейтральным почвам ($6.8 < \text{pH} < 7.2$). Наблюдалась значительная пространственная неоднородность значений pH солевой вытяжки: для участков Техногенез 3, Техногенез 2 и Фон 2 отмечалось отчетливое снижение кислотности вниз по почвенному профилю, а на участках Фон 3, Техногенез 1 и Фон 1 отмечено повышение кислотности в элювиальных и гумусово-элювиальных горизонтах (E, AEL). Как правило, техногенная нагрузка приводила к появлению более значительного пространственного разнообразия pH_{KCl} внутри профиля антропогенно-преобразованных почв (0.5–0.6 единицы pH). Фоновые почвы отличаются меньшими внутривершинными колебаниями значений pH_{KCl} солевой вытяжки (0.2–0.3 единицы pH) (табл. 2).

Во всех трех типах антропогенно-преобразованных почв зафиксированы превышения ПДК подвижными формами свинца – от 1.23 до 7.2 раза. Для почв участков Техногенез 2 и Техногенез 3 также характерно превышение в 3.7 и 4.1 раза среднего (фонового) содержания подвижных форм кадмия, экспериментально установленного для почв рекреационных и санитарно-защитных зон Курска [8].

Сезонная динамика почвенных потоков CO_2 из фоновых и антропогенно-преобразованных почв Курска. Фоновые почвы Курска характеризуются отчетливой сезонной динамикой и пространственной неоднородностью эмиссии CO_2 . По результатам проведенного исследования стоит отметить, что максимальный поток CO_2 , в ходе всего периода мониторинга, фиксировался из серой типичной почвы (Фон 1), минимальная скорость эмиссии диоксида углерода отмечалась для подзола песчаного (Фон 3), что объясняется более легким гранулометрическим составом, меньшим содержанием органического вещества и влаги в почве, а также минимальными значениями температуры почвы. Перечисленные параметры в совокупности со спецификой органического опада (хвой сосны) существенно влияют на микробиологическую активность почв.

Показатель эмиссии CO_2 чернозема выщелоченного, несмотря на более высокое содержание

и запас органического вещества, все же уступал аналогичному показателю серой типичной почвы. Это может объясняться как различной активностью почвенной микробиоты, так и скоростью химических процессов деструкции негумифицированного органического вещества.

Скорость эмиссии CO_2 из фоновых почв города Курска была значительно больше в летние месяцы, чем в осенние и весенние. Повышение эмиссии CO_2 в летний период происходит за счет прироста биомассы корневых систем растений и мобилизации почвенной биоты, которая активно осуществляющей процессы деструкции органического вещества и минерализации гумуса. Минимальная скорость выделяемого почвой CO_2 в атмосферу выявлялась осенью практически на всех участках, за исключением серой типичной почвы – Фон 1, что обусловлено оптимальным сочетанием режимов тепла и влаги серой почвы в сентябре по сравнению с остальными исследуемыми типами почв (рис. 2). Уменьшение количества выпавших осадков приводило к уменьшению содержания влаги в почве в июне 2018 г. Потоки CO_2 серой типичной почвы (Фон 1) и чернозема выщелоченного (Фон 2) в июне значительно меньше майских.

Потоки диоксида углерода из антропогенно-преобразованных почв города Курска характеризовались разнонаправленным изменением их скорости (рис. 2). На протяжении всего периода исследования отмечалось, что значения эмиссии CO_2 из урбосерой типичной почвы (Техногенез 1) достоверно меньше таковых из серой типичной почвы (Фон 1). Кривые скорости эмиссии CO_2 из этих типов почв имеют практически сопоставимый сезонный ход. Исключением являлся сентябрь, когда серая типичная почва (Фон 1) характеризовалась увеличением на 23.1% скорости эмиссии CO_2 в атмосферу, относительно значительной скорости эмиссии в августе, в то время как для загрязненной урбосерой почвы было характерным уменьшение скорости эмиссии CO_2 на 36.0% относительно августовского показателя. Пики эмиссии CO_2 для урбосерой приходились на май и август, для серой типичной – на май и сентябрь. Максимальный поток – $33.7 \text{ г } \text{CO}_2/\text{м}^2$ в сутки фиксировался на участке Фон 1 (серая типичная почва). Минимальный поток – $6.4 \text{ г } \text{CO}_2/\text{м}^2$ в сутки отмечался на участке Техногенез 1 в октябре (урбосерая почва). Урбанозем на участке Техногенез 2 и чернозем на участке Фон 2 имели схожую временную динамику почвенной эмиссии CO_2 (рис. 3). Конфигурации временных кривых хода эмиссии синхронны. Однако для загрязненного урбанозема эмиссия CO_2 достоверно больше, чем для чернозема выщелоченного (на 37.5% в июле и на 33.9% в октябре). Пики скоро-

