

ДЫХАНИЕ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ МЕЗО- И МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ЭМИССИЮ CO₂ ПОЧВ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗЕЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2023 г. В. И. Васенев^а, * (ORCID: 0000-0003-0286-3021), М. И. Варенцов^б, Д. А. Саржанов^в,
К. И. Махиня^г, Д. Д. Госсе^д, Д. Г. Петров^е, А. В. Долгих^е

^аГруппа географии почв и ландшафтов, Университет Вагенингена, Вагенинген, 6707 Нидерланды

^бНаучно-исследовательский вычислительный центр, МГУ им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, с. 4, Москва, 119991 Россия

^вАграрно-технологический институт, РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 8, корп. 2, Москва, 117198 Россия

^дФакультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^еИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия

*e-mail: slava.vasenev@wur.nl

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 23.04.2023 г.

Принята к публикации 03.05.2023 г.

Анализ климатических условий и пространственно-временной неоднородности почвенной эмиссии CO₂ в условиях мегаполиса необходим для понимания роли городской зеленой инфраструктуры в формировании баланса углерода и достижении углеродной нейтральности. Исследования динамики эмиссии CO₂ с параллельным наблюдением температуры и влажности почвы проводили на трех объектах зеленой инфраструктуры Московского мегаполиса, отличающихся по мезоклиматическим условиям, в 2019–2022 гг. Для каждого объекта сопоставляли участки с различными типами растительности, что позволило оценить внутреннюю неоднородность почвенных и микроклиматических условий. Температура почвы определяет до 70% общей дисперсии эмиссии CO₂. При этом среднегодовая температура почв на участке в центре города была почти на 3–6°C выше, а влажность — на 10–15% ниже по сравнению с периферийными участками (10–12 км от центра). Почва под газонами и кустарниками была в среднем на 1–2°C теплее и на 10–15% влажнее, чем под деревьями. Эмиссия CO₂ почвы под газонами была в среднем за год на 20–30% выше таковой по сравнению с почвой под древесными насаждениями на том же участке. При этом различия между участками с одинаковой растительностью в центре и на периферии достигали 50%, что отражает высокую уязвимость запасов углерода городских почв к мезоклиматическим аномалиям и высокие риски дальнейшего увеличения эмиссии CO₂ городскими почвами на фоне климатических изменений.

Ключевые слова: урбанизация, городские почвы, остров тепла, запасы углерода, почвенное дыхание, устойчивое развитие городской среды

DOI: 10.31857/S0032180X23600385, EDN: EOUZXI

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика глобальных климатических изменений в последние десятилетия является одним из основных приоритетов научной и политической повестки. Вышедший в 2022 г. 6-й рамочный доклад МГЭИК [59] — первый после принятия Парижских соглашений — показал, что традиционная цель не допустить глобальное потепление более, чем на +1.5°C не будет достигнута. Более того, удержать рост глобальных температур к 2100 г. в пределах +2.0°C возможно только при условии достижения углеродной нейтральности — компенсации выбросов парниковых газов эквивалентным депонированием в растительной био-

массе и почве (для наземных экосистем) [11, 28, 29]. В контексте углеродной нейтральности городские экосистемы традиционно рассматриваются как источник антропогенных эмиссий парниковых газов [54]. Занимая менее 3% территории суши [47, 66], города уже обеспечивают порядка 75% всех эмиссий CO₂ от сжигания ископаемого топлива [34], при этом их площадь продолжает увеличиваться. По последним оценкам темпов глобальной урбанизации на основании дистанционных данных, Россия занимает второе место после Китая по доле быстрорастущих городов [45]. В связи с этим особое внимание уделяется развитию городской зеленой инфраструктуры

как природно-ориентированного решения для поглощения и аккумуляции углерода [55, 58, 61]. При этом модели и программное обеспечение, используемое при расчете эффективности таких решений (например, C-calculator или iTree Eco), не всегда адекватно оценивают почвенную эмиссию CO₂, что может приводить к значительным неточностям прогнозов, учитывая высокое содержание углерода в городских почвах, их пространственную неоднородность и динамичность [3, 44, 68].

Несмотря на постоянный интерес к количественной оценке роли почв в экосистемном балансе углерода, реализованный, в частности, в масштабном проекте карбоновых полигонов [1, 8, 15], данные о потоках и запасах углерода в городских почвах не систематизированы и часто противоречивы. Локальные исследования [3, 7, 22] и литературные обзоры [6, 51, 52, 74] показывают, что удельные запасы углерода в городских почвах могут быть сопоставимы с естественными аналогами и даже превышать их. В то же время многие работы свидетельствуют о высокой эмиссии CO₂ городскими почвами, связанной с комплексом факторов, включая интенсивную микробную деградацию легкодоступных органических субстратов (торфа, компосты) [68], мероприятиями по содержанию и уходу (полив, кошение, внесение минеральных удобрений) [17, 46] или изменением водно-температурного режима [39, 69]. При этом эмиссия CO₂ характеризуется выраженной изменчивостью во времени и пространстве [79], однако факторы данной пространственно-временной изменчивости в условиях города остаются малоизученными.

Среди сложного комплекса факторов, определяющих пространственную неоднородность эмиссии CO₂ городскими почвами, ведущую роль играют мезо- и микроклиматические условия. Характерной особенностью городского климата, определяющей пространственные закономерности изменения температур, является эффект острова тепла, заключающийся в превышении температуры в городе по сравнению с окружающими территориями [16, 57]. Данный эффект определяется несколькими факторами, включая запечатанность городских почв, особенности теплофизических свойств искусственных материалов (асфальта, бетона и др.), трехмерную геометрию городской застройки, антропогенные эмиссии тепла [56, 62]. Эффект острова тепла выражен в наблюдаемой на метеостанциях температуре приземного воздуха, в диагностируемой по спутниковым данным температуре поверхности [78], а также в температуре почвы [49] и грунтовых вод [32]. Важной чертой метеорологического режима городских территорий является высокая пространственная неоднородность, обусловленная мозаичностью

городских ландшафтов – чередованием районов жилой застройки различной плотности и этажности, промзон, парков и лесопарков различного размера. Последние особо выделяются на фоне окружающих городских ландшафтов, являясь островами холода [33, 35], которые оказывают охлаждающий эффект и на окружающие застроенные территории [30, 70]. Несмотря на то, что температура и влажность являются общепризнанными абиотическими факторами, определяющими интенсивность почвенной эмиссии CO₂, долгосрочные наблюдения влияния городского микро- и мезоклимата на пространственно-временную динамику эмиссии CO₂ городскими почвами для Московского мегаполиса не проводились.

Цель исследования – оценить влияние неоднородности мезоклиматических и микроклиматических условий на эмиссию CO₂ почвами объектов городской зеленой инфраструктуры Московского мегаполиса с учетом сезонной динамики и межсезонных отличий.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Неоднородность климатических и почвенных условий Московского мегаполиса. Москва – крупнейший по населению и площади мегаполис Европы. Москва расположена в подзоне южной тайги и характеризуется умеренно-континентальным климатом (Dfb по классификации Кеппена). При этом концентрическая пространственная структура и высокая плотность застройки приводят к формированию мезоклиматических аномалий, в первую очередь, городского острова тепла, отмечаемого по данным многолетних метеорологических наблюдений. Разность температуры воздуха между центром города (метеостанция Балчуг) и загородными станциями в среднем за год составляет 2°C, а в отдельные дни с благоприятной погодой может достигать 10°C и более [49, 73]. Потепление климата в Москве дополнительно усиливается за счет тренда интенсификации городского острова тепла [12, 13]. Остров тепла определяет наличие мезоклиматического градиента температуры по направлению от центра города к периферии, на фоне которого проявляются более локальные термические особенности отдельных территорий, в частности, охлаждающее влияние парков и лесопарков [71, 77]. Городской остров тепла оказывает воздействие на почвенный температурный режим [50], процессы почвообразования [25] и функции почв города [27, 76].

