

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.42

АНАЛИЗ ВВОЗИМЫХ ПОЧВОГРУНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2020 г. И. П. Брянская^{a, *}, В. И. Васенев^a, Р. А. Брыкова^a, В. Н. Маркелова^b, Н. В. Ушакова^b,
Д. Д. Госсе^c, Е. В. Гавриленко^d, Е. В. Благодатская^e

^aДепартамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем, Российский университет дружбы народов,
ул. Миклухо-Маклая, 10/1, Москва, 117198 Россия

^bМосковский экологический регистр, ул. Новый Арбат, 11, Москва, 119019 Россия

^cМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119199 Россия

^dМосэкомониторинг, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1, Москва, 119019 Россия

^eЦентр Гельмгольца, Теодор-Лайзер штр., 4, Халле, Германия

*e-mail: inna.bryanskaya@bk.ru

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Развитие озеленения и благоустройства в современных городах делает все более актуальными изучение свойств и функций почвенных конструкций. Депонирование углерода — одна из основных экологических функций почв, широко изученная для почв естественных и агроэкосистем, но все еще малоизвестная для городских и техногенных почв. Запасы углерода в городских почвах, особенно в почвенных конструкциях, формируются при доминирующем воздействии антропогенного фактора, отличаются высокой и сложно прогнозируемой неоднородностью. Основные факторы, определяющие запасы углерода почвенных конструкций Московского мегаполиса, — свойства и объемы ввозимых почвогрунтов. По данным опросов компаний-поставщиков проанализирован рынок почвогрунтов, поставляемых в Москву для озеленения и благоустройства в 2016 и 2017 гг., источники и объемы поставок почвогрунтов и их компонентов, рецептуры приготовления и свойства. На основании полученных результатов дан прогноз средних запасов органического углерода — 84 т/га в слое 0–10 см. Сопоставление полученных оценок с результатами полевого обследования представительной выборки точек мониторинга состояния почв Москвы ($n > 190$) показало превышение прогнозных оценок в 1.5–2.0 раза. В то же время сравнительно небольшое абсолютное превышение (на 30–40 т/га) и схожая динамика расчетных и исследованных запасов по годам (увеличение на 10–14% в 2017 по сравнению с 2016 г.) подтверждают предположение об определяющей роли ввозимых почвогрунтов в формировании запасов углерода почвенных конструкций Москвы и подчеркивают важность мониторинга и нормирования свойств ввозимых почвогрунтов как основы устойчивого развития городских экосистем.

Ключевые слова: городские и техногенные почвы, экологические функции почв, экосистемные сервисы, конструкторские, устойчивое развитие города

DOI: 10.31857/S0032180X20120047

ВВЕДЕНИЕ

Городские почвы — ключевой компонент городских экосистем, экологическая и социально-экономическая роль которого остается недооцененной, что особенно заметно на фоне высокой стоимости городских земель [22, 41]. На протяжении долгого времени большинство исследований городских почв было сфокусировано на вопросах их загрязнения [1, 40], засоления [13, 31], переуплотнения [29], сокращения микробного разнообразия и микробиологической активности [11]. При этом значительная часть результатов была по-

лучена для участков с максимальной антропогенной нагрузкой (промышленных зон, придорожных территорий, строительных площадок), где признаки деградации городских почв по сравнению с фоновыми были наиболее очевидны [4, 23]. Современные концепции устойчивого развития городов не ставят под сомнение существующие проблемы антропогенного воздействия на экологическое состояние почв, но смещают акценты в сторону анализа экологических функций и экосистемных сервисов, которые городские почвы могут реализовывать [2, 46]. Особое внимание

при этом уделяется почвам существующих и создаваемых объектов городской зеленой инфраструктуры [21, 38].

