

ДЫХАНИЕ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

УДК 631.433.3

КРАТКОСРОЧНАЯ ДИНАМИКА ЭМИССИИ CO₂ И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ГОРОДСКИХ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ

© 2023 г. С. Н. Горбов^а (ORCID: 0000-0003-0292-068X), В. И. Васенев^{б, с}, Е. Н. Минаева^а,
С. С. Тагивердиев^{а, *}, П. Н. Скрипников^а, О. С. Безуглова^а

^аЮжный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского,
пр-т Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

^бРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

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

*e-mail: 2s-t@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 17.05.2023 г.

Почвенные конструкции — важный компонент городской зеленой инфраструктуры, роль которого в балансе углерода городских экосистем остается недостаточно изученной. Динамика запасов углерода и эмиссии CO₂ почвенных конструкций зависит как от биоклиматических условий, так и от параметров конструирования — используемых субстратов, состава и мощности слоев. Исследования динамики запасов углерода и эмиссии CO₂ проводили на конструкторах различного строения, созданных на базе “Экспериментального стационара по изучению почвенных конструкций” в Ботаническом саду Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону). Стационар включает 15 автономных площадок, на которых представлены 5 различных вариантов почвенных конструкций, созданных на основе субстратов, традиционно используемых для задач озеленения и благоустройства в городах степной зоны. В качестве фоновой почвы изучали чернозем миграционно-сегрегационный (Haplic Chernozem), расположенный на плакорном участке в непосредственной близости от экспериментального стационара. Мониторинговые исследования в течение года (с сентября 2020 г. по ноябрь 2021 г.) позволили сопоставить сезонную динамику содержания органического и неорганического углерода и эмиссии CO₂ для различных вариантов почвенных конструкций по сравнению с фоном. Во всех конструкциях, созданных на основе гумусово-аккумулятивных горизонтов черноземов, отмечена высокая и заметная зависимость эмиссии CO₂ от температуры воздуха (при $p < 0.05$ для конструкции 2 — $r = 0.76$, конструкции 3 — $r = 0.82$, конструкции 4 — $r = 0.76$, конструкции 5 — $r = 0.49$) и почвы (при $p < 0.05$ для конструкции 2 — $r = 0.58$, конструкции 3 — $r = 0.74$, конструкции 4 — $r = 0.75$, конструкции 5 — $r = 0.68$). Определены запасы биомассы газонных трав, произрастающих на конструкциях, отмечена положительная корреляция эмиссии CO₂ и прироста наземной биомассы (для конструкции 2 умеренная корреляция ($r = 0.48, p < 0.05$), для конструкций 3 и 4 — заметная ($r = 0.5, p < 0.05$; $r = 0.68, p < 0.05$), а для конструкции 5 — высокая ($r = 0.75, p < 0.05$)). Изучена динамика запаса различных форм углерода в первый год функционирования конструкций. На основании сопоставления потоков и запасов углерода показано, что в условиях умеренно-континентального климата г. Ростова-на-Дону газонные экосистемы на ранних стадиях существования конструкторов не могут считаться участками нетто-стока углерода.

Ключевые слова: городские почвы, конструкторы, черноземы (Haplic Chernozems), эмиссия углекислого газа

DOI: 10.31857/S0032180X23600282, **EDN:** DVVAWS

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация приводит к значительным и, как правило, необратимым изменениям окружающей среды: климата, растительности, почв [24]. Антропогенные изменения почв в результате урбанизации включают как физическую трансформацию, так и изменение химических свойств (по-

следствия внесения удобрений, загрязнения, засоления) [33]. Как следствие, почвенный покров городов имеет высокую пространственно-временную изменчивость морфологических признаков, физико-химических свойств и экологических функций [6, 7, 15, 41]. На фоне климатических изменений, работы, посвященные эмиссии

и секвестрации углерода почвами, приобретают особую актуальность [26, 32, 44]. Почвы формируют основной запас органического углерода наземных экосистем, а депонирование углерода (С) — одна из основных экологических функций почв [20, 31, 51]. В то же время почвенное дыхание — наиболее мощный биогенный источник эмиссии CO_2 в атмосферу в наземных экосистемах [22, 38]. Соотношение между депонированием и эмиссией С зависит от множества факторов, включая биоклиматические условия, растительный покров и характер землепользования. Рациональное и климатически-ответственное управление почвенными ресурсами ориентировано на депонирование С в почве и биомассе живых растений, компенсируя негативное воздействие антропогенных эмиссий CO_2 , что особенно актуально для городских экосистем [30].

В городах травянистые растения занимают значительную часть незапечатанных территорий [39], а их вклад в региональный баланс С имеет большое значение. В связи с этим анализ почвенных запасов С и эмиссии CO_2 из почв в газонных экосистемах необходим для оценки роли городской зеленой инфраструктуры в климатических проектах и природно-ориентированных технологиях [36, 43]. Имеющаяся научная информация показывает, что создание городских газонов может способствовать накоплению С в почвах [28, 29, 43, 48, 50], однако существуют и обратные примеры [27, 45]. Почвам городских газонов свойственны сезонные и межсезонные колебания эмиссии CO_2 , определяемые изменениями гидро-термических условий [23, 45, 49]. Особенно характерны эти колебания для искусственных почвенных конструкторов, на ранних стадиях их формирования [45]. Как правило, “возрастной” фактор в оценках баланса С газонных экосистем учитывается либо с помощью динамических моделей (например, CENTURY), либо путем применения подхода хронологических рядов [19, 37, 43, 45]. Оба подхода актуальны для анализа при изучении многолетней динамики эмиссии CO_2 из почв, однако не позволяют адекватно оценить изменения запасов и динамики С в почвенных конструкциях на самых ранних этапах формирования системы конструкторов—газонные травы.

Настоящая работа направлена на восполнение пробела в информации об изменениях в запасах С и выбросах CO_2 на ранних стадиях существования экосистем городских газонов, сформированных на конструкторах различного состава в условиях степного региона на примере Ростова-на-Дону.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ростов-на-Дону ($47^{\circ}14' \text{ N}$, $39^{\circ}42' \text{ E}$) с населением более 1.1 млн человек входит в число круп-

нейших городов юга России и представляет собой наиболее урбанизированную часть области. Город расположен на берегах р. Дон, его территория охватывает водоразделы головной водной артерии и ее притоков. Основными почвообразующими породами территории являются лёссовидные суглинки. Согласно климатическому районированию, Ростов-на-Дону расположен в пределах континентальной европейской области умеренного климатического пояса. Территория характеризуется континентальным, засушливым климатом, индекс континентальности составляет 80% [14]. Средняя температура января -4.7°C , июля $+23.1^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков — 597.3 мм/год [1].

В настоящее время Ростов-на-Дону — многофункциональный город с обширными жилыми, промышленными и общественными зонами. Почвами водораздельной части города, согласно классификации и диагностики почв России [12], являются черноземы миграционно-сегрегационные, *haplic Chernozems (Pachic)* [28]. Почвенный покров городских территорий в целом несет отпечаток структуры и характера землепользования, отражая многообразие типов различного функционального назначения. Под влиянием этого фактора на территории Ростовской агломерации сформировались разнообразные почвенные комбинации, состоящие из нативных почв, урбостратоземов, урбистратифицированных черноземов и почв поймы. Доля экранированных почв колеблется от 48 до 90% в центральной части, и составляет менее 13% — в пригородах, тогда как газоны и древесные насаждения занимают около 50% общей городской территории [7, 24]. Зеленые зоны обширны и включают в себя искусственный защитный массив, расположенный на востоке города, а также городские и районные парки, ботанические и общественные сады, спортивные площадки и стадионы. Открытые участки чаще всего представлены реплантоземами и конструкторами, с поверхностным компостно-гумусовым горизонтом (RAT) [15], при формировании которого используются в большинстве случаев гумусово-аккумулятивные горизонты пахотных черноземов, характеризующихся изначальным содержанием гумуса 3.5–3.7% [3].