Дерново-подзолистые почвы являются преобладающим зональным подтипом, однако в городе они преимущественно встречаются на территориях лесопарков и особо охраняемых природных территорий. На большей части города преоблада-

ют антропогенно-измененные и антропогенные почвы, отличающиеся высокой пространственной неоднородностью и разнообразием свойств и функций [20, 21]. Значительную территорию занимают реплантоземы и конструктороземы – искусственные почвы (почвоподобные тела), создаваемые преимущественно для задач озеленения и благоустройства. Характерным признаком профиля таких почв является поверхностный рекультивационный горизонт RAT, сформированный в результате подсыпок органических и органо-минеральных смесей. Ежегодно в Москву завозится более 1 млн м³ органо-минеральных смесей и их компонентов (торф, компост, котлованные и поверхностные техногенные грунты), большая часть которых характеризуется высоким содержанием органического вещества [2, 23]. В условиях повышенных температур создаются условия для быстрой минерализации органического вещества горизонта RAT, что сопряжено с дополнительной биогенной эмиссией CO₂ и соответствующим негативным воздействием на глобальный климат [43, 68].

Система экологического мониторинга в Москве включает более 80 станций контроля загрязнения атмосферы, которые регистрируют и микроклиматические параметры. Мониторинг состояния почв ежегодно проводится на 250–300 точках, однако он сфокусирован в основном на агрохимических свойствах и концентрации загрязняющих веществ, в то время как наблюдений за динамикой температуры и влажности почв и почвенной эмиссией CO₂ не проводится. Данные по эмиссии CO₂ почвами Москвы, полученные отдельными научными группами для локальных участков разными методами и за различный период [5, 25, 39, 40, 69], отражают значительную пространственно-временную неоднородность. В то же время анализ этой изменчивости в связи с изменением мезо- и микроклиматических параметров до настоящего времени не проводился, что и определило задачу исследования.

Участки наблюдений эмиссии CO₂, температуры и влажности почвы. Мониторинговые исследования проводили на трех участках городской зеленой инфраструктуры, отличающихся расположением относительно центра и, как следствие, мезоклиматическими условиями (по данным мезоклиматического моделирования). Участок 1 (Центр) – дворовая территория, Старомонетный переулок, 35/33; участок 2 (РУДН) – зеленая зона кампуса Российского университета дружбы народов на ул. Миклухо-Маклая и участок 3 (ЛОД) – Лесная опытная дача РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, городской лесопарк, заказник Петровско-Разумовский. На каждом участке было заложено по 10 пробных площадок размером около 1 м² (круги диаметром 1 м с камерой в центре),

при этом на участках Центр и РУДН площадки характеризовали разные типы растительности: древесную ($n = 5$), газонную ($n = 3$) и кустарниковую ($n = 2$), а на участке ЛОД – только древесную ($n = 10$) (рис. 1).

Наблюдения проводили с мая 2019 г. по октябрь 2021 г., что позволило охарактеризовать 3 вегетационных сезона. В условиях малоснежной зимы 2019/2020 гг. удалось провести годичный цикл наблюдений с мая 2019 г. по май 2020 г., в дальнейшем измерения проводили с апреля по октябрь со средним временным шагом в две недели.

Климатический мониторинг и моделирование. Для оценки влияния мезоклиматических условий в настоящем исследовании использовали данные наблюдений и моделирования. Данными наблюдений на метеостанциях Московского региона пользовались для оценки метеорологических условий и их внутригородской изменчивости за весь период экспериментальных наблюдений. Для участков Центр, РУДН и ЛОД применяли данные метеостанции Балчуг в центре города, метеорологической обсерватории МГУ в парковой зоне на юго-западе Москвы и метеостанции ВДНХ в парковой зоне на севере города (табл. 1). Для более детального пространственного анализа использовали результаты детализированного численного моделирования метеорологического режима Москвы за теплый сезон 2019 г. в рамках региональной климатической модели COSMO [63]. Данную модель применяли для динамической детализации глобальных метеорологических данных (анализа ICON службы погоды Германии) для Московского региона с шагом сетки 500 м и учетом влияния городской поверхности, что обеспечивали использованием параметризации TERRA_URB [38, 80] и заданием детализированных данных о параметрах городской среды и земельного покрова. Постановка численных экспериментов с моделью детально описана в статье [77].

Мониторинг почвенной эмиссии CO₂. Измерения эмиссии CO₂ проводили в центре каждой пробной площадки камерным методом с использованием портативных полевых газоанализаторов EGM-5 PP Systems (США) и модифицированным AZ Instruments 77535 (Тайвань). При измерении AZ использовали камеры, изготовленные на основе непрозрачных поливинилхлоридных трубок высотой 20 см с площадью основания 95 см². Открытые камеры углубляли в почву на глубину 3–4 см за 2 ч до измерений с предварительным удалением живой биомассы. Данный подход оптимален для городских условий, где повышенные риски вандализма, поломки в процессе работ по содержанию и уходу за зелеными территориями или другие посторонние воздействия ограничивают более продолжительную экспозицию. Перед проведением измерений камеры проветривали и

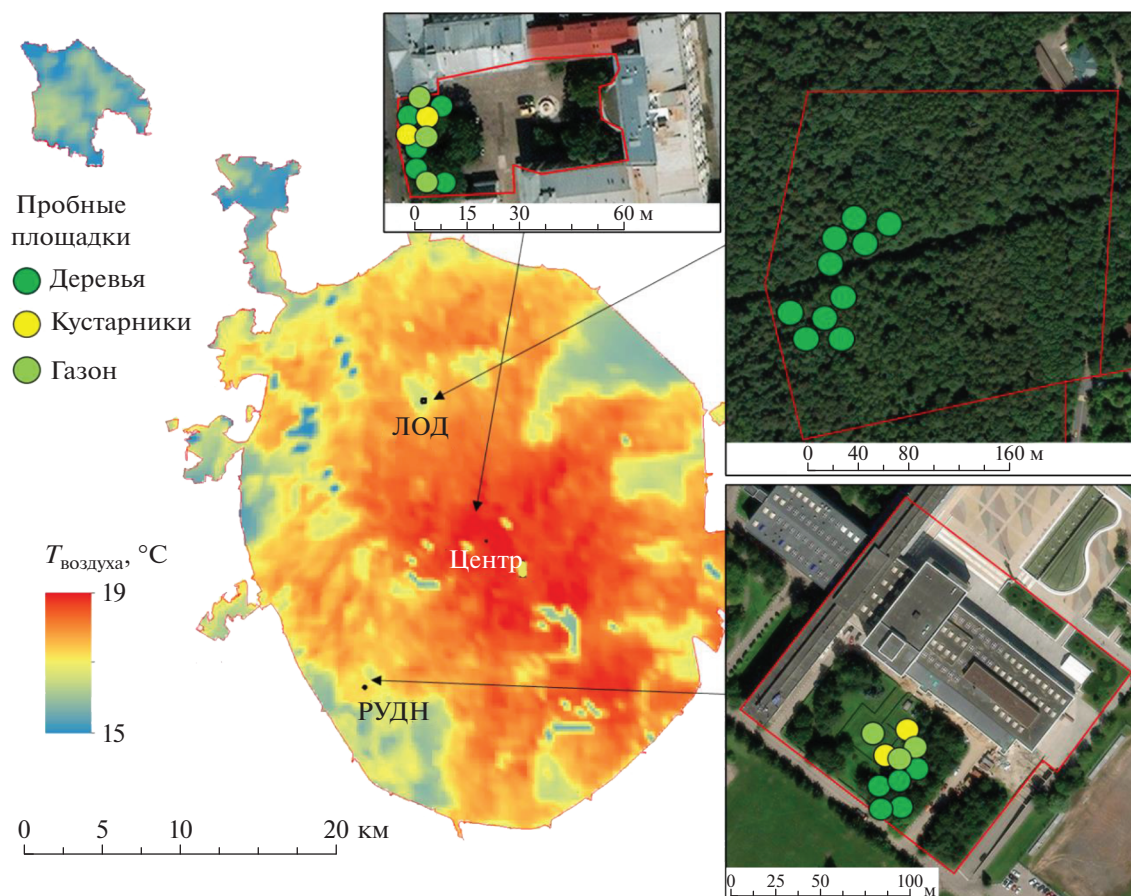


Рис. 1. Расположение участков исследования и пробных площадок (основа – карта средних температур июля 2019 г., полученная на основе модели COSMO-CLM [72, 79]).