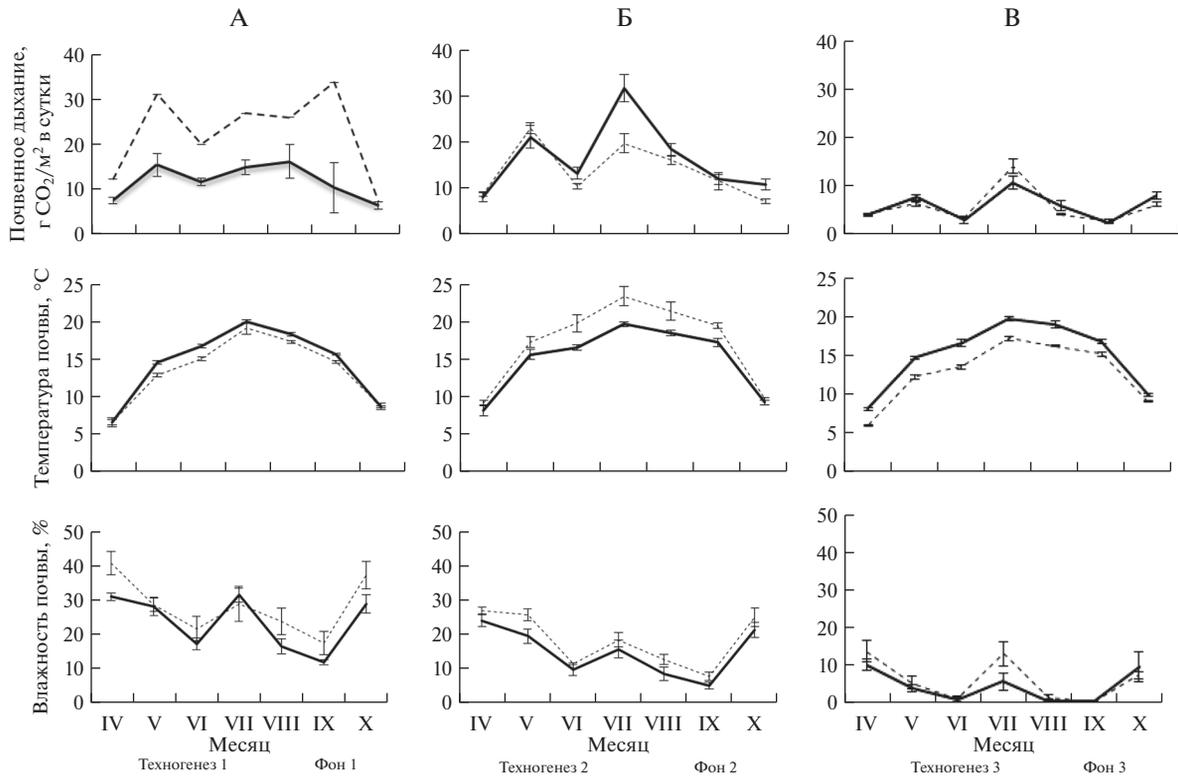


Рис. 2. Сезонная динамика дыхания, температуры и влажности фоновых (сплошная линия) и антропогенно-преобразованных (пунктир) серых и урбосерых типичных среднесуглинистых почв (А, фон 1), черноземов выщелоченных среднесуглинистых и урбаноземов (Б, фон 2), подзолов песчаных иллювиально-железистых (В, фон 3).