Депонирование углерода – ключевая функция почв, определяющая обеспечение таких экосистемных сервисов, как плодородие, снижение парникового эффекта, иммобилизация поллютантов и сохранение биоразнообразия [12, 55]. Оценки запасов углерода в городских почвах варьируют в широком диапазоне, что связано в высокой пространственной неоднородностью и различными факторами городской среды, воздействующими на депонирование и минерализацию углерода: эффект теплового острова, запечатывание, мероприятия по озеленению и благоустройству [38, 39, 52]. Большинство современных исследований показывает, что запасы углерода в городских почвах могут быть сопоставимы с фоновыми почвами и даже значительно превышать их [3, 44, 48]. В обзоре [50], основанном на анализе результатов, полученных для ста городов мира, предложены следующие механизмы формирования запасов углерода в городских почвах: 1) импорт материала из-за пределов города (в том числе поставки продовольствия, строительных материалов, почвогрунтов и их компонентов); 2) перераспределение запасов внутри города (в том числе накопление и переработка отходов, образование сажи при сжигании топлива) и 3) внутренняя трансформация и консервация (в том числе в результате запечатывания и переувлажнения). Из перечисленных механизмов доминирующее воздействие на формирование запасов углерода в поверхностных горизонтах – наиболее частом объекте экологического мониторинга городских почв – оказывает привнос органического вещества при поставках почвогрунтов и их компонентов для задач озеленения и благоустройства.

Москва – один из наиболее крупных и динамично развивающихся мегаполисов мира. Благоустройство территории, создание новых и реконструкция существующих зеленых зон, рекультивация и другие процессы городского хозяйства определяют высокую потребность города в почвогрунтах. Несмотря на наличие ряда нормативных документов, контролирующих качество почвогрунтов [9, 14, 15], процесс создания почвенных конструкций остается недостаточно регламентированным, а рынок почвогрунтов непрозрачным и сложным для анализа [17, 20]. Объем почвогрунтов и их компонентов, ежегодно ввозимых в Москву для озеленения и благоустройства, превышает 1 млн м³ [18]. Эти материалы отличаются высоким разнообразием по свойствам и происхождению. Поставки почвогрунтов для частных заказчиков практически никак не регламентируются и не контролируются, что расширяет перечень возможных компонентов. Существующие нормы качества почвогрунтов [115] до-

пускают содержание органического вещества от 4 до 25% (то есть содержание органического углерода от 2 до 15%). В реальности варьирование содержания углерода во ввозимых грунтах может быть еще шире.

Таким образом, верхние насыпные горизонты городских почв в Москве представляют собой “черный слой”. Запасы углерода в них определяются сложной комбинацией факторов, как прогнозируемых (функциональная зона, характер поверхности), так и непрогнозируемых (выбор почвогрунта с определенными свойствами). Даже ориентировочная оценка запасов углерода мало реалистична без понимания структуры баланса ввозимых в Москву почвогрунтов.

Цель работы – изучить объемы и разнообразие свойств почвогрунтов и их компонентов, используемых для озеленения и благоустройства в Московском мегаполисе, и оценить их влияние на формирование запасов углерода в верхнем слое почвенных конструкций в городе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Условия формирования и функционирования почв в Московском мегаполисе. С населением более 12 млн Москва является самым крупным мегаполисом в Европе. Территория Московского мегаполиса расположена в центре Восточно-Европейской равнины, характеризуется умеренно-континентальным климатом. Фоновая растительность, включающая виды, характерные для южно-таежной зоны, сохранилась преимущественно на территории особо охраняемых природных территорий, а значительную часть зеленых насаждений составляют интродуцированные виды: клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), дуб красный (*Quercus rubra* L.), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.), туя западная (*Thuja occidentalis* L.), декоративные формы деревьев и кустарников [1, 12, 19]. Зональные дерново-подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности и оглеения также преимущественно встречаются в рекреационных зонах. Доминируют в городе антропогенно-измененные и антропогенные почвы, значительная часть которых (рекреаземы, реплантоземы, конструктороземы) содержит техногенный рекультивационный горизонт RAT, формируемый за счет подсыпки почвогрунтов [16]. Строительство, озеленение и благоустройство на территории Новой Москвы сопряжено с регулярными поставками органоминеральных смесей, что еще более расширяет рынок почвогрунтов и их компонентов в Московском мегаполисе.