Исследования проводили в течение года на конструкторах различного состава, созданных на базе “Экспериментального стационара по изучению почвенных конструкций” в Ботаническом саду ЮФУ ($47^{\circ}13'52.08'' \text{ N}$; $39^{\circ}39'41.76'' \text{ E}$) (рис. 1). Стационар заложен в сентябре 2020 г., включает 5 различных вариантов искусственно созданных почвенных конструкций, которые с учетом трех повторностей представлены на 15 автономных площадках. Конструкцию 1 в трех повторностях (1.1–1.3) создавали с использованием однообразной торфо-песчаной смеси, основанием под кон-

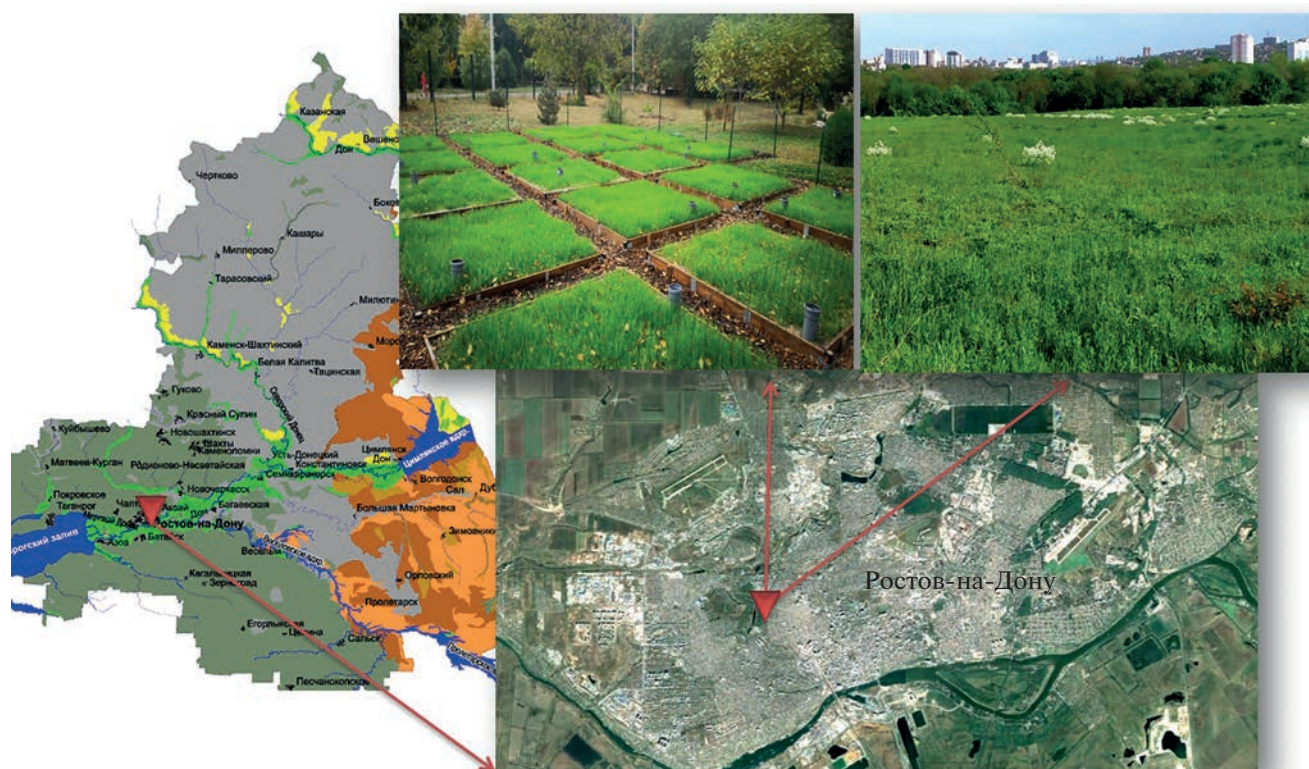


Рис. 1. Экспериментальный стационар по изучению почвенных конструкций (Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону).

струкцию служил техногенный грунт, сформировавшийся *in situ* в предшествующие 15 лет на территории закладки стационара в результате урбопедогенеза. Все остальные площадки специфичные и привязаны к тем почвенным вариантам, которые возможны в данной климатической зоне (рис. 2). В качестве материалов использовали идентичные лёссовидный суглинок, гумусово-аккумулятивный горизонт чернозема и песок среднезернистый (табл. 1).

Конструкция 1 — поверхностный горизонт мощностью 20 см сформирован смесью торф + песок + лёссовидный суглинок (Т + П + ЛС) в равных долях (1 : 1 : 1). Подстилающим слоем служит карбонатный техногенный грунт, мощностью 20 см.

Конструкция 2 — поверхностный горизонт мощностью 20 см сформирован смесью гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема + песок (ГАГ + П) в равных долях (1 : 1) (ГАГ + П). Подстилающим горизонтом служит лёссовидный суглинок мощностью 20 см.

Конструкция 3 — поверхностный горизонт мощностью 20 см сформирован послойным расположением гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема (15 см) на песке (5 см), ГАГ/П. Подстилающий горизонт — лёссовидный суглинок мощностью 20 см.

Конструкция 4 — поверхностный горизонт мощностью 20 см сформирован послойным расположением песка (5 см) на гумусово-аккумулятивном горизонте чернозема (15 см), П/ГАГ.

Таблица 1. Химические свойства материалов, использованных при создании конструкций

Материал	pH H ₂ O	ТС, %	ИС, %	ТОС, %
Торф (Т)	6.1	47.03	0.01	47.02
Лёссовидный суглинок (ЛС)	7.8	1.84	1.79	0.05
Гумусово-аккумулятивный горизонт (ГАГ)	8.0	2.96	0.20	2.76
Песок (П)	8.0	0.49	0.12	0.38
Техногенный грунт	8.1	2.6	1.1	1.5



Рис. 2. Экспериментальный стационар по изучению почвенных конструкций с условными индексами площадок, содержащими информацию о номере варианта и повторности (Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону).

Подстилающий горизонт — лёссовидный суглинок мощностью 20 см.

Конструкция 5 — поверхностный горизонт мощностью 20 см сформирован гумусово-аккумулятивным горизонтом чернозема (ГАГ). Подстилающий горизонт — лёссовидный суглинок мощностью 20 см.