плотно закрывали крышкой, соединенной целлюлоидными трубками с газоанализатором. Для перемешивания воздуха крышки камер снабжены вентиляторами. Почвенное дыхание оценивали по увеличению концентрации CO_2 в изолированных камерах, наблюдаемому в течение 3-минутного периода в соответствии с рекомендациями [10]. При измерении PPS использовали заводскую камеру для измерения почвенного дыхания (SRC-2) высотой 18 см с площадью основания 78 см^2 и со встроенным вентилятором для перемешивания воздуха. В соответствии с руководством пользователя [81] перед измерением камеру

врезали в почву на 2–3 см, предварительно удалив живую биомассу. Для измерения использовали автоматизированный режим с задержкой в 30 с, временем экспозиции 3 мин и линейной аппроксимацией. Перед началом мониторинговых исследований проводили сравнительный эксперимент по параллельному измерению эмиссии CO_2 на всех ключевых участках обоими приборами, который подтвердил сходимость результатов. Измерения вели в сухую погоду (без осадков) в интервале между 10 и 15 ч. Суточный ход, проведенный ранее для участков городского леса [5] и газонов [67, 75] в Москве, показал, что значения

Таблица 1. Метеостанции, использовавшиеся для характеристики метеорологических условий экспериментальных участков

Экспериментальный участок	Метеостанция	WMO ID метеостанции	Координаты метеостанции
Центр	Балчуг	27605	55.75 N, 37.63 E
РУДН	МГУ	27617	55.71 N, 37.52 E
ЛОД	ВДНХ	27612	55.83 N, 37.62 E

эмиссии CO_2 , полученные в этом интервале, близки к среднесуточным. Для расчета суммарной эмиссии CO_2 за календарный месяц суточные значения, полученные в течение месяца, усредняли и умножали на количество дней. Суммарную эмиссию CO_2 за сезон рассчитывали как сумму месячных эмиссий.

Параллельно с измерением эмиссии CO_2 на тех же пробных площадках на расстоянии 3–5 см от камер проводили измерения объемной влажности почв (0–7 см, W , %) портативным влагомером HH-2 ML-3 Theta Kit Delta Instruments (Великобритания) и температуры почв на глубинах 1 и 10 см (T , °C) портативным термометром Checktemp Hanna Instruments (США). Для непрерывных (с интервалом в 3 ч) наблюдений за температурой почвы на пробных площадках устанавливали автономные датчики DS-1922 на глубине 7 и 20 см для оценки внутренней неоднородности микроклиматических условий.

Почвенное обследование. На каждом участке на площадке под древесной растительностью закладывали разрез или проводили бурение до 100 см для описания строения профиля и основных морфологических свойств почв. На каждой площадке дополнительно отбирали образцы поверхностного слоя почвы (0–10 см) для анализа содержания общего углерода и азота методом сухого сжигания (CN-анализатор Elementar Vario, США). Образцы для определения плотности почвы отбирали кольцом (буриком Качинского).

Статистическая обработка и анализ данных. Для обработки и анализа данных использовали стандартные методы описательной статистики (среднее, стандартное отклонение, ошибка среднего, коэффициент вариации), нормальность выборок проверяли по тесту Левена. Для проверки значимости различий между участками/площадками применяли многофакторный дисперсионный анализ и тест Тьюки. Взаимосвязь между эмиссией CO_2 , температурой, влажностью и физико-химическими свойствами почв оценивали на основании регрессионной модели. Статистический анализ выполняли, используя программные продукты RStudio и Statistica 10. Для пространственного анализа и визуализации использовали ESRI ArcGIS 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мезо- и микроклиматические условия. Эффект городского острова тепла, как и внутригородская изменчивость температуры характерен для всего периода наблюдений. Для центра города превышение температуры воздуха над средним значением для загородных метеостанций составляет 1.9°C (t -критерий, $p < 0.001$), для периферийных участков оно примерно вдвое меньше 0.8 – 0.9°C

(t -критерий, $p < 0.001$). Внутригородская изменчивость температуры усиливается летом, особенно в условиях жаркой погоды. Для аномально жарких июня 2019 г., июня и июля 2021 г. температура в центре города превышала загородные значения на 3 и на 2°C – температуру для метеостанций вблизи периферийных участков. Положительная аномалия температуры в городе сопровождалась отрицательной аномалией относительной влажности воздуха, что обычно описывается как эффект острова сухости. Разность относительной влажности между городскими и загородными метеостанциями в среднем за весь период составила 11% для центра и 4% для периферийных участков. Максимальные среднемесячные значения городских аномалий температуры и относительной влажности составили $+3.1^\circ\text{C}$ и -19% соответственно (рис. 2).

Температура почвы значимо коррелировала с температурой воздуха ($r = 0.95$, $p < 0.01$ для поверхностного слоя и $r = 0.89$, $p < 0.01$ для глубины 7 см). Средние температуры поверхностного слоя почвы пробных площадок под деревьями на участке Центр были на 2.1 и 2.7°C выше, чем на аналогичных площадках участков РУДН и ЛОД соответственно, а для глубины 7 см разница составила 2.0 и 2.5°C . Наибольшая разница температур (5 – 7°C) поверхностных горизонтов почв между центром и периферией показана для площадок под газонами в летний период (рис. 3а). Средняя влажность почвы для этих площадок в центре была также на 5 – 10% ниже, чем на периферии, а летом 2020 г. разница достигала 30%. При значительной внутренней неоднородности влажности, определяемой комплексом локальных факторов (условия затенения, неоднородность гидрофизических свойств подстилающих горизонтов, микрорельеф, периодичность и интенсивность полива), значимые различия между центральными и периферийными участками можно считать проявлением городского острова сухости [12, 41, 53].

Анализ неоднородности микроклиматических (гидротермических) условий внутри участков показал, что и для Центра, и для РУДН почвы под газонами в среднем на 0.5 – 1.0°C теплее и на 5 – 10% влажнее, чем под деревьями и кустарниками. Максимальная разница температур также отмечается в летний период и составила 2.5°C (рис. 3б). Аналогичные закономерности показаны для смежных участков травянистой и древесной растительности в Балтиморе (США) [42], Окленде (Новая Зеландия) [79], как и в предыдущих исследованиях в Москве [25, 69, 75].

Неоднородность условий увлажнения при этом имела менее выраженную сезонную динамику и большой разброс. Например, $07.07.20$ влажность почвы на всех площадках в центре со-