Правовые и экономические предпосылки формирования рынка почвогрунтов и их компонентов в Московском мегаполисе. С начала 2000 г. вопросам озеленения и благоустройства Москвы стали

уделять повышенное внимание, что, в свою очередь, способствовало увеличению спроса на растительный материал, удобрения, почвогрунты и их компоненты. Исходно поставки почвогрунтов носили бессистемный, хаотичный характер, происхождение ввозимых грунтов оставалось неизвестным, а контроль качества почв проводился только при приеме объектов озеленения. Регулярное использование для задач озеленения города почв, вывозимых с участков земель сельскохозяйственного назначения или низкокачественных грунтов на основе низинного торфа, привело к пониманию необходимости введения контроля качества и сертификации почвогрунтов. В 2004 г. вышло Постановление правительства Москвы № 514-ПП «О повышении качества почвогрунтов в городе Москве» [15], в дальнейшем прошедшее большое количество редакций и доработок. Принятие в 2007 г. закона города Москва «О городских почвах» [9] закрепило в юридической практике понятие «почвогрунт – обладающая плодородием почвенная масса, созданная искусственно, или плодородный слой, снятый с поверхности земельного участка». Под это определение попадали смеси разных компонентов, включая гумусовые горизонты, изымаемые при строительстве, рыхлые горные породы, различные виды торфа, сапрпель, растительные остатки. Позже было разрешено использование в качестве добавок отработанных тепличных грунтов и осадков сточных вод после предварительного анализа на содержание водорастворимых солей и поллютантов. Постановлением Правительства Москвы от 8 сентября 2009 г. № 973-ПП было запрещено использование торфа, торфопесчаных смесей и грунтов природного происхождения при производстве работ по рекультивации почв, озеленению и цветочному оформлению в городе Москва и разрешено использование котлованных грунтов в качестве компонента почвогрунта. В настоящее время в перечень компонентов, используемых при производстве почвогрунтов, включены котлованные грунты, торф разной степени разложения, плодородный слой почвы, осадки станций водоподготовки, органические удобрения (биокомпосты) и песок.

В Москве действует не менее 50 крупных поставщиков почвогрунтов. Дать более точную оценку не представляется возможным, так как закупка производится не через отдельные конкурсы, а входит в состав общих смет по озеленению и благоустройству. Расположение площадок по производству почвогрунтов охватывает все направления. При этом исторически основные поставки осуществлялись из Дмитровского района Московской области, а также из тех районов, где есть старые торфопредприятия: Волоколамский район, Рязанская область, Владимирская область.

Анализ объемов и свойств почвогрунтов и их компонентов. Для анализа объемов и свойств почвогрунтов, поставляемых для проведения озеленительных работ в Москве, совместно с АНО «Московский экологический регистр» было проведено анкетирование поставщиков. Были опрошены компании, поставлявшие в 2016–2017 гг. не менее 30 тыс. м³ почвогрунтов в год и имеющие сертификат системы «Экологичные почвогрунты». Всего в 2016 г. приняли участие 14 компаний, в 2017 – 17 компаний, а 4 компании приняли участие в анкетировании и в 2016, и в 2017 гг. По экспертной оценке АНО «Московский экологический регистр», опрошенные предприятия обеспечивали до половины всех поставок почвогрунтов для нужд города. В то же время это наиболее прозрачные предприятия, поставки почвогрунтов которых подлежат систематическому анализу и учету. Компании, принявшие участие в анкетировании, ответили на пять вопросов: 1) ежегодный объем поставок; 2) локализация поставок; 3) расположение производственных площадок; 4) рецептура почвогрунта и 5) происхождение компонентов почвогрунта. Полученные данные были дополнены результатами лабораторных исследований свойств поставляемых почвогрунтов по трем показателям: 1) рН_{KCl} (потенциометрический метод по ГОСТ 26483-85); 2) гранулометрический состав (по содержанию частиц <0.01 мм по ГОСТ 12536-2014) и 3) содержание органического вещества (бихроматное окисление по Тюрину для почв ГОСТ 26213-91 или по методу определения зольности для торфов ГОСТ-27784-88). Официальные названия компаний в анкетах были заменены порядковыми номерами для обеспечения анонимности.