сти эмиссии CO₂ для почв участков ТЭЦ и Лавсан приходились на май и июль. Максимальное значение скорости выделения диоксида углерода из почвы выявлено для урбанозема и составляла 31.6 г CO₂/м² в сутки. Минимальный поток CO₂, составивший 7.2 г CO₂/м² в сутки, фиксировался у чернозема. Временная динамика эмиссии CO₂ из загрязненных ТМ и фоновых подзолов песчаных на участках Фон 3 и Техногенез 3 также характеризовались синхронностью хода хронологических кривых. Скорости выделяемого в атмосферу CO₂ почвами этих участков имели достоверные различия в мае, июле, августе и октябре. Так в июле эмиссия CO₂ на 24.8% была больше для незагрязненного ТМ подзола песчаного (Фон 3). В мае, августе и октябре наблюдалась противоположная ситуация – скорость выделяемого CO₂ была на 16.8, 30.4 и 23.4% больше из загрязненного ТМ подзола песчаного (Техногенез 3). Максимальный поток для обоих участков зафиксирован в июле. Для загрязненного ТМ подзола песчаного иллювиально-железистого он составил 10.6 г CO₂/м² в сутки, для незагрязненного – 14.2 г CO₂/м² в сутки. Минимальная скорость эмиссии диоксида углерода в атмосферу почвами ключевых участков Фон 3 и Техногенез 3 также совпали по времени и приходились на сентябрь. На участке Фон 3 подзол

песчаный выделял в атмосферу 2.8 г CO₂/м² в сутки, а на участке Техногенез 3 – 2.4 г CO₂/м² в сутки.

Корреляционно-регрессионный анализ. Для фоновой серой почвы отмечалась обратная корреляционная связь показателя эмиссии диоксида углерода с влажностью почвы. Для фонового подзола песчаного, а также загрязненного ТМ подзола песчаного установлена прямая корреляция эмиссии CO₂ с влажностью почвы. Для чернозема, урбанозема и урбосерой почвы корреляция показателя эмиссии CO₂ с влажностью почвы либо крайне низкого уровня, либо вообще не обнаруживалась (табл. 3).

Положительная зависимость эмиссии CO₂ от температуры почвы для рассматриваемых суглинистых почв (серая, чернозем, урбосерая, урбанозем) отчетливо выражена, коэффициент корреляции имеет средний уровень и колеблется в диапазоне 0.58–0.73 (*p* ≤ 0.05). Корреляции между эмиссией CO₂ и температурой почвы для песчаных почв (подзолы) не обнаружено.

Отмечено разнообразие регрессионных моделей, описывающих взаимоотношения почвенного дыхания с влажностью и температурой почвы. Взаимоотношения подчинялись как линейным, так и нелинейным (экспоненциальным, полиномиальным, степенным) видам регрессии.

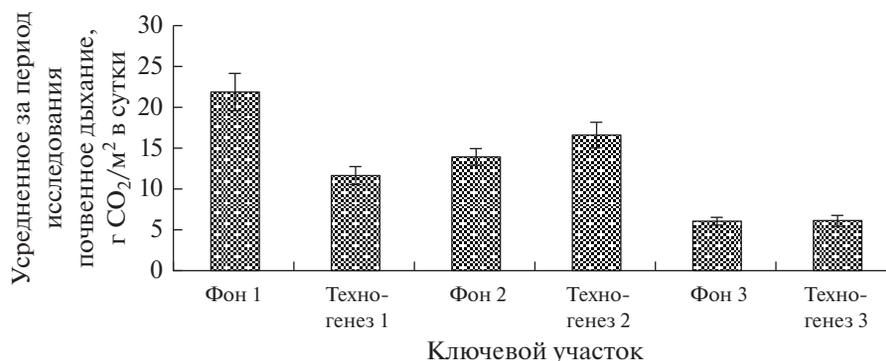


Рис. 3. Эмиссия CO₂ из фоновых и антропогенно-преобразованных почв (загрязненных ТМ), усредненная за период исследования.

Усредненная сезонная эмиссия CO₂ из фоновых и антропогенно-преобразованных почв Курска. Сравнивая усредненное количество выделяемого из изученных почв CO₂ на участках, выбранных в качестве фоновых в рамках их генетической разнородности, установили, что эмиссия убывала в следующем ряду почв: серая типичная почва > чернозем выщелоченный > подзол песчаный (рис. 3). Более высокая скорость почвенной эмиссии CO₂ из серой почвы (21.7 г CO₂/м² в сутки), чем от чернозема (16.5 г CO₂/м² в сутки) может объясняться совокупностью гидротермических условий (сочетание тепла и влаги в почве), которые определяли направленность почвообразовательных процессов на депонирование углерода в черноземе и на активное разложение органического опада и минерализацию гумуса в серой почве.

В целом, усредненная эмиссия CO₂ в суглинистых почвах значительно превышала таковую песчаных почв. Так, фоновые подзолы песчаные выделяли в атмосферу на 72.3% меньше диоксида углерода, чем фоновые серые и на 56.5% меньше, чем фоновые черноземы. По-видимому, это свя-

зано с низким содержанием органического вещества в подзолах песчаных, крайне низкой влагоемкостью почв легкого гранулометрического состава, разреженностью растительного покрова и относительно невысокой активностью почвенной микробиоты.