На первичных этапах создания конструкций производили углубление выбранной территории до 40–50 см с выемкой горизонтов урбик, включающих в себя карбонатный мелкозем, с присутствием кирпичей и каменистой фракции не менее 40%. Под конструкции 1 в основу укладывали очищенный от камней техногенный карбонатный мелкозем, под конструкции 2–5 — лёссовидный суглинок, отобранный с водораздельной территории г. Ростов-на-Дону с глубины 2–5 м. На следующем этапе на подготовленном основании размещали деревянные каркасы будущих площадок высотой и размером $2.0 \times 2.0 \times 0.25$ м и прокладывали автоматическую систему полива та-

ким образом, чтобы трубы и оросители не попадали внутрь будущих конструкций. В дальнейшем каркасы заполняли материалом согласно схеме, описанной выше. Таким образом создаваемые конструктоземы располагаются на техногенных образованиях и не несут под собой погребенных нативных почв.

Создаваемое газонное покрытие было идентичным на всех площадках, представляя собой травосмесь следующего состава: мятлик луговой — *Poa pratensis* (35%), овсяница красная — *Festuca rubra rubra* (35%), плевел многолетний — *Lolium perenne* (30%). Посев осуществляли 15 сентября 2020 г. с нормой высева 35 г/м^2 .

В качестве основного удобрения при закладке газона использовали азофоску ($16 : 16 : 16$). На конструкциях 2, 3 и 5, вносили 35 г/м^2 , а на конструкциях 1 и 4 — 50 г/м^2 комплексного удобрения — азофоска. Глубина заделки удобрений составляла 1–2 см. В процессе вегетации газона

трижды в год в апреле, июне, сентябре вносили удобрения из расчета 5 г N/м².

Экспериментальный стационар оснащен автоматической системой полива, что обеспечивало регулярное орошение в среднем раз в неделю в зависимости от количества выпавших осадков в период с середины мая по конец сентября, характеризующийся наиболее высокими температурами воздуха и почвы. Нормы полива были аналогичными для всех площадок и составляли не более 3 л/(м² сут).

Фоновой площадкой была территория центральной части экспозиции “Приазовская степь”, расположенная в Ботаническом саду ЮФУ (47°14'10.66" N; 39°39'26.92" E) на черноземе миграционно-сегрегационном *Haplic Chernozems (Pachic)* среднегумусированном мощном тяжелосуглинистом на лёссовидном суглинке, с набором генетических горизонтов: A_{Ur}z (0–10 см)—A_U (10–50 см)—A_Ulc (50–70 см)—B_CAnc (95–120 см)—C_{ca} (120–150 см).

Анализ динамики эмиссии CO₂. Полевые наблюдения эмиссии CO₂ для конструкций 1 (1-1, 1-2, 1-3) и на фоновых территориях проводили в трех повторностях дважды в месяц в период с сентября 2020 г. по ноябрь 2021 г. Наблюдения на конструкциях 2–5 вели с сентября по ноябрь 2020 г. и с апреля по ноябрь 2021 г.

Потоки CO₂ измеряли с помощью инфракрасного газоанализатора AZ7752 [21] в первой половине дня. В почву устанавливали изоляторы (базы) каждый раз перед измерением на одно и то же место, на глубину 3–5 см, согласно методике измерения, предложенной Карелиным с соавт. [11]. Базы представляют собой непрозрачные сантехнические трубы из поливинилхлорида с толщиной стенки 2 мм, внутренним диаметром 110 мм и длиной 30 см. Соединение с анализатором обеспечивается крышкой, через которую поток воздуха под действием помпы проходит через изолятор, поступая затем в анализатор. На внутренней стороне крышки закреплен вентилятор для равномерного перемешивания воздуха во всем объеме изолятора. Время единичной экспозиции при измерении потоков CO₂ составляет не менее 3 мин [11]. Параллельно фиксировали температуру почвы на глубине 1 и 10 см и температуру воздуха на уровне ~1 м с помощью цифрового термометра HI98501, объемную влажность почвы по ее диэлектрической проницаемости в десятисантиметровом слое (Delta-T SM 150). На основании полученных данных производили промежуточные расчеты потоков в мкмоль CO₂ (м² с) по уравнению Менделеева—Клапейрона и пересчет в г C/(м² ч) (или сут). Уравнение в преобразованном виде выглядит следующим образом:

$$FLUX = 0.001VC_H / (0.0821 \times (273 + T)),$$

где FLUX — эмиссия CO₂ в камере, мкмоль за время экспозиции; *V* — объем камеры, см³; *C_H* — концентрация в камере за время экспозиции, ppm; *T* — средняя температура в камере, °C. Необходимо отметить, что в объем камеры входит как собственно измеряемый объем воздуха в изоляторе между крышкой и поверхностью почвы, так и объем измерительной системы, включая шланги, микропомпу и камеру с сенсором. В настоящем случае он равен 241.75 см³. Для пересчета из микромолей за время экспозиции в граммы углерода на м² за час применяли формулу:

$$FLUX1 = 12 \cdot 6FLUX / (10\tau S),$$

где FLUX1 — почвенная эмиссия CO₂, г C/(м² ч); *τ* — время экспозиции, мин; *S* — площадь базы, см². Для пересчета в граммы углерода на м² в сут полученное значение умножали на 24 [11].

Анализ химических свойств почв. На исследуемых конструкциях почвенные образцы отбирали буром в трех повторностях на каждой отдельной площадке на глубину 20 см в объеме 425 см³. Воздушно-сухие образцы после удаления корней растирали и просеивали через сита 1 и 0.25 мм (общая и специальная подготовка пробы) [2]. Содержание органического (ТОС) и неорганического (IC) углерода определяли с помощью анализатора углерода TOC-L CPN Shimadzu в приставке для твердых образцов SSM-5000A [40, 46, 47]. Данный метод основан на высокотемпературном каталитическом сжигании пробы и последующем детектировании выделившегося углекислого газа. Анализ пробы происходит в два этапа: содержание общего углерода (ТС) определяли сжигания пробы при температуре 900°C, неорганического (IC) — при 200°C с добавлением ортофосфорной кислоты [18]. Содержание органического углерода определяли путем вычета из общего неорганического: TOC = TC — IC. Потенциометрическим методом определяли pH в водной вытяжке [13].

Запасы органического углерода рассчитывали по формуле:

$$SOC_{stock} = TOC\rho H/10,$$

где SOC_{stock} — запасы углерода в слое, кг/м²; TOC — содержание органического углерода в слое почвы, %; *ρ* — плотность сложения почвы, г/см³; *H* — мощность слоя, см.

Скашивание наземной биомассы газонных трав осуществляли по мере отрастания на высоту свыше 10 см в среднем от 2 до 4 раз в месяц в зависимости от сезона и сроков внесения удобрений. Собранную массу взвешивали в полном объеме, отдельно взятую пробу с каждой площадки (5–6 г) помещали в стеклянный бюкс и доводили в сушильном шкафу до постоянного места веса при тем-

пературе 40°C. Воздушно-сухую биомассу скошенной газонной травы рассчитывали по формуле:

$$B = M - (MW/100),$$

где B — воздушно-сухая биомасса, г; M — скошенная растительная биомасса естественной влажности, г; W — абсолютная влажность растительной пробы, %.