Анализ запасов углерода в поверхностных горизонтах почвенных конструкций Московского мегаполиса. Для сопоставления запасов углерода, прогнозируемых на основе данных по объемам и свойствам почвогрунтов, полученным в результате анкетирования, с полевыми данными были использованы результаты почвенного экологического мониторинга в точках наблюдения ГПБУ «Мосэкомониторинг» в 2016 и 2017 гг. Объекты были равномерно распределены по территории Москвы, включая Новую Москву. Образцы отбирали в различных функциональных зонах: жилых, общественных и рекреационных, зонах транспортной инфраструктуры. Зоны особо охраняемых природных территорий и промышленных предприятий не рассматривали, так как доля почвенных конструкций для них относительно мала. Всего было изучено 192 точки в 2016 г. и 190 точек в 2017 г. (рис. 1, табл. 1). Смешанные пробы отбирали с глубины 0–20 см методом конверта. После сушки на воздухе и пробоподготовки с удалением корней в пробах почв проводили анализ тех же свойств и теми же методами, что и для почвогрунтов: гранулометрического состава, ре-

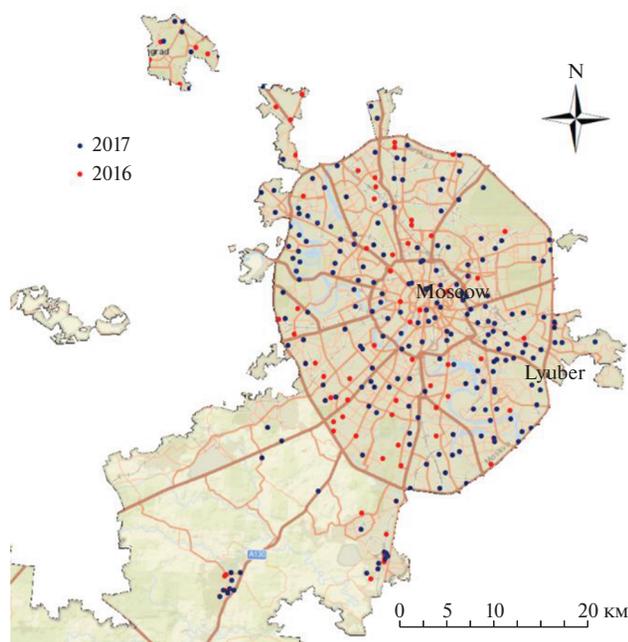


Рис. 1. Распределение точек отбора проб почв в 2016 и 2017 гг.

акции среды ($pH_{КС}$) и содержания органического вещества. Для пересчета содержания органического вещества в содержание органического углерода использовали коэффициент 1.724 [6]. Плотность почв не входит в перечень параметров, наблюдаемых ГПБУ “Мосэкомониторинг”, поэтому для оценки запасов использовали усредненное значение 1.1 г/см, ранее примененное для оценки запасов углерода в поверхностных горизонтах городских почв города Москвы [3, 53]. Запасы (т/га) рассчитывали как произведение содержания органического углерода (%), плотности (г/см³) и мощности (см).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура поставок почвогрунтов и их компонентов. Результаты анкетирования компаний-поставщиков показали, что в Москву для озелене-