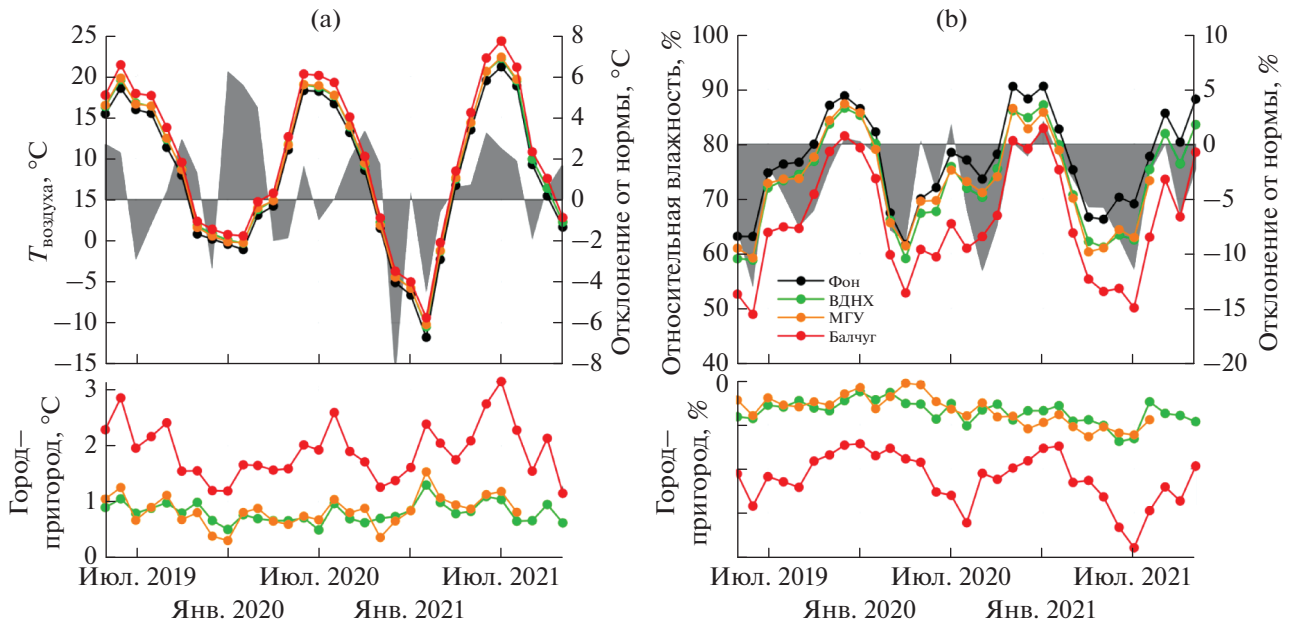


Рис. 2. Динамика среднемесячной температуры (а) и относительной влажности (б) приземного воздуха на рассматриваемых метеостанциях Москвы и в среднем по выборке фоновых (загородных) метеостанций вокруг города. Серым цветом показано отклонение от климатической нормы за 1981–2010 гг. для метеостанции ВДНХ. Нижние графики показывают отклонения температуры и влажности в городе от среднего фонового значения.

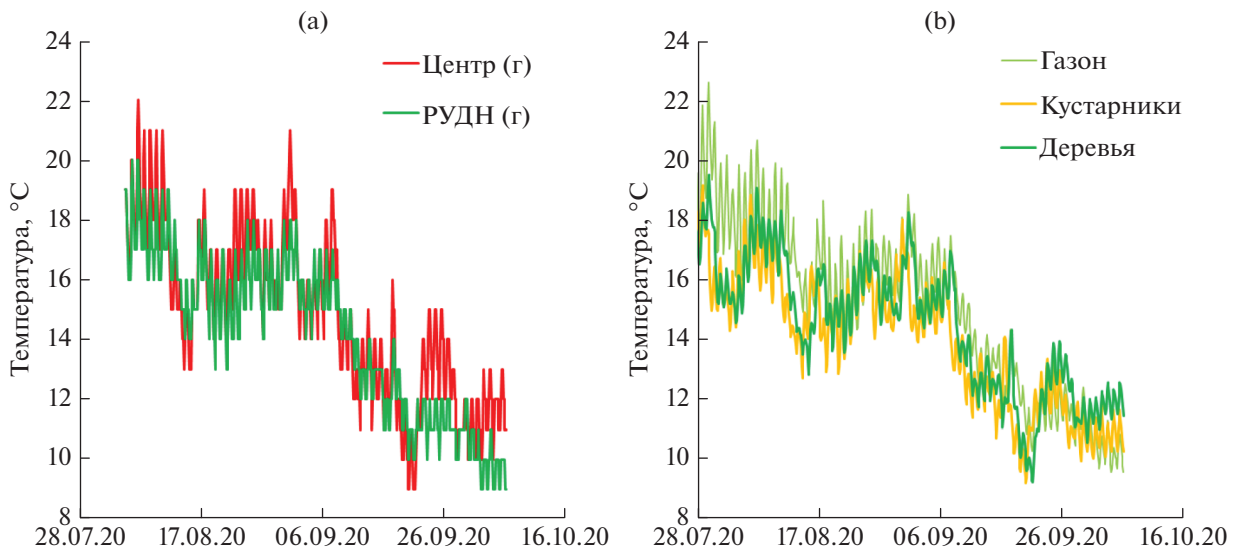


Рис. 3. Динамика температуры почвы (7 см) на площадках газонов участков Центр и РУДН (а) и на площадках с разными типами растительности участка РУДН (б).

ставила 41–42%, а уже через две недели разница между газоном и древесной растительностью составляла 20%. Учитывая, что за этот период значительных осадков не выпадало, такую закономерность можно объяснить периодичностью и неоднородностью полива.

Содержание общего углерода и азота в почвах. Почвы участков РУДН и Центр можно отнести к

рекреаземам [20, 21], так как в верхней части профиля выделяются несколько последовательно сформированных горизонтов RAt. При этом в центре подсыпку органического материала проводили относительно недавно, о чем можно судить по наличию слаборазложившихся остатков и ровной границе с подстилающим горизонтом. На участке РУДН подсыпки в последние 10 лет не

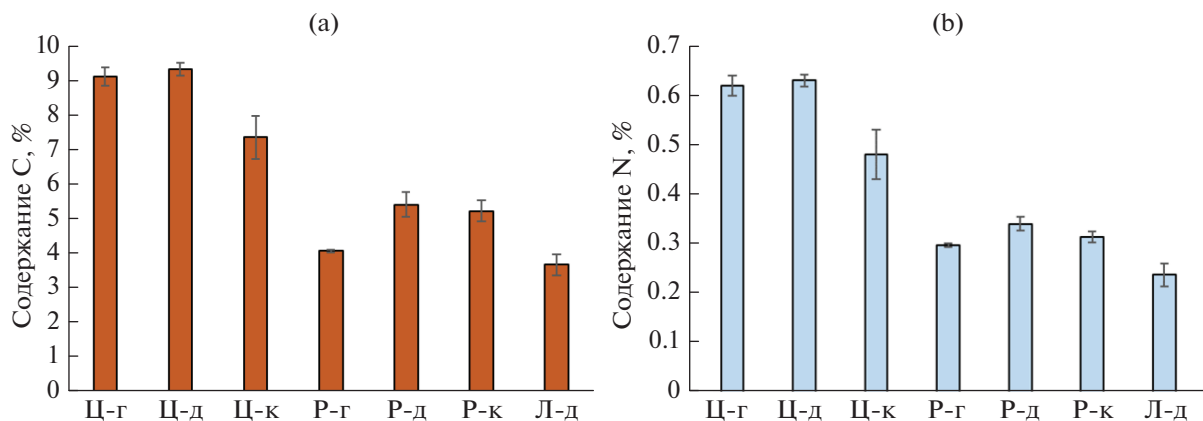


Рис. 4. Содержание С (а) и N (б) в поверхностных горизонтах (0–5 см) почв под древесной (д), кустарниковой (к) и газонной (г) растительностью на участках Центр (Ц), РУДН (Р) и ЛОД (Л).

проводили, и, по-видимому, горизонт RAT был сформирован при благоустройстве территории в начале 2000-х гг. На участке ЛОД описана дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, характерная для территории заказника [4]. Содержание общего С и N в поверхностном горизонте почв центрального участка было в среднем в 1.5–2 раза больше, чем для РУДН и ЛОД. Высокое содержание С в благоустроенных селитебных и рекреационных зонах в центре города характерно для Москвы и объясняется добавлением обогащенных органическим веществом почвогрунтов [2, 26, 64]. Содержание С и N в почвах ЛОД близко к фоновым значениям и соответствует результатам, полученным ранее для этого хорошо изученного объекта [5, 9, 18, 69]. Результаты, полученные для участка РУДН, занимают промежуточное положение и близки к значениям, характерным для рекреационных зон [14, 22, 37]. Неоднородность (стандартное отклонение) содержания углерода и азота внутри участков составило 1.0–1.5% по С и 0.1% по N, а внутри площадок с одинаковым типом растительности – 0.2–0.5% по С и 0.01–0.05% – по N (рис. 4). При этом максимальные средние значения и минимальная неоднородность показаны для площадок под древесной растительностью, что можно объяснить как дополнительным поступлением органического вещества с опадом, так и большей устойчивостью к разложению за счет более низких температур. Соотношение С : N на всех участках находилось в пределах от 13 до 17, плотности поверхностного горизонта – от 0.9 до 1.1 г/см³, статистически значимых различий по этим показателям не выявлено.