Статистический анализ. Анализ значимости различий содержания углерода проводили с помощью критерия Манна–Уитни при уровне значимости 0.05. Для выявления взаимосвязи температуры, влажности и эмиссии CO_2 использовали регрессионный анализ и метод корреляции Спирмена. Применяли основные показатели описательной статистики: среднее значение, медиана, стандартная ошибка среднего значения, стандартное отклонение, коэффициент вариации, размах выборки. Проверку нормальности распределения данных выборки производили с помощью критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка. Статистическую обработку осуществляли с помощью программного обеспечения Statistica 6.0 и Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Запасы углерода и их динамика в конструктоземах стационара и в фоновой почве. При создании любых травяных покрытий необходимым условием их нормального функционирования является дополнительный полив в период с мая по сентябрь. Как следствие, в условиях города на почвенных конструкциях создаются оптимальные условия для интенсивной биодеструкции органического вещества, что может приводить к повышенной эмиссии CO_2 [5, 10]. При этом скорость и прочность связывания органического углерода почвенными минералами и его накопление зависят не только от гидротермических условий, но и особенностей произрастающей растительности, характера поступления растительных остатков в почву, а также гранулометрического состава [16, 22].

Ботанический сад ЮФУ, находясь практически в центре агломерации, сохранил останцы целинного чернозема, который испытывает минимальное влияние урбанизации и не затронут процессами урбопедогенеза. Это делает возможным его использование в качестве эталона сравнения для почвенных конструкций экспериментального стационара. По почвенно-генетическим характеристикам изученная разновидность чернозема близка к нативным почвам, занимавшим территорию современной городской агломерации в предурбаногенный период [18]. По данным [9], среднее (из 27 разрезов) содержание органического углерода в слое 0–10 см черноземов ми-

грационно-сегрегационных составляло 1.91% с колебаниями от 1.48 до 2.55%. Уменьшение содержания органического углерода вниз по профилю постепенное — до 0.58% на глубине 100 см. На территории «Приазовской степи» содержание органического углерода в настоящий момент соответствует представленному диапазону, составляя 1.8% в дерновом горизонте чернозема миграционно-сегрегационного [3].

В экспериментальном стационаре почвенные конструкции в той или иной степени имитируют черноземные почвы разной мощности и гумусированности, сформированные на лёссовидном суглинке. Только одна из пяти конструкций имеет в своем составе верховой торф, как компонент поверхностного органогенного слоя (конструкция 1). Остальные конструкции (2–5) сложены ГАГ миграционно-сегрегационного (Haplic Chernozems) с примесью песка речного среднеречного (50/50%) или послойным расположением ГАГ и песка, отражая возможные варианты создания RAT, характерного для городов юга европейской части России. Конструкция 5 (гумусово-аккумулятивный горизонт на лёссовидном суглинке) имитировала примитивный или неполноразвитый чернозем и рассматривалась как контрольная.

В табл. 2 представлены результаты содержания и динамики углерода в почвенных конструкциях различного состава во временном интервале осень 2020 (ноль-момент)—весна 2021—осень 2021.

Анализ динамики содержания неорганического углерода в первые полгода функционирования почвенных конструкций показывает, что достоверные изменения коснулись гумусовых горизонтов конструкции 2 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 0$), конструкции 3 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 2.5$) и конструкции 5 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 0$) (рис. 3). При этом увеличение содержания неорганического углерода происходит за счет поступления карбонатов. Во втором полугодии также наблюдался рост содержания неорганического углерода во всех конструкциях стационара (конструкции 1 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 21$, $U_{эмп} = 3$); конструкции 2 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 21$, $U_{эмп} = 14$); конструкции 3 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 21$, $U_{эмп} = 11.5$); конструкции 4 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 18$, $U_{эмп} = 5$); конструкции 5 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 21$, $U_{эмп} = 17.5$)). Изначально материалы, используемые для формирования гумусово-рекультивационных горизонтов конструкций, не имели высокого содержания ИС. Основным источником неорганического углерода являлся лёссовидный суглинок, лежащий в основе всего экспериментального стационара, содержащий 1.79% ИС. Необходимо отметить, что почвы юга России, характеризуются весьма выраженной миграцией карбонатов по профилю, что отражено в номенклатуре современной классификации почв России на подтиповом уровне — черноземы миграционно-сегрегационные. Веро-

Таблица 2. Динамика изменения содержания различных форм углерода и его запасов в почвенных конструкциях

Конструктозем (вариант)	Мощность слоя, см	pH H ₂ O	Плотность сложения, г/см ³	ТС, %	IC, %	ТОС, %	SOC _{stock} , кг/м ² , в указанном слое
Осень 2020 г. (2 мес. с момента создания)							
1. Т + П + ЛС	20	7.96	1.05	3.34	0.34	3.00	6.33
2. ГАГ + П	20	7.87	1.38	1.06	0.03	1.03	2.85
3. ГАГ/П	10	8.05	1.17	2.57	0.04	2.54	2.96
	10	8.02	1.27	0.14	0.01	0.13	0.16
4. П/ГАГ	10	7.68	1.19	0.11	0.01	0.10	0.18
	10	7.85	1.21	2.42	0.04	2.38	1.44
5. ГАГ	20	7.86	1.19	2.67	0.05	2.62	6.22
Весна 2021 г. (8 мес. с момента создания)							
1. Т + П + ЛС	20	7.42	1.06	2.97	0.33	2.64	5.61
2. ГАГ + П	20	7.19	1.23	1.06	0.1	0.96	2.37
3. ГАГ/П	10	7.64	1.20	2.56	0.11	2.45	2.94
	10	7.54	1.27	0.13	0.01	0.12	0.15
4. П/ГАГ	10	7.22	1.19	0.17	0.01	0.16	0.29
	10	7.57	1.26	2.41	0.1	2.31	1.46
5. ГАГ	20	7.51	1.16	2.55	0.13	2.42	5.6
Осень 2021 г. (12 мес. с момента создания)							
1. Т + П + ЛС	20	7.39	1.23	4.23	0.78	3.45	8.48
2. ГАГ + П	20	7.32	1.46	1.46	0.2	1.26	3.69
3. ГАГ/П	10	7.31	1.27	2.38	0.18	2.22	2.83
	10	7.83	1.27	0.12	0.13	0.00	0.00
4. П/ГАГ	10	7.00	1.19	0.17	0.06	0.12	0.21
	10	7.35	1.53	2.14	0.17	1.97	1.51
5. ГАГ	20	7.28	1.25	2.74	0.24	2.5	6.3

ятно, тенденция увеличения содержания неорганического углерода частично связана именно с восходящими миграционными потоками на фоне достаточного количества ирригационной влаги и высоких летних температур. Основным источником неорганического углерода в таком случае выступает подстилающий конструкции лёссовидный суглинок.

Содержание органического углерода в почве по итогам года функционирования стационара при использовании ингредиентов в виде смеси (ГАГ + П) имеет тенденцию к увеличению (конструкция 2 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 4$)), в то время как при послойном расположении ГАГ и песка в гумусово-аккумулятивном слое происходит незначительная минерализация гумуса (конструкция 3 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 3$), конструкция 4 ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$, $U_{эмп} = 0$)). Торфо-песчаная смесь (Т + П + ЛС) конструктозема 1 при минерализации верхового торфа в первые месяцы функционирования потеряла незначительное количество органического углерода ($p = 0.05$, $U_{кр} = 4$,

$U_{эмп} = 2$). Вероятно, в дальнейшем за счет высокого содержания карбонатов в лёссовидном суглинке и стабилизации pH, образуются устойчивые соединения гуминовых и фульвокислот, что на фоне поступления свежих органических соединений от газонной биомассы обеспечит достоверный прирост запасов углерода (рис. 3).