ния и благоустройства было ввезено 960 тыс. м³ почвогрунтов в 2016 г. и 1750 тыс. м³ – в 2017 г. Данные 2016 г. соответствуют оценкам ДПиООС (Департамент природопользования и охраны окружающей среды) по ежегодному объему поставок почвогрунтов в Москву на 2012 г. [18], в то время как объем почвогрунтов, ввезенных в 2017 г., превышает эти оценки на 75%. Это косвенно подтверждает предположение о возрастающей потребности города в почвогрунтах, в том числе связанной с реализацией программы “Моя улица” и застройкой Новой Москвы. Всего в рецептурах изученных почвогрунтов использовалось семь основных компонентов, из которых пять составили более 90% от общего объема произведенных почвогрунтов: низинный и верховой торфа, растительный грунт (“срезка”), котлованный грунт, песок. Оставшиеся 10% представлены черноземом, поставлявшимся из Тамбовской области (компания 8, 2016 г.) и осадками сточных вод Мосводоканала (компания 27, 2017 г.). Наиболее распространенная рецептура почвогрунта представляет собой сочетание низинного торфа (от 15 до 40%), растительного или котлованного грунта (от 40 до 70%) и песка (около 10–20%). Наиболее часто используемыми компонентами стали растительный грунт (32 и 51% от всех поставок в 2016 и 2017 г. соответственно) и низинный торф (25 и 30% от всех поставок в 2016 и 2017 г. соответственно). Реже всего применялся верховой торф (рис. 2). В то же время логистика у этих компонентов принципиально отличалась. Растительный грунт, под которым часто подразумевается “срезка” – верхний плодородный слой городской почвы, снятый в процессе строительства, – в основном поставлялся с территорий активной застройки, расположенных на небольшом расстоянии от производственных площадок. Низинный торф, наоборот, поставлялся с больших расстояний – севера, северо-запада и востока Московской области, Тверской, Владимирской и Тульской областей, где исторически развита его добыча (рис. 3). Аналогичный подход к производству почвогрунтов на основании сочетания минеральных компонентов (песок, срезка), добываемых на месте и органических субстратов (торфа,

Таблица 1. Объекты полевого исследования и отбора проб почв в г. Москва в 2016 и 2017 гг.

Функциональная зона	Описание	Объем выборки	
		2016	2017
Жилые функциональные зоны	Зоны жилых микрорайонов и жилых групп многоквартирной жилой застройки, в том числе дворовые территории и детские площадки	92	92
Общественные и рекреационные зоны	Парки, скверы, территории школ, больниц, многофункциональные общественные зоны	82	79
Зоны транспортной инфраструктуры	Зоны линейных объектов внешнего транспорта и магистралей, придорожные территории, гаражи	18	19

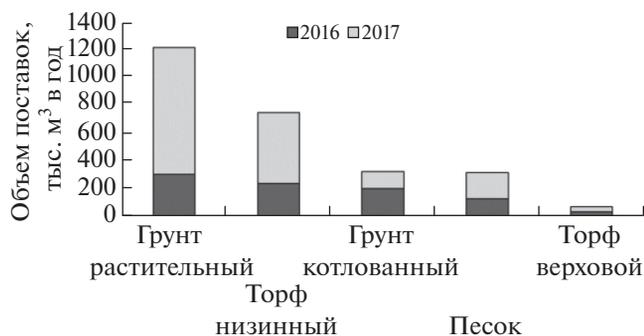


Рис. 2. Объем поставок основных компонентов почвогрунтов.

компосты, донные отложения), поставляемых извне, активно применяется во Франции [35, 54], США [28, 36] и других странах. Что объясняется рентабельностью технологии, позволяющей не только обеспечивать нужды городского озеленения, но и утилизировать нетоксичные строительные отходы.