Для различных по генезису антропогенно-преобразованных и загрязненных ТМ почв г. Курска скорость потоков CO₂ характеризовалась высокой пространственной неоднородностью и убывала в ряду: урбанозем > урбосерая > подзол песчаный. Эмиссия CO₂ в урбаноземе достоверно больше таковой урбосерой почвы, что, вероятно, связано с разницей в активности почвенной микробиоты, запасах органического вещества, уровне загрязнения ТМ и различиями в экологической устойчивости этих почв к загрязнению ТМ.

Минимальный уровень эмиссии CO₂ был характерным для загрязненного ТМ подзола на участке Техногенез 3. Этот показатель на 45.4% меньше, чем в урбосерой почве и на 63.6% меньше, чем в урбаноземе.

Таблица 3. Корреляционная и регрессионная связь между скоростью эмиссии CO₂ и гидротермическими условиями почв г. Курска ($n = 35$)

Почва*	Влажность почвы, %			Температура почвы, °C		
	r	уравнение регрессии	R^2	r	уравнение регрессии	R^2
Фоновые почвы						
СТ	-0.6	$y = -0.049x^2 + 2.182x + 2.466$	0.46	0.66	$y = 5.2077e^{0.0942x}$	0.52
ЧВ	0.0	—	—	0.58	$y = 1.3489x^{0.7987}$	0.43
ПП	0.6	$y = 0.0714x^{0.2042}$	0.46	0.32	$y = 0.1236x^2 - 2.5824x - 17.026$	0.26
Антропогенно-преобразованные почвы						
УСТ	-0.2	$y = -0.1094x + 14.198$	0.04	0.73	$y = -0.0601x^2 + 2.2989x - 3.062$	0.6
УС	-0.1	$y = -0.1201x^2 + 3.3921x - 1.8662$	0.29	0.65	$y = 4.4195e^{0.079x}$	0.51
ПП	0.5	$y = 4.4706x^{0.2404}$	0.5	0.11	$y = 0.0886x + 4.7087$	0.01

* СТ – серая типичная почва, ЧВ – чернозем выщелоченный, ПП – подзол песчаный, УСТ – урбосерая типичная почва, УС – урбанозем собственно.

Отмечалось неоднозначное влияние загрязнения почв Курска ТМ на эмиссию CO₂. В целом можно сказать, что вариации значений скорости эмиссии CO₂ также могут зависеть от базовых свойств почвы, характера и уровня загрязнения ТМ. Ранее установлено, что вклад гетеротрофного компонента в поток CO₂ фоновых серых почв, составляет 60–70%, а при усилении антропогенной трансформации серых почв данное значение заметно уменьшалось [16]. На участке Техногенез 1 усредненная за вегетационный сезон 2018 г. (с апреля по ноябрь) эмиссия CO₂ из урбосерой типичной почвы составляла 11.5 г CO₂/м² в сутки, что на 47.0% меньше, чем на участке Фон 1. Такой показатель эмиссии из урбосерой типичной почвы объясняется более резким уменьшением содержания органического вещества по профилю и меньшим его запасом в метровой толще почвы по сравнению с серой типичной почвой. Возможно, это также связано с угнетением развития микробного сообщества, вызванного загрязнением урбосерой типичной почвы свинцом (1.28 ПДК).

Для суглинистых почв на участках Техногенез 2 и Фон 2 наблюдалась противоположная картина. Усредненная за вегетационный сезон почвенная эмиссия CO₂ из загрязненного свинцом и кадмием урбанозема была выше (на 16.4%), чем от чернозема (Фон 2). Такие значения эмиссии CO₂ в загрязненном ТМ урбаноземе, по-видимому, являются результатом длительных техногенных преобразований почвенных свойств: физическое нарушение целостности горизонтов, подсыпка новых грунтов, уплотнение, постоянный рост содержания Pb и Cd. Подобные явления отмечались в аналогичных работах, проведенных на территориях г. Курска [16], а также США и Китая [21, 24, 25]. Присутствие высоких концентраций подвижных форм ТМ в почве приводит к ускоренному массовому обмену почвенных микроорганизмов, которые в условиях чрезмерного техногенного пресса начинают реализацию программы выработки адаптаций к меняющимся условиям среды [13]. Отметим, что доминирующий вклад в изменение эмиссии CO₂ в загрязненной почве приходился именно на дыхание почвенных микроорганизмов [17, 18], которые отличаются повышенной чувствительностью к техногенному воздействию. Вклад корневого дыхания в изменение общего потока эмиссии CO₂ невелик, так как растительный покров на исследуемых участках имел схожий набор видов и биологическую продуктивность.