Сезонная динамика эмиссии CO₂ в почвенных конструкциях и черноземе обыкновенном карбонатном. Для эмиссии CO₂ из почв характерна заметная временная изменчивость, как по сезону, так и в течение суток [42]. Обычно динамика изменения CO₂ в почве зависит от изменения температуры воздуха, а также температуры и влажности почвы. На показатель эмиссии CO₂ из почв в большей степени влияют качественные и количественные характеристики наблюдаемых почв, растительность (корневое дыхание), микробиологическая активность.

Потоки CO₂ во всех изученных конструкциях за годовой период с осени 2020 г. по осень 2021 г. (рис. 4) характеризуются высокой динамично-

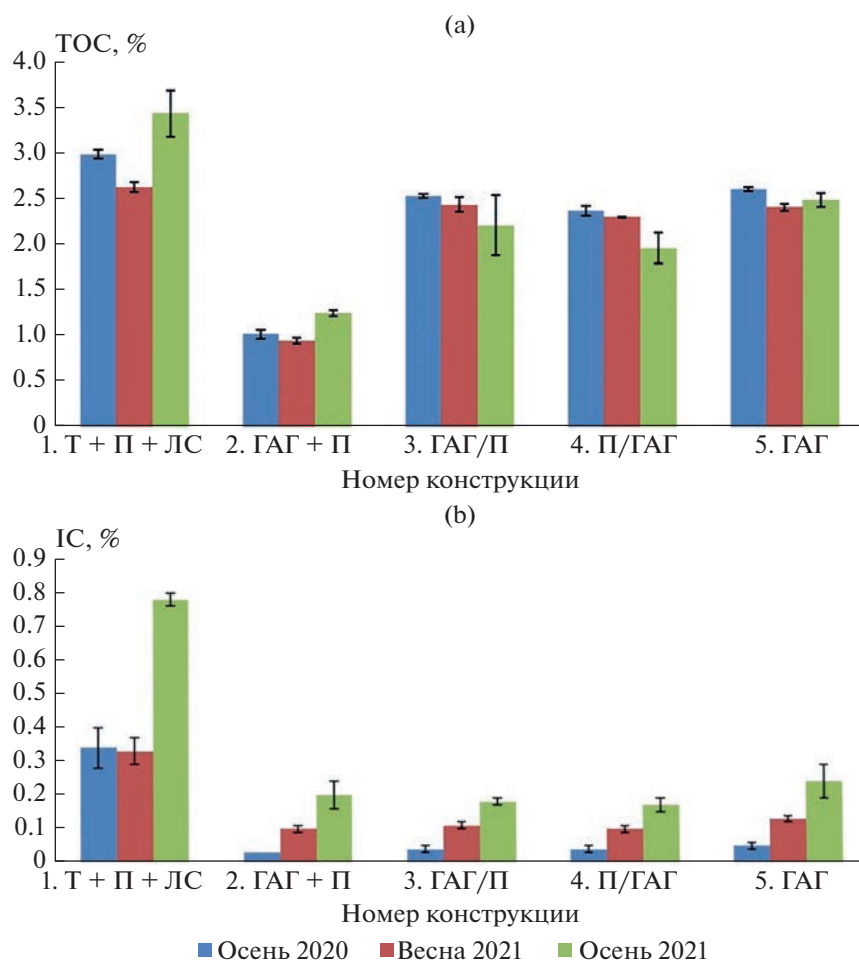


Рис. 3. Динамика содержания ТОС (а) и ИС (б) в почвенных конструкциях различного состава (3, 4 – слои ГАГ соответствующих конструкций).

стью, сопряженной с существенными различиями в основных физико-химических характеристиках горизонта RAT созданных конструктоземов, о чем свидетельствует коэффициент вариации, равный 59.73%. Поэтому данный показатель целесообразно рассматривать в соответствии с генезисом доминирующего органогенного материала – верховой торф или гумусово-аккумулятивный горизонт чернозема, используемого при создании конструкции, а также в сравнении с фоном – черноземом миграционно-сегрегационным (Haplic Chernozems). На рис. 4 представлена сезонная динамика эмиссии CO_2 для чернозема, конструкции 1 (Т + П + ЛС) и конструкций 2–5 (на основе ГАГ с различными компонентами).

Исследования потоков CO_2 из почвы на черноземе миграционно-сегрегационном (Haplic Chernozems) экспозиции “Приазовская степь” показало, относительно плавное изменение изучаемого показателя с низким значением стандартного отклонения. Среднее значение эмиссии CO_2 за

период наблюдения в фоновой почве составило $7.00 \text{ г C-CO}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$.

На созданных почвенных конструкциях потоки CO_2 из почвы существенно отличались в зависимости от используемого органогенного материала – верхового торфа или гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема, а также имели сезонные различия. Более интенсивная эмиссия CO_2 из почв всех конструктоземов в весенне-летний период (рис. 5), вероятно, связана с резким увеличением температуры почвы при стабильно высокой влажности (рис. S3). На конструкции 1 эмиссия CO_2 из почвы была максимальной и в среднем за период измерения составила $10.46 \text{ г C-CO}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$, напротив, для конструкций 2–5 на основе ГАГ – $5.51 \text{ г C-CO}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$. Таким образом, прослеживается закономерность: конструкции на основе ГАГ являются меньшими эмитентами углерода в атмосферу по сравнению с конструкциями, в которых используется торфосмесь. Различия между эмиссией CO_2 из почвен-

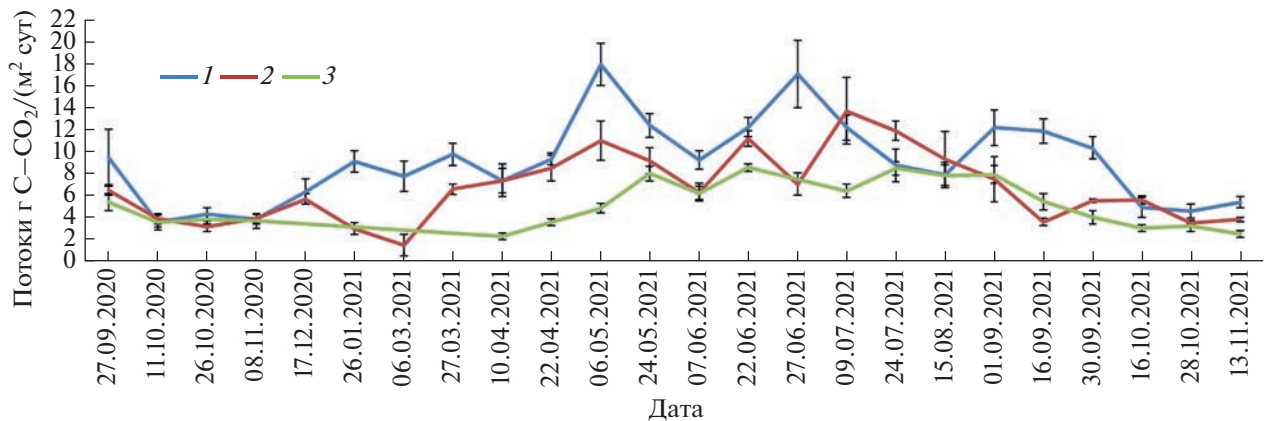


Рис. 4. Сезонная динамика эмиссии CO₂ для изученных почвенных конструкций на основе торфа (1), фонового чернозема миграционно-сегрегационного (2) и гумусово-аккумулятивных горизонтов чернозема (3).