Свойства почвогрунтов. Изученные почвогрунты заметно отличались по содержанию органического углерода, в то время как по кислотности и

гранулометрическому составу выборка была достаточно гомогенной. Среди изученных почвогрунтов доминировали супесчаные и легкосуглинистые, составившие соответственно 45 и 38% от общей выборки. Средний суглинок встречался в 17% случаев, в то время как более тяжелых по гранулометрическому составу грунтов не отмечено совсем. Такой гранулометрический состав соответствует нормативным значениями [15], а также легко объясняется свойствами и генезисом компонентов почвогрунтов, которые в большинстве своем также имеют легкий гранулометрический состав. Для pH_{KCl} также показано бимодальное распределение с двумя максимумами, соответствующими слабокислой (5.5–6.0) и нейтральной (6.5–7.0) среде. Как правило, более кислая среда отмечена для почвогрунтов с со значительной долей торфа (30–40%), поставляемого преимущественно из Тверской области, Дмитровского и Волоколамского районов. Нейтральная среда характерна для почвогрунтов со значительным количеством антропогенных субстратов (например, максимальное значение pH_{KCl} было отмечено для грунта, состоявшего на 50% из осадка станции водоподготовки (компания 27, 2017 г.). Однако отмечены и исключения из этой закономерности,

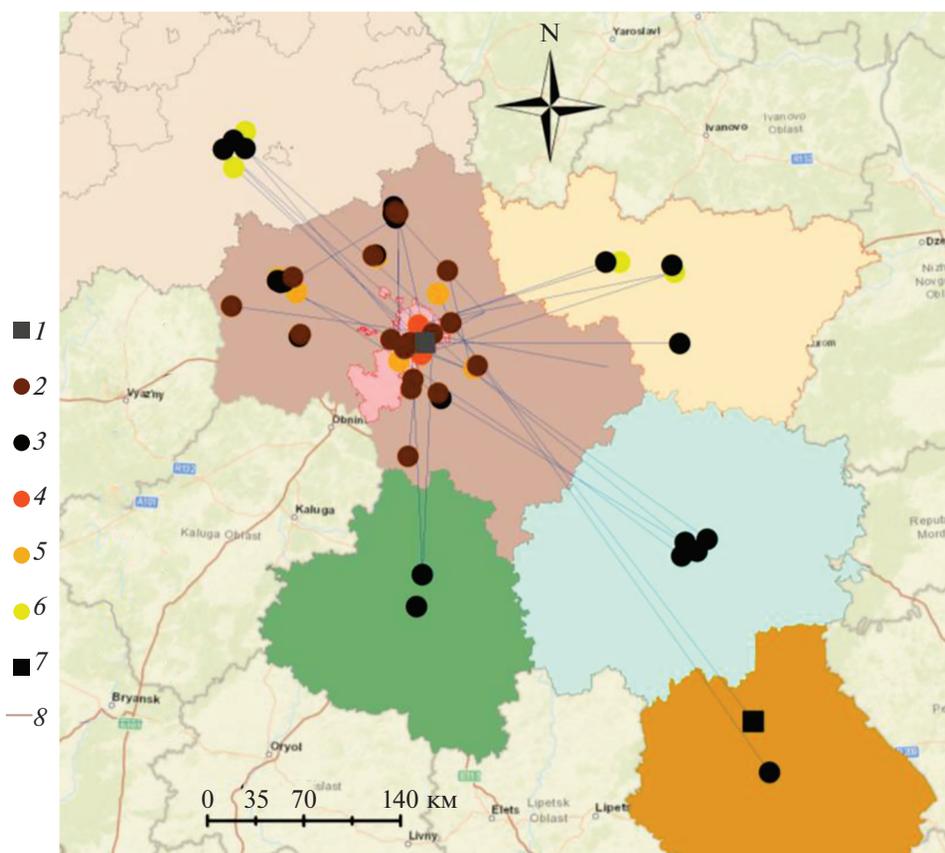


Рис. 3. Структура поставок основных компонентов почвогрунтов: 1 – ОСВ, 2 – грунт растительный, 3 – торф низинный, 4 – грунт котлованный, 5 – песок, 6 – торф верховой, 7 – чернозем, 8 – пути доставки.