Факторы пространственно-временной неоднородности эмиссии CO₂. Усредненные за период измерений эмиссии CO₂ почвами центрального участка были выше на 20% по сравнению с РУДН и почти в 2 раза по сравнению с ЛОД. При срав-

нении данных только под древесной растительностью тенденция сохраняется, но разброс значений немного снижается – средние эмиссии для Центра, РУДН и ЛОД составили соответственно 4.7 ± 0.9 , 3.6 ± 0.3 и 2.8 ± 0.2 г С/(м² сут). Абсолютные значения могут быть несколько завышены в связи с укороченным периодом экспозиции, однако это не повлияло на выявленные закономерности различий эмиссии CO₂ внутри и между участками, так как для всех участков применяли единый подход к измерениям. Максимальные различия между центром и периферией отмечены в летний период, когда и эффект городского острова тепла наиболее заметен (рис. 5а). Внутри участков наименьшая средняя эмиссия CO₂ показана для почв под деревьями, для которых характерны наиболее низкие температуры поверхностных горизонтов и, как правило, меньшая по сравнению с другими площадками влажность. Разница между площадками под газонами и кустарниками была менее очевидна и менялась в течение сезона. Весной и осенью более интенсивная эмиссия зафиксирована для почв под газонами, а в летний период различия значений между газонными и кустарниковыми площадками статистически не значимы (ANOVA, тест Тьюки $p = 0.36$) (рис. 5б). По-видимому, разница между площадками объясняется в первую очередь системой ухода, определяющей регулярное антропогенное воздействие и регулирующей поступление органического вещества. Так, практика ухода за городскими газонами подразумевает внесение азотных удобрений в весенний период и систематический полив в летний период, что повышает микробиологическую активность и может приводить к дополнительной эмиссии CO₂ [46, 65]. В то же время скошенная с газонов трава, как правило, собирается и вывозится в отличие от листьев кустарников, что может стать источником дополнительного поступления органического вещества для последних [31, 60].

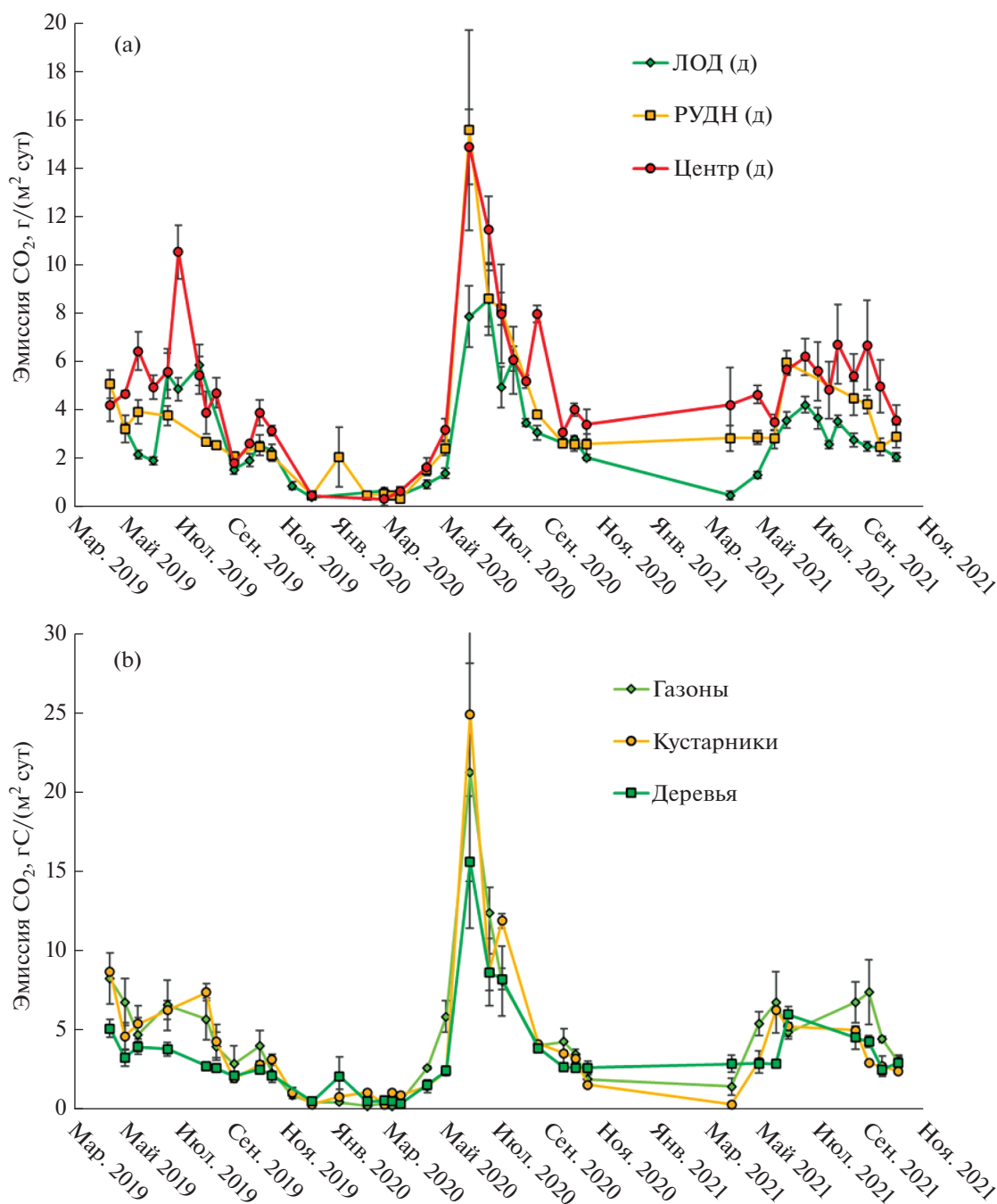


Рис. 5. Сезонная динамика эмиссии CO₂ почвами площадок под древесной растительностью на всех участках (a) и почвами площадок с разным типом растительности на участке РУДН (b).

В целом полученные значения для участков с древесной растительностью близки к тем, что показаны для аналогичных экосистем в Москве — ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова [39, 40] и Петровско-Разумовского заказника [5]. Эмиссия CO₂ почвами под газонами и кустарниками соответствует значениям, полученным для газонов на модельных почвенных конструкциях [67]. Интересно, что и эмиссии CO₂, и темпера-

турный режим почв на площадках древесно-кустарниковой растительности в центре Москвы оказались близки к объектам в г. Курск, расположенном на 500 км южнее [19, 24], что также иллюстрирует эффект городского острова тепла. Средние за сезон эмиссии CO₂ городскими почвами, полученные в рамках похожего исследования в Бостоне (США), для газонов были аналогичны результатам газонных площадок участков Центр

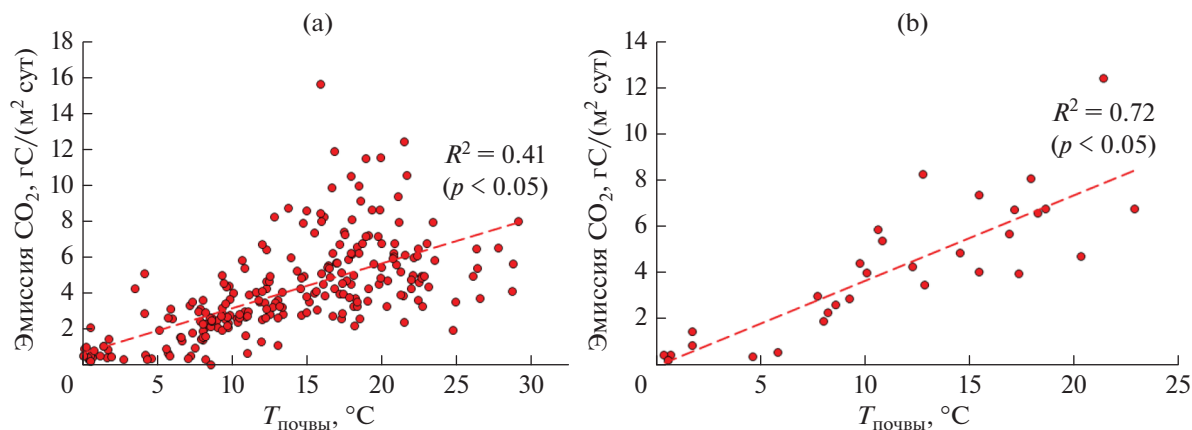


Рис. 6. Зависимость эмиссии CO_2 от температуры поверхности почвы для общей выборки (а) и для газонов участка РУДН (б).