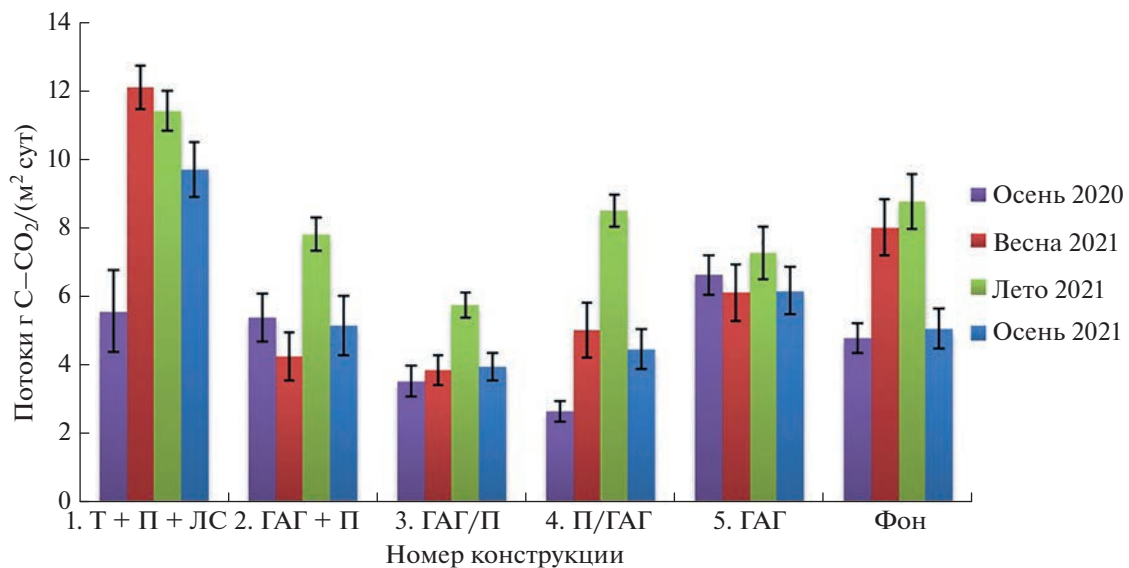


Рис. 5. Средняя эмиссия CO₂ по сезонам наблюдений.

ных конструкций и из фоновой почвы достоверны и подтверждаются критерием Манна–Уитни (ГАГ–чернозем $p = 0.05$, $U_{кр} = 462$, $U_{эмп} = 237$); торфосмесь–чернозем ($p = 0.05$, $U_{кр} = 846$, $U_{эмп} = 169$). Таким образом, выстраивается ряд почв с возрастающей способностью к эмиссии углерода: конструкции на основе гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема < фоновый чернозем миграционно-сегрегационный < конструкции на основе торфосмеси.

На черноземах миграционно-сегрегационных (Haplic Chernozems) отмечено наличие связи потоков CO₂ с температурой приземного слоя воздуха и почвы (рис. S3). Даже на фоне высокой динамики температуры не только по сезону вегетации, но и в пределах суток, зафиксирована значимая поло-

жительная корреляция с температурой воздуха ($r = 0.57$, $p < 0.05$) и почвы ($r = 0.58$, $p < 0.05$).

Сезонная динамика эмиссии CO₂ для конструкции 1 (Т + П + ЛС) характеризуется неоднородностью, что подтверждается коэффициентом вариации 47% (рис. S2). Отмечаются два пика эмиссии CO₂ из почвы: 6 мая 17.97 г C-CO₂/(м² сут) и 27 июня 17.10 г C-CO₂/(м² сут), которые приурочены к датам внесения минеральных удобрений. При этом среднее за весь период измерений составило 10.46 г C-CO₂/(м² сут). Для конструкции 1 отмечена заметная положительная корреляция эмиссии CO₂ с температурой воздуха ($r = 0.66$, $p < 0.05$) и почвы ($r = 0.69$, $p < 0.05$), и отрицательная умеренная корреляция с влажностью почвы ($r = -0.42$, $p > 0.05$).

Кроме того, необходимо отметить, что в конструкции 1 отсутствует корреляции скашиваемой наземной биомассы газонных трав с потоком CO_2 ($r = 0.09$, $p > 0.05$). Так, наблюдаемые пики биомассы на рис. S4 в большей степени объясняются температурой приземного слоя воздуха, неравномерностью роста газонных трав в течение вегетационного сезона и, как следствие, различной динамикой кошения площадок. Однако общая биомасса в данном типе конструкции за весь период вегетации одна из самых высоких и составляет 1084 г/м^2 (рис. S5).

Во всех конструкциях, созданных на основе ГАГ, отмечена заметная корреляционная зависимость эмиссии CO_2 с температурой приземного слоя воздуха и температурой почвы (рис. S3). Взаимосвязь с влажностью почвы заметна и достоверна только для конструкции 4 ($r = 0.49$, $p < 0.05$), а для конструкций 5 и 2 — слабо выражена и не достоверна. Кроме того, для почвенных конструкций с гумусово-аккумулятивными горизонтами в составе конструкторов отмечена положительная корреляционная зависимость потока эмиссии CO_2 со скошенной биомассой: для конструкции 2 умеренная корреляция ($r = 0.48$, $p < 0.05$), для конструкций 3 и 4 — заметная ($r = 0.5$, $p < 0.05$; $r = 0.68$, $p < 0.05$), а для конструкции 5 — высокая ($r = 0.75$, $p < 0.05$).

Самое низкое среднее значение эмиссии CO_2 за период наблюдений зафиксировано на конструкции 3 (ГАГ на песке): $4.51 \text{ г С—CO}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$. Для данной почвенной конструкции отмечены также минимальные значения запасов углерода 3.09 кг/м^2 и самый низкий показатель совокупной скошенной биомассы за сезон — 803 г/м^2 .

Для конструкции 4 (песок на ГАГ) с поверхностным песчаным слоем характерен наибольший прирост биомассы, что говорит о более благоприятных условиях произрастания газонных трав. В данном случае песчаная фракция способствует увеличению почвенной аэрации в узле кущения, тем самым создаются условия для более интенсивного корневого дыхания растений (величина совокупной скошенной биомассы за сезон — 1094 г/м^2). Как следствие, возникает повышение сезонной (в летний период, весна—лето 2021 г.) почвенной эмиссии CO_2 , что характеризует данную конструкцию, как положительно влияющую на произрастание газонных трав, на фоне интенсификации процессов эмиссии CO_2 . Этому может способствовать пониженная влажность дернового слоя — даже в холодный период года она колеблется от 5 до 20% и высокая температура (на 5°C выше остальных площадок). В верхней песчаной части конструкции фиксируется незначительное и недостоверное увеличение содержания органического углерода, что можно объяс-

нить поступлением растительных остатков от корневых систем растений, в то время как нижний ГАГ слой конструкции характеризуется достоверным уменьшением содержания органического углерода за счет общей его минерализации (табл. 2).