Усредненные значения эмиссии CO₂ из загрязненного ТМ и фонового подзолов песчаных не имели существенных различий. Отсутствие влияния ТМ (загрязнение свинцом 7.2 ПДК) объясняется тем, что Pb сосредотачивался только в органогенном горизонте, представленном грубой

неразложившейся и полуразложившейся органикой. В подзолистом и иллювиально-железистом горизонтах превышений ПДК свинца не обнаруживалось. По-видимому, сценарий миграции загрязняющего элемента имел следующий характер: техногенный Pb концентрировался в органогенном горизонте (O), постепенно переходил в почвенный раствор и достаточно быстро вымывался за пределы почвенного профиля. Процессы деструкции в горизонте O подзола песчаного в большинстве своем осуществляют микроскопические грибы. Их доля в микробном сообществе органогенного горизонта подзола может составлять 89–94% [2]. Известно, что загрязнение некоторых типов почв тяжелыми металлами может приводить как к угнетению некоторых видов грибной микрофлоры, так и к стимулированию развития резистентных к ТМ видов микромицетов [1, 20, 23]. Проявлением последнего являлись периодически возникающие повышения скорости эмиссии CO₂ из подзола песчаного на участке Техногенез 3, относительно фонового участка (Фон 3), например в мае и октябре при равнозначных условиях почвенного климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всех исследуемых типов почв максимальная эмиссия CO₂ наблюдалась в летний период и была в большей степени обусловлена оптимальными гидротермическими условиями. Минимумы эмиссии приходились на весну и осень. Фоновые почвы г. Курска (чернозем выщелоченный, серая типичная почва, подзол песчаный иллювиально-железистый) и их антропогенно-преобразованные и загрязненные ТМ модификации (урбанозем собственно, урбосерая типичная почва, подзол песчаный иллювиально-железистый) имеют синхронные временные кривые сезонного хода эмиссии CO₂, что подтверждает репрезентативность выбранных для исследования ключевых участков. Максимальное значение усредненной за сезон эмиссии CO₂ зафиксировано для серой типичной почвы участка Фон 1 – 21.7 г CO₂/м² в сутки, минимальное – для подзолов песчаных Фон 3 и Техногенез 3 – 6.0 г CO₂/м² в сутки. Загрязнение почв г. Курска тяжелыми металлами неоднозначно сказывается на процессах почвенного дыхания. Так, усредненная за вегетационный сезон скорость эмиссии CO₂ из урбанозема по сравнению с фоновым аналогом – черноземом – возрастает на 16.4%. Для урбосерой почвы этот показатель, наоборот, уменьшается на 47% по сравнению с ее фоновым аналогом – серой почвой. В загрязненных подзолах песчаных усредненная эмиссия CO₂ в целом не отличается от фонового не загрязненного ТМ аналога.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4086.2018.5.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багаева Т.В., Ионова Н.Э., Надеева Г.В. Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов. Казань: Казанский университет, 2013. 56 с.
2. Богородская А.В. Микробная биомасса, ее активность и структура в песчаных подзолах южнотаежных сосняков // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 224–228.
3. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13050171>
4. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация). М.: Ойкумена, 2003. 266 с.
5. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Курской области в 2018 году. Департамент экологической безопасности и природопользования Курской области. Курск. 2019. 214 с. [Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.ecolog46.ru/wp-content/uploads/2019/10/DOKLAD_2019-1.pdf 25.02.2020]
6. Копчик Г.Н., Кадулин М.С., Захарова А.И. Влияние техногенного загрязнения на эмиссию диоксида углерода почвами в Кольской Субарктике // Журнал общей биологии. 2015. Т. 76. № 1. С. 48–62.
7. Курская область в цифрах. 2019: Краткий статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Курской области. Курск, 2019. 94 с. <https://kurskstat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%9A%D1%83%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D0%B2%20%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%85%202019.pdf> 25.02.2020
8. Неведров Н.П. Классификация почвенных повреждений городских экосистем Курска // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 2(44). С. 111–118.
9. Неведров Н.П., Дюканова Е.Н., Неведрова Н.Ю. Содержание тяжелых металлов в поверхностных горизонтах почв функциональных зон Курской городской агломерации // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2016. № 11(232). Вып. 35. С. 139–145.
10. Неведров Н.П., Проценко Е.П., Глебова И.В. Соотношение содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах Курска // Почвоведение. 2018. № 1. С. 111–117. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010117>
11. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е. Динамика загрязнения городских почв свинцом (на примере Восточного округа Москвы) // Почвоведение. 2007. № 8. С. 984–997.
12. Полуянов А.В. Флора Курской области. Курск, 2005. 263 с.
13. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104>
14. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
15. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Касимова Н.С. М.: ИП Филимонов М.В. 2014. 560 с.
16. Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р. Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO₂ почвами естественных и городских экосистем Центрально-черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15040097>
17. Саржанов Д.А., Васенев И.И., Валентини Р. Анализ пространственного разнообразия и временной динамики почвенных потоков парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в условиях представительных урбоэкосистем г. Курска // АгроЭкоИнфо. 2015. № 6. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/6/st_37.doc
18. Смагин А.В. Газовая функция почв // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1211–1223.
19. Bandaranayake W., Qian Y.L., Parton W.J., Ojima D.S., Follett R.F. Estimation of Soil Organic Carbon Changes in Turfgrass Systems Using the CENTURY Model // Agron. J. 2003. V. 95. P. 558–563.
20. Bruins M.R., Bruin M.R., Kapil S., Oehme F.W. Microbial resistance to metals in the environment // Eco-toxic. Environ. Safety. 2000. V. 45. P. 198.
21. Chapin F.S. III, Woodwell G.M., Randerson J.T. et al. Reconciling Carbon & cycle Concepts, Terminology, and Methods // Ecosystems. 2006. V. 9. P. 1041–1050.
22. Deviatova T., Alaeva L., Negrobova E., Kramareva T. The CO₂ emission in urbanic soils in the conditions of intensive technogenic pollution // Geophysical Research Abstracts. 2017. V. 19. P. 72–97.
23. Kaye J.P., McCulley R.L., Burkez I.C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems // Glob. Change Biol. 2005. V. 11. P. 575–587.
24. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Nowak D.J. Carbon storage by urban soils in the United States // J. Environ. Quality. 2006. V. 35. P. 566–575.
25. Rossiter D.G. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources // J. Soils Sediments. 2007. V. 7. P. 96–100.
26. Swift S. Sequestration of carbon by soil // Soil Sci. 2011. V. 166. P. 858–871.