и РУДН (5.0 $\text{г}/(\text{м}^2 \text{сут})$ по сравнению с 5.0 и 4.8 $\text{гС}/(\text{м}^2 \text{сут})$ соответственно), а для почв городского леса несколько меньше, чем для участка ЛОД (2.7 $\text{г}/(\text{м}^2 \text{сут})$ по сравнению с 3.1 $\text{г}/(\text{м}^2 \text{сут})$). При этом для селитебных зон Бостона биогенная почвенная эмиссия CO_2 составила более 70% от антропогенной эмиссии CO_2 при сгорании ископаемого топлива [36]. В городах с более жарким климатом показаны наибольшие значения. Например, усредненная за вегетационный сезон эмиссия CO_2 почвами городских газонов в Мельбурне (Австралия) варьировала от 7 до 12 $\text{г}/(\text{м}^2 \text{сут})$. Полив и внесение минеральных удобрений были основным фактором выявленной неоднородности с увеличением эмиссии на 40% на орошаемых и удобряемых площадках в сравнении с контролем [47].

Температура была основным значимым фактором, определившим 41% от общей дисперсии эмиссии CO_2 для всей выборки. Выявленная закономерность уменьшения эмиссии CO_2 от центра к периферии при высокой значимой зависимости от температуры поверхностных горизонтов подтверждает исходную гипотезу о влиянии городского острова тепла на пространственную неоднородность эмиссии CO_2 городскими почвами в Москве. При анализе зависимости между эмиссией CO_2 и температурой поверхностного горизонта отдельных участков и типов растительности внутри участков коэффициент детерминации R^2 варьировал от 0.26 до 0.72 (при этом для всех вариантов зависимость была статистически значима) (рис. 6). В среднем температурный коэффициент Q_{10} составил 2.5, но для газонных участков он увеличивался до 4.5. Значимой зависимости от влажности в течение всего сезона не показано, что, по-видимому, объясняется поливом территории в летний период, когда недостаток воды в

почве мог бы оказать лимитирующее воздействие на микробиологическую активность. Наряду с температурой почвенная эмиссия CO_2 зависела от содержания С и N в поверхностном горизонте почвы – коэффициенты корреляции этих показателей с усредненными для пробных площадок значениями эмиссии CO_2 составили соответственно 0.60 и 0.62 и были статистически значимыми ($p < 0.05$).

Для поверхностного горизонта почв участка центральной части Москвы по сравнению с периферийными участками характерны более высокие температуры (на 3–7 $^\circ\text{C}$ в летний период) и почти двукратное превышение содержания органического вещества, в основном внесенное с подсыпками органических и органо-минеральных субстратов в результате работ по озеленению и благоустройству. Сочетание этих факторов создает условия для увеличения почвенной эмиссии CO_2 . Так, суммарная за сезон дополнительная эмиссия CO_2 почвами под газонами и кустарниками в центре по сравнению с аналогичными площадками РУДН, рассчитанная по среднемесячным значениям на период апрель–октябрь 2020 и 2021 гг., составляет до 200 $\text{гС}/\text{м}^2$. Общая площадь территории газонной и древесно-кустарниковой растительности в Московском мегаполисе, подверженной воздействию городского острова тепла (т.е. находящейся в пределах МКАД и не включающей крупные массивы городских лесов на окраинах), по данным дистанционного зондирования, составляет около 300 км^2 [77]. Таким образом, дополнительная биогенная эмиссия для этих территорий может составлять до 60 тыс. т С ежегодно. Близкие оценки получены ранее на основании моделирования влияния городского острова тепла на базальное дыхание почвы в Московском мегаполисе [69]. Безусловно, неопределенность такой оценки высока, а ре-

альные значения будут зависеть не только от площади и интенсивности городского острова тепла, но и от физико-химических свойств почвы, в том числе не рассмотренных в рамках данного исследования (например, содержания тяжелых металлов или легкорастворимых солей). В то же время очевидно, что сочетание мезоклиматических аномалий с существующей практикой использования торфосодержащих почвогрунтов для задач озеленения и благоустройства сопряжено с серьезными рисками дополнительных эмиссий парниковых газов и ставит под сомнение эффективность городских газонов как решения, направленного на достижение целей углеродной нейтральности и климатической адаптации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Городские экосистемы чувствительны к глобальным климатическим изменениям, так как последствия общего потепления усиливаются и усложняются мезоклиматическими аномалиями, среди которых городской остров тепла оказывает наиболее заметное воздействие на состояние городской среды и функционирование городских почв. Мезоклиматическое моделирование территории Московского мегаполиса показало явный градиент температуры воздуха от центра к периферии. Мониторинг эмиссии CO₂, температуры и влажности почв в течение сезонов 2019–2021 гг. на объектах, выбранных в соответствии с выявленным градиентом, показал значимо большие эмиссии CO₂ в центре по сравнению с периферией и зелеными зонами. Внутри участков наибольшая эмиссия была характерна для почв под газонами и кустарниками, где отмечались локальные максимумы температуры и влажности почвы. Температура поверхностного горизонта и содержание углерода и азота были основными факторами, определившими пространственно-временную неоднородность эмиссии CO₂ почвами Москвы. Сочетание высокого содержания органического углерода и максимального проявления городского острова тепла в центральной части приводит к ежегодной эмиссии до 200 г С/м², в первую очередь, за счет газонов в центре города. На основании полученных данных, развитие крупных массивов древесно-кустарниковой растительности представляется более эффективным решением для снижения климатических рисков, по сравнению с массовым созданием газонов на основе торфо-песчаных смесей, что необходимо учитывать для достижения целей углеродной нейтральности и устойчивого развития городской среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Мониторинг эмиссии CO₂ и мезоклиматических параметров выполнены при поддержке гранта РФФИ

№ 19-29-05187. Мезоклиматическое моделирование и мониторинг проводили в рамках проекта РФФИ № 19-77-300-12. Анализ данных и подготовка публикации выполнены в рамках проекта системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600385>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н.* Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070024>
2. *Брянская И.П., Васенев В.И., Брыкова Р.А., Маркелова В.М., Ушакова Н.В., Госсе Д.Д., Гавриленко Е.В., Благодатская Е.В.* Анализ ввозимых почвогрунтов для прогнозирования запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1537–1546. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20120047>
3. *Васенев В.И., Прокофьева Т.В., Макаров О.А.* Разработка подхода к оценке запасов почвенного органического углерода мегаполиса и малого населенного пункта // Почвоведение. 2013. № 6. С. 725–736. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13060117>
4. *Васенев И.И., Мелесе С.М., Малахов А.О.* Экологическая оценка сезонной динамики почвенных потоков CO₂ и содержания гумуса дерново-подзолистых почв на склоновой катене лесопарка при разных уровнях рекреационной нагрузки // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журн. 2022. № 4. <https://doi.org/10.51419/202124419>
5. *Визирская М.М.* Функционально-экологическая оценка лесных подзолистых почв в условиях Московского мегаполиса: на примере ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Дис. ... к.б.н. М., 2014. 156 с.
6. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Биогеохимия углерода, железа и тяжелых металлов в переувлажненных почвах (аналитический обзор) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 3. С. 3–12.
7. *Горбов С.Н., Безуглова О.С., Скрипников П.Н., Тищенко С.А.* Растворимое органическое вещество в почвах ростовской агломерации // Почвоведение. 2022. № 7. С. 894–908. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2207005X>
8. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда

- Российской Федерации // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
9. *Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудяров В.Н., Валентини Р.* Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090056>
 10. *Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Краев Г.Н.* Методическое руководство по анализу эмиссии почв поселений в тундре. М.: Изд-во ЦЭПЛ РАН, 2015. 64 с.
 11. *Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Золотухин А.Н., Лукин В.Н., Куст Г.С.* Современные исследования и мониторинг углеродного баланса на Курской биосферной станции Института географии РАН в рамках концепции нейтрального баланса деградации земель Вопросы географии // Вопросы географии. 2021. № 152. С. 253–280.
 12. *Кислов А.В.* Климат Москвы в условиях глобального потепления. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 288 с.
 13. *Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И.* “Остров тепла” Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2017. С. 12–19.
 14. *Кузнецова В.А., Рыжова И.М., Стома Г.В.* Изменение лесных экосистем мегаполиса под влиянием рекреационного воздействия почвоведение // Почвоведение. 2019. № 5. С. 633–642. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1905006X>
 15. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Инн С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В.* Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. С. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
 16. *Ландсберг Г.Е.* Климат города / Пер. с англ. под ред. Дубова А.С. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
 17. *Можарова Н.В., Кулачкова С.А., Лебедь-Шарлевич Я.И.* Эмиссия и поглощение парниковых газов в почвах Москвы // Почвоведение. 2018. № 3. С. 372–384. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030115>
 18. *Наумов В.Д., Поветкина Н.Л., Лебедев А.В., Гемонов А.В.* Оценка гумусового состояния дерново-подзолистых почв лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия ТСХА. 2019. Вып. 4. С. 5–18.
 19. *Неведров Н.П., Саржанов Д.А., Проценкова Е.П., Васенев И.И.* Сезонная динамика эмиссии CO₂ из почв города Курска // Почвоведение. 2021. № 1. С. 70–79. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010111>
 20. *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>
 21. *Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А.* Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
 22. *Прокофьева Т.В., Розанова М.С., Попутников В.О.* Некоторые особенности органического вещества почв на территориях парков и прилегающих жилых кварталов Москвы // Почвоведение. 2013. № 3. С. 302–314. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13030076>
 23. *Прохоров И.С., Карев С.Ю.* Особенности производства почвогрунтов для озеленения и благоустройства города Москвы // Агрехимический вестник. 2012. № 3. С. 21–25.
 24. *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>
 25. *Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В., Степанов А.Л., Мягкова А.Д., Курбатова А.С.* Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5. С. 603–615.
 26. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б.* Создание почвоподобных конструкций // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1112–1123. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090117>
 27. *Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А.* Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства на примере г. Москвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 360 с.
 28. Указ Президента РФ № 76 от 08.02.21 “О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений”.
 29. Указ Президента РФ № 296-ФЗ от 02.07.21 “Об ограничении выбросов парниковых газов”.
 30. *Aram F., Solgi E., Garcia E.H., Mosavi A., Várkonyi-Kóczy A.R.* The cooling effect of large-scale urban parks on surrounding area thermal comfort // Energies (Basel). 2019. V. 12. P. 3904. <https://doi.org/10.3390/en12203904>
 31. *Bandaranayake W., Qian Y., Parton W.J., Ojima D.S., Follett R.* Estimation of soil organic carbon changes in turfgrass systems using the CENTURY model // Agron. J. 2003. T. 95. № 3. P. 558–563. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0558>
 32. *Benz S.A., Bayer P., Goettsche F.M., Olesen F.S., Blum P.* Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures // Environ. Sci. Technol. V. 50. P. 70–78. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03672>
 33. *Chang C.R., Li M.H., Chang S.D.* A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks //

- Landscape Urban Plan. 2007. V. 80. P. 386–395.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005>
34. *Churkina G.* The role of urbanization in the global carbon cycle // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2016. V. 3. P. 144.
<https://doi.org/10.3389/FEVO.2015.00144/BIBTEX>
 35. *Chen Y., Wong N.H.* 2006. Thermal benefits of city parks // *Energy Build.* 2006. V. 38. P. 105–120.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003>
 36. *Decina S.M., Hutyra L.R., Gately C.K., Getson J.M., Reinmann A.B., Short Gianotti A.G., Templer P.H.* Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area // *Environ. Poll.* 2016. V. 212. P. 433–439.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.012>
 37. *Demina S., Vasenev V., Ivashchenko K., Ananyeva N., Plyushchikov V., Hajiaghayeva R., Dovletyarova E.* Microbial properties of urban soils with different land-use history in New Moscow // *Soil Sci.* 2018. V. 183. P. 132–140.
<https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000240>
 38. *Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I.* Evaluating the Urban Canopy Scheme TERRA_URB in the COSMO Model for Selected European Cities // *Atmosphere (Basel)* 2021. V. 12. P. 237.
<https://doi.org/10.3390/atmos12020237>
 39. *Goncharova O., Matyshak G., Udovenko M., Semenyuk O., Epstein H., Bobrik A.* Temporal dynamics, drivers, and components of soil respiration in urban forest ecosystems // *Catena*. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104299>
 40. *Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Udovenko M.M., Bobrik A.A., Semenyuk O.V.* Seasonal and annual variations in soil respiration of the artificial landscapes (Moscow Botanical Garden) // *Springer Geography*. 2019.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_15
 41. *Hao L., Huang X., Qin M., Liu Y., Li W., Sun G.* Ecohydrological Processes Explain Urban Dry Island Effects in a Wet Region, Southern China // *Water Resources Research*. 2018. V. 54. P. 6757–6771.
<https://doi.org/10.1029/2018WR023002>
 42. *Hill A.C., Barba J., Hom J., Vargas R.* Patterns and drivers of multi-annual CO₂ emissions within a temperate suburban neighborhood // *Biogeochemistry*. 2021. V. 152. P. 35–50.
 43. *Ivashchenko K., Ananyeva N., Vasenev V., Sushko S., Seleznyova A., Kudiyarov V.* Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning // *Soil Environ.* 2019. V. 38. P. 31–41.
<https://doi.org/10.25252/SE/19/61524>
 44. *Ivashchenko K., Lepore E., Vasenev V., Ananyeva N., Demina S., Khabibullina F., Vaseneva I., Selezneva A., Dolgikh A., Sushko S., Marinari S., Dovletyarova E.* Assessing soil-like materials for ecosystem services provided by constructed technosols // *Land*. 2021. V. 10.
<https://doi.org/10.3390/land10111185>
 45. *Jin M., Sun R., Yang X., Yan M., Chen L.* Remote sensing-based morphological analysis of core city growth across the globe // *Cities*. 2022. V. 131.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103982>
 46. *Kaye J.P., Burke I.C., Mosier A.R., Guerschman J.P.* Methane and nitrous oxide fluxes from urban soils to the atmosphere // *Ecol. Appl.* 2004. V. 14. P. 975–981.
<https://doi.org/10.1890/03-5115>
 47. *Liu Z., He C., Zhou Y., Wu J.* How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion // *Landscape Ecology*. 2014. V. 29. P. 763–771.
<https://doi.org/10.1007/s10980-014-0034-y>
 48. *Livesley S.J., Dougherty B.J., Smith A.J., Navaud D., Wylie L.J., Arndt S.K.* Soil-atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in urban garden systems: Impact of irrigation, fertiliser and mulch // *Urban Ecosystems*. 2010. V. 13. P. 273–293.
<https://doi.org/10.1007/s11252-009-0119-6>
 49. *Lokoshchenko M.A.* Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2017. V. 56. P. 2729–2745.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0383.1>
 50. *Lokoshchenko M.A., Korneva I.A.* Underground urban heat island below Moscow city // *Urban Climate*. 2015. V. 13. P. 002.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.002>
 51. *Lorenz K., Lal R.* Biogeochemical C and N cycles in urban soils // *Environment International*. 2009. V. 35. P. 006.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.006>
 52. *Lorenz K., Lal R.* Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems // *Carbon Management*. 2015. V. 6. P. 35–50.
<https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1071182>
 53. *Meili N., Paschalis A., Manoli G., Fatichi S.* Diurnal and seasonal patterns of global urban dry islands // *Environmental Research Letters*. 2022. V. 17. P. 68f8.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac68f8>
 54. *Moran D., Kanemoto K., Jiborn M., Wood R., Tobben J., Seto K.C.* Carbon footprints of 13 000 cities // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. P. 064041.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac72a>
 55. *Nowak D.J., Crane D.E.* Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA // *Environ. Pollut.* 2002. V. 116 P. 381–389.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
 56. *Oke T.R.* The energetic basis of the urban heat island // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 1982. V. 108. P. 5502.
<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
 57. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt, J.A.* *Urban Climates* // Cambridge: Cambridge University Press. 2017. P. 519.
<https://doi.org/10.1017/9781139016476>
 58. *Pataki D.E., Alig R.J., Fung A.S., Golubiewski N.E., Kennedy C.A., McPherson E.G., Nowak D.J., Pouyat R.V., Romero Lankao P.* Urban ecosystems and the North American carbon cycle // *Glob. Chang. Biol.* 2006. V. 12. P. 2092–2102.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01242.x>
 59. *Pörtner H.O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B.* IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change // Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2022. P. 3056.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>
60. Qian Y.L., Bandaranayake W., Parton W.J., Mecham B., Harivandi M.A., Mosier A.R. Long-Term Effects of Clipping and Nitrogen Management in Turfgrass on Soil Organic Carbon and Nitrogen Dynamics: The CENTURY Model Simulation // *J. Env. Qual.* 2003. V. 32. P. 1694–1700.
<https://doi.org/10.2134/jeq2003.1694>
 61. Richter S., Haase D., Thestorf K., Makki M. Carbon Pools of Berlin, Germany: Organic Carbon in Soils and Aboveground in Trees // *Urban For. Urban Green.* 2020. V. 54.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126777>
 62. Rizwan A.M., Dennis L.Y.C., Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island // *Journal of Environmental Sciences.* 2008. V. 20. P. 120–128.
[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
 63. Rockel B., Will A., Hense A. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) // *Meteorologische Zeitschrift.* 2008. V. 17. P. 347–348.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>
 64. Romzaykina O.N., Vasenev V.I., Paltseva A., Kuzyakov Y.V., Neaman A., Dovletyarova E.A. Assessing and mapping urban soils as geochemical barriers for contamination by heavy metal(loid)s in Moscow megapolis // *J. Environ. Quality.* 2021. V. 50. P. 22–37.
<https://doi.org/10.1002/jeq2.20142>
 65. Selhorst A., Lal R. Net carbon sequestration potential and emissions in home lawn turfgrasses of the United States // *Environ. Manage.* 2013. V. 51. P. 198–208.
<https://doi.org/10.1007/s00267-012-9967-6>
 66. Sharma R.C., Tateishi R., Hara K., Gharechelou S., Iizuka K. Global mapping of urban built-up areas of year 2014 by combining MODIS multispectral data with VIIRS nighttime light data. // *Int. J. Digit. Earth.* 2016. V. 9. P. 1004–1020.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1168879>
 67. Shchepeleva A.S., Vasenev V.I., Mazirov I.M., Vasenev I.I., Prokhorov I.S., Gosse D.D. Changes of soil organic carbon stocks and CO₂ emissions at the early stages of urban turf grasses' development // *Urban Ecosyst.* 2017. V. 20. P. 309–321.
<https://doi.org/10.1007/s11252-016-0594-5>
 68. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Vasenev V.I., Smagina M.V. Biodegradation of some organic materials in soils and soil constructions: Experiments, modeling and prevention // *Materials (Basel).* 2018. V. 11. P. 1889.
<https://doi.org/10.3390/ma11101889>
 69. Sushko S., Ananyeva N., Ivashchenko K., Vasenev V., Kudryarov V. Soil CO₂ emission, microbial biomass, and microbial respiration of woody and grassy areas in Moscow (Russia) // *J. Soils Sediments.* 2019. V. 19. P. 3217–3225.
<https://doi.org/10.1007/s11368-018-2151-8>
 70. Upmanis H., Eliasson I., Lindqvist S. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden) // *Int. J. Climatology.* 1998. V. 18. P. 681–700.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
 71. Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment // *Atmosphere (Basel).* 2020. V. 11. P. 1349.
<https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
 72. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // *Atmosphere (Basel).* 2018. V. 9. P. 0050.
<https://doi.org/10.3390/atmos9020050>
 73. Varentsova S.A., Varentsov M.I. A new approach to study the long-term urban heat island evolution using time-dependent spectroscopy // *Urban Clim.* 2021. V. 40. P. 1026.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101026>
 74. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // *Land Degradation and Development.* 2018. V. 29. P. 1607–1622.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2944>
 75. Vasenev V.I., Castaldi S., Vizirskaya M.M., Ananyeva N.D., Shchepeleva A.S., Mazirov I.M., Ivashchenko K.V., Valentini R., Vasenev I.I. Urban soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components compared to adjacent forest and cropland within the moscow megapolis // *Springer Geography.* 2018. P. 18–35.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-70557-6_4
 76. Vasenev V.I., Smagin A.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Gavrilenko E.G., Prokofjeva T.V., Paltseva A., Stoorvogel J.J., Gosse D.D., Valentini R. Urban soil's functions: Monitoring, assessment, and management // *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices.* 2017. P. 359–409.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5>
 77. Vasenev V., Varentsov M., Konstantinov P., Romzaykina O., Kanareykina I., Dvornikov Y. Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis. *Science of the Total Environment* // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 786. P. 147457.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147457>
 78. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sens. Environ.* 2003. V. 86. P. 370–384.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
 79. Weissert L.F., Salmond J.A., Schwendenmann L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types // *Geoderma.* 2016. V. 271. P. 80–90.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.014>
 80. Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3027–3054.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3027-2016>
 81. EGM-5 Portable CO₂ gas analyzer. Operation manual. Version 1.06. PP System, 2018 133 p.

The Influence of Meso- and Microclimatic Conditions on the CO₂ Emission of Soils of the Urban Green Infrastructure of the Moscow Metropolis

V. I. Vasenev^{1, *}, M. I. Varentsov², D. A. Sarrzhanov³, K. I. Makhinya³,
D. D. Gosse⁴, D. G. Petrov⁵, and A. V. Dolgikh⁵

¹*Soil and Landscape Geography Group, Wageningen University, Wageningen, 6707 Netherlands*

²*BSCIENTIFIC Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*Agrarno-Tekhnologicheskiy Institute, RUDN, Moscow, 117198 Russia*

⁴*Facultet of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

⁵*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: slava.vasenev@wur.nl

Against the backdrop of global warming, urban ecosystems are becoming increasingly vulnerable to climate stresses. Strategies for climate adaptation developed for almost every major city in the world pay considerable attention to urban green infrastructure as a nature-oriented solution for carbon sequestration. However, the influence of urban climate conditions on the spatial and temporal heterogeneity of CO₂ emissions from urban soils remains poorly understood, which can lead to inaccurate estimates and probably inflated expectations of urban green infrastructure in the context of carbon neutrality. Studies of CO₂ emission dynamics with parallel observation of soil temperature and moisture were conducted at three green infrastructure sites in the Moscow metropolis, which differ in contrasting mesoclimatic conditions, in 2019–2022. Plots with different vegetation types were compared for each site, which allowed us to assess the internal heterogeneity of soil and microclimatic conditions. Soil temperature and moisture were determined to 70% of the total variance of CO₂ emissions. At the same time, mean annual soil temperature in the center was almost 3–6°C higher and moisture was 10–15% lower compared to the periphery. Soils under lawns and bushes were, on average, 1–2°C warmer and 10–15% wetter than under trees. Soil CO₂ emission under lawns was, on average, 20–30% higher than that under woody plantings in the same plot. At the same time, the differences between the plots with the same vegetation in the center and on the periphery reached 50%, which confirms the high vulnerability of urban soil carbon stocks to mesoclimatic anomalies and the high risks of increased CO₂ emission by urban soils against the background of climate change.

Keywords: urbanization, urban soils, heat island, carbon stocks, soil respiration, sustainable urban development