Необходимо отметить, что конструкциям 3 (ГАГ над песком) и 5 (ГАГ) свойственны высокие значения влажности почвы (от 30 до 50%) в течение всего сезона наблюдений, что связано с тяжелосуглинистым гранулометрическим составом исходного материала. Но при этом, из-за большей мощности гумусово-аккумулятивного слоя и больших запасов органического углерода в слое 0–20 см, для конструкции 5 характерны наибольшее значение эмиссии CO_2 ($6.56 \text{ г С—CO}_2/(\text{м}^2 \text{ сут})$) и высокий показатель скошенной биомассы газонных растений. Таким образом, конструкция 5 имитирует составом фоновую почву — чернозем миграционно-сегрегационный и при регулярном поливе и внесении удобрений в первый год функционирования показывает себя с наилучшей стороны, поскольку сформированный по таким образом конструктором способен не только к секвестрации атмосферного углерода, но и к формированию максимального объема биомассы газонных трав.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкторы, созданные на основе гумусово-аккумулятивных горизонтов, характеризуются высокой и заметной корреляционной зависимостью эмиссии CO_2 из почвы от температуры приземного слоя воздуха (при $p < 0.05$ для конструкции 2 $r = 0.76$, конструкции 3 — $r = 0.82$, конструкции 4 — $r = 0.76$, конструкции 5 — $r = 0.49$) и почвы (при $p < 0.05$ для конструкции 2 $r = 0.58$, конструкции 3 — $r = 0.74$, конструкции 4 — $r = 0.75$, конструкции 5 — $r = 0.68$). Взаимосвязь с влажностью почвы заметна и достоверна только для конструкции 4 ($r = 0.49$, $p < 0.05$). Для конструкции, созданной на основе торфа и суглинка, отмечена заметная положительная корреляция эмиссии CO_2 с температурой приземного слоя воздуха ($r = 0.66$ при $p < 0.05$) и почвы ($r = 0.69$ при $p < 0.05$) в то время как корреляция с влажностью почвы носит обратный характер ($r = -0.42$ при $p > 0.05$).

В первый год функционирования почвенных конструкций при использовании смеси гумусово-аккумулятивного горизонта и песка отмечается тенденция к увеличению содержания органического углерода. Напротив, при послойном расположении компонентов конструктора происходит незначительная минерализация первоначальных компонентов гумуса в конструкции в целом. Особое направление в трансформации почвенного органического вещества характерно для конструкций на основе торфосмеси, лёссовидного суглинка и

песка. В первые месяцы функционирования отмечается интенсивная минерализация верхового торфа, но в период активной вегетации газонного покрытия наблюдается достоверное увеличение содержания $C_{\text{орг}}$.

Конструкции на основании гумусово-аккумулятивных горизонтов при их перемещении и складировании являются меньшими эмитентами углерода в атмосферу по сравнению с конструкциями, где применяются торфосмеси. При этом может быть выстроен ряд почв с возрастающей способностью к эмиссии CO_2 из почвы: конструкции на основе гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема < фоновый чернозем миграционно-сегрегационный < конструкции на основе торфосмеси.

Почвенные конструкции на основании торфосмеси характеризуются отсутствием корреляции сезонной динамики скашиваемой наземной биомассы газонных трав с потоком CO_2 , в то время как для почвенных конструкций с использованием гумусово-аккумулятивных горизонтов в составе конструкторов отмечена положительная корреляционная зависимость: для конструкций ГАГ + + песок и ГАГ + песок послойно присутствует умеренная корреляция ($r = 0.48$ и $r = 0.5$, $p < 0.05$, а для конструкции только с ГАГ — высокая ($r = 0.75$, $p < 0.05$)).

В целом можно констатировать, что в первый год функционирования почвенного стационара, используемый при рекультивации парково-рекреационных зон Ростовской агломерации гумусово-аккумулятивный горизонт зональных черноземов миграционно-сегрегационных в любом из рассмотренных вариантов не приводит к повышению эмиссии CO_2 , а создаваемые на них газонные покрытия не являются участками интенсивной эмиссии CO_2 из почвы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Анализ потоков и запасов углерода выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00418, <https://rscf.ru/project/23-27-00418/>. Анализ данных проведен в рамках проекта системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600282>.

Рис. S1. Содержание органического и неорганического углерода в черноземе миграционно-сегрегационном среднегумусированном (Haplic Chernozems), целинный участок ботанического сада ЮФУ.

Рис. S2. Сезонная динамика средних значений эмиссии CO_2 для почвенных конструкций и чернозема миграционно-сегрегационного (Haplic Chernozems) (фон).

Рис. S3. Сезонная динамика температуры воздуха и почвы, влажности почвы.

Рис. S4. Сезонная динамика скашиваемой биомассы почвенных конструкций.

Рис. S5. Общая биомасса растений по всем конструкциям за весь период вегетации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Ростовской области. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 251 с.
2. Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
3. Безуголова О.С., Горбов С.Н., Скрипников П.Н. Гумусное состояние почв Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону-Таганрог: ЮФУ, 2022. 138 с.
4. 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.
5. Визирская М.М. Функционально-экологическая оценка лесных подзолистых почв в условиях Московского мегаполиса: на примере ЛОД РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 25 с.
6. Горбов С.Н. Генезис, классификация, экологическая роль городских почв Юга Европейской части России (на примере ростовской агломерации). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 48 с.
7. Горбов С.Н. Генезис, классификация и экологическая роль городских почв Европейской части Юга России (на примере Ростовской агломерации). Дис. ... докт. биол. наук. М., 2018. 488 с.
8. Горбов С.Н., Безуголова О.С. Почвенный покров Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону, 2019. 186 с.
9. Захаров С.А. Почвы Ростовской области и их агрономическая характеристика. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 1946. 123 с.
10. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудяров В.Н., Валитини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088.
11. Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Краев Г.Н. Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре. М.: Изд-во ЦЭПЛ РАН, 2015. 64 с.
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Изд-во Ойкумена, 2004. 342 с.
13. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