Seasonal Dynamics of CO₂ Emission in Soils of the City of Kursk

N. P. Nevedrov^{1, *}, D. A. Sarzhanov², E. P. Protsenko¹, and I. I. Vasenev²

¹*Kursk State University, Kursk, 305000 Russia*

²*Russian State Agrarian University-Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127550 Russia*

**e-mail: 9202635354@mail.ru*

Variability of CO₂ emission in space and time in the soils of Kursk under different land use, pollution level and soil genesis has been assessed. The data on the seasonal dynamics of CO₂ emissions in reference (forested recreational areas) and urban soils that suffer from heavy pollution load are presented. Seasonal dynamics of soil CO₂ emission depends on a number of soil factors: season, soil type, organic matter content, anthropogenic modifications of soil profiles, hydrothermal conditions, and heavy metal pollution. Soil hydrothermal conditions to a greater extent determine the intensity and characteristics of the seasonal dynamics of soil CO₂ emission with a maximum in the summer period. In human-modified soils, multidirectional transformation of soil CO₂ emissions is noted. The intensity of CO₂ emission in soils of various genesis is quite different. Heavy metal pollution of the soil has an ambiguous effect on the soil emission processes: the CO₂ emission rate from Technosols increased by 16.4% compared to the reference soil – Luvic Chernozems (Loamic, Pachic), while for Technic Greyzemic Phaeozems (Loamic) this indicator decreases by 47% compared to its background analogue – Greyzemic Phaeozem (Loamic). In Carbic Podzols polluted by heavy metals, the averaged CO₂ emissions are generally similar to those from the background soils unpolluted by heavy metals.

Keywords: soil carbon dioxide emission, heavy metals, urban soil, soil respiration, Luvic Chernozem (Loamic, Pachic), Greyzemic Phaeozem (Loamic), Carbic Podzol (Arenic), Technic Greyzemic Phaeozem (Loamic), Urbic Technosol