14. Приваленко В.В. Геохимическая оценка экологической ситуации в г. Ростове-на-Дону. Ростов-на-Дону, 1993. 167 с.
15. 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.
16. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М: ГЕОС, 2015. 233 с.
17. Смагин А.В. Настоящее и будущее самой плодородной почвы // Наука в России. 2013. № 1. С. 23–30.
18. Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Кондратёнок Б.М., Лаптева Е.М., Кострова С.Н. Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2021. № 7. С. 784–794. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097>
19. Bandaranayake W., Qian Y.L., Parton W.J., Ojima D.J., 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. Blum W.E.H. Functions of soil for society and environment // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2005. V. 4. P. 75–79.
21. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications. Li & Cor Biosciences, 2013. 44 p.
22. Chapin F.S., Woodwell G.M., Randerson J.T., Rastetter E.B., Lovett G.M., Baldocchi D.D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology and methods // Ecosystems. 2006. V. 9. P. 1041–1050.
23. Delden van L., Larsen E., Rowlings D., Scheer C., Grace P. Establishing turf grass increases soil greenhouse gas emissions in peri-urban environments // Urban. Ecosyst. 2016. V. 19. P. 749–762.
24. Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // Geoderma. 2021. V. 399. P. 115039. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039>
25. FAO Climate-smart agriculture. Sourcebook. 2013. E-ISBN 978-92-5-107721-4
26. Fekete I., Berki I., Lajtha K., Trumbore S., Francioso O., Gioacchini P., Montecchio D. et al. How will a drier climate change carbon sequestration in soils of the deciduous forests of Central Europe? // Biogeochemistry. 2021. V. 152. P. 13–32. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00728-w>
27. Gillman L.N., Bollard B., Leuzinger S. Calling time on the imperial lawn and the imperative for greenhouse gas mitigation // Global Sustainability. 2023. V. 6. № 3. <https://doi.org/10.1017/sus.2023.1>
28. Ignatieva M., Eriksson F., Eriksson T., Berg P., Hedblom M. The lawn as a social and cultural phenomenon in Sweden // Urban Forestry Urban Greening. 2017. V. 21. P. 213–223.
29. Ignatieva M., Hedblom M. An alternative urban green carpet // Science. 2018. V. 362. № 6411. P. 148–149. <https://doi.org/10.1126/science.aau6974>
30. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
31. Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle // Nutr Cycl Agroecosyst. 2004. V. 70. P. 103–116.
32. Lefèvre C., Rekik F., Alcantara V., Wiese L. Soil Organic Carbon: The Hidden Potential (UN Food and Agriculture Organization, Rome, 2017).
33. Lorenz K., Kandeler E. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. № 7. P. 1373–1385.
34. Lorenz K., Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils // Environ Int. 2009. V. 35. P. 1–8.
35. Pickett S.T.A., Cadenasso M.L., Grove J.M., Boone C.G., Groffman P.M., Irwin E., Kaushal S.S., Marshall V., McGrath B.P., Nilon C.H., Pouyat R.V., Szlavecz K., Troy A., Warren P. Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress // J. Environ. Manag. 2011. V. 92. P. 331–362.
36. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Golubiewski N.E. A comparison of soil organic carbon stocks between residential turfgrass and native soil // Urban Ecosyst. 2009. V. 12. P. 45–62.
37. 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. Environ. Qual. 2003. V. 32. P. 1694–1700.
38. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D. Interannual variability in global respiration 1980–94 // Glob. Chang. Biol. 2002. V. 8. P. 800–812.
39. Robbins P., Birkenholtz T. Turfgrass Revolution: Measuring the Expansion of the American Lawn // Land Use Policy. 2003. V. 20. P. 181–194. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00006-1)
40. Roper W.R., Robarge W.P., Osmond D.L., Heitman J.L., Comparing four methods of measuring soil organic matter in North Carolina soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2019. V. 83. P. 466–474.
41. 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.
42. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V., Morin T. Carbon stocks and CO₂ emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // Catena. 2017. V. 158. P. 131–140.
43. Selhorst A., Lal R. Net Carbon sequestration potential and emissions in home lawn turfgrasses of the United States // Environ. Managem. 2013. V. 51. P. 198–208. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9967-6>
44. Shanin V.N., Bykhovets S.S., Chertov O.G., Komarov A.S. The effect of various external factors on dynamics of organic carbon in different types of forest: a simulation-based assessment // Russ. For. Sci. 2018. V. 5. P. 335–346.
45. Shchepeleva A.S., Vasenev V.I., Mazirov I.M., Vasenev I.I., Prokhorov I.S., Gosse D.D. Changes of soil organic car-

- bon stocks and CO₂ emissions at the early stages of urban turf grasses' development // *Urban Ecosystems*. 2017. V. 20. P. 309–321.
46. Sleutel S., De Neve S., Singier B., Hofman G. Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter // *Comm. Soil Sci. Plant Analysis*. 2007. V. 38. № 19–20. P. 2647–2657.
 47. Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Skripnikov P.N. The content and distribution of various forms of carbon in urban soils of Southern Russia on the example of Rostov agglomeration // *Geoderma Regional*. 2020. V. 21. P. e00266.
 48. Thienelt T.S., Anderson D.E. Estimates of energy partitioning, evapotranspiration, and net ecosystem exchange of CO₂ for an urban lawn and a tallgrass prairie in the Denver metropolitan area under contrasting conditions // *Urban Ecosyst*. 2021. V. 24. P. 1201–1220. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01108-4>
 49. Trammell T.L.E., Pouyat R.V., Carreiro M.M., Yesilonis I. Drivers of soil and tree carbon dynamics in urban residential lawns: a modeling approach // *Ecological Appl.* 2017. V. 27. <https://doi.org/10.1002/eap.1502>
 50. Velasco E., Segovia E., Choong A.M.F., Lim B.K.Y., Vargas R. Carbon dioxide dynamics in a residential lawn of a tropical city // *J. Environ. Management*. 2021. V. 280. P. 111752. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111752>
 51. Zomer R.J., Bossio D.A., Sommer R., Verchot L.V. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>

Short-Term Dynamics of CO₂ Emission and Carbon Content in Urban Soil Structures in the Steppe Zone

S. N. Gorbov¹, V. I. Vasenev^{2, 3}, E. N. Minaeva¹, S. S. Tagiverdiev^{1, *},
P. N. Skripnikov¹, and O. S. Bezuglova¹

¹*Southern Federal University, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Rostov-on-Don, 344006 Russia*

²*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia*

³*Soil and Landscape Geography Group, Wageningen University, Wageningen, 6707 Netherlands*

*e-mail: 2s-t@mail.ru

Constructed Technosols are an important component of urban green infrastructure whose role in the carbon balance of urban ecosystems remains poorly understood. The dynamics of carbon stocks and CO₂ emissions of soil structures depend on both bioclimatic conditions and the parameters of the construction – the substrates used, the composition and thickness of the layers. The carbon stock dynamics and CO₂ emission were studied on constructozems of different composition established at the “Experimental Station for Study of Soil Constructs” in the Botanical Garden of the Southern Federal University (Rostov-on-Don). The station consists of 15 self-contained sites, which present 5 different variants of soil constructions created using substrates traditionally used for landscaping and beautification tasks in the cities of the steppe zone. The Haplic Chernozems, located on a placor plot in the vicinity of the Experimental Station, was studied as a background area. Monitoring studies over two seasons (from September 2020 to December 2022) allowed the seasonal dynamics of organic and inorganic carbon content and CO₂ emissions to be compared for the different soil design options in comparison with the background. In all constructions created on the basis of humus-accumulative horizons of chernozems, a marked dependence of CO₂ emission on air (at $p < 0.05$ for construction 2 $r = 0.76$, construction 3 $r = 0.82$, construction 4 $r = 0.76$, construction 5 $r = 0.49$) and soil (at $p < 0.05$ for construction 2 $r = 0.58$, construction 3 $r = 0.74$, construction 4 $r = 0.75$, construction 5 $r = 0.68$) and soil (at $p < 0.05$ for construction 2 $r = 0.58$, construction 3 $r = 0.74$, construction 4 $r = 0.75$, construction 5 $r = 0.68$) was noted. The biomass stocks of lawn grasses growing on the constructions were determined, and a positive correlation between the CO₂ emission and the growth of the above-ground biomass (for construction 2 a moderate correlation ($r = 0.48$, $p < 0.05$), for constructions 3 and 4 a marked correlation ($r = 0.5$, $p < 0.05$; $r = 0.68$, $p < 0.05$), and for construction 5 a high correlation ($r = 0.75$, $p < 0.05$) was noted. The dynamics of the stock of various forms of carbon in the first year of operation of the structures were studied. Based on the comparison of carbon fluxes and stocks, it is shown that lawn ecosystems in the early stages of constructozem cannot be considered as net carbon stock sites in the temperate continental climate of Rostov-on-Don.

Keywords: urban soils, constructozems, Haplic Chernozems, carbon dioxide emissions