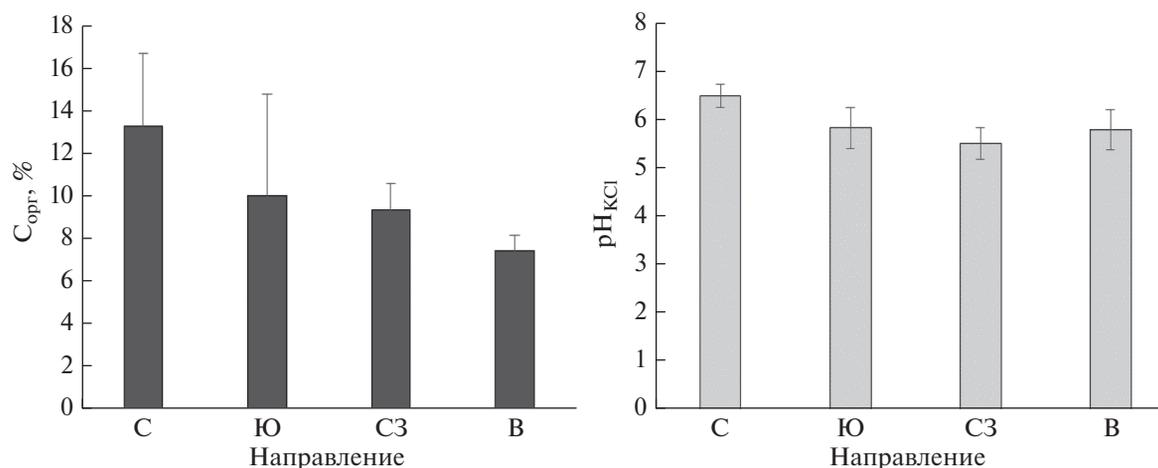


Рис. 4. Содержание $C_{\text{орг}}$ (А) и значения pH_{KCl} (Б), усредненные по основным направлениям поставок торфов как компонента почвогрунтов (С – северное направление (Дмитровский и Солнечногорский районы); Ю – южное направление (Тулская Тамбовская области); СЗ – северо-западное направление (Волоколамский и Рузский районы, Тверская область); В – восточное направление (Владимирская и Рязанская области)).

что, по-видимому, объясняется производственными причинами варьирования pH_{KCl} , связанными, с использованием торфа различной степени разложения. В среднем почвогрунты, поставляемые в 2017 г. характеризовались более легким гранулометрическим составом и более кислой средой, хотя статистически значимых различий между годами не выявлено (t -тест; $p > 0.05$) (табл. 2).

По сравнению с другими показателями содержание $C_{\text{орг}}$ отличалось высоким разнообразием – при медианном значении 7.0% коэффициент вариации составил 75% (для остальных показателей – менее 25%). Большая часть (80% от общей выборки) находилась в диапазоне от 5 до 15% $C_{\text{орг}}$. Однако для 6% случаев показаны значения $C_{\text{орг}}$ более 30%, что значительно превышает даже нормативные показатели [15]. Высокую неоднородность содержания $C_{\text{орг}}$ можно считать характерной особенностью городских почв [38, 39]. Поступление углерода с почвогрунтами, различными по свойствам и происхождению, считается одним из основных факторов пространственной неоднородности запасов углерода в городских почвах [5, 50]. Основной причиной неоднородности содержания $C_{\text{орг}}$ в самих почвогрунтах является различный состав и происхождение их компонентов.

Так, наиболее среднее содержание органического углерода показано для почвогрунтов, содержащих торф, поставляемый с северного направления (Дмитровский и Солнечногорский районы). Почвогрунты, торфяной компонент которых поставлялся с восточного направления (Владимирская и Рязанская области), содержали в среднем на 3–4% меньше органического углерода по сравнению с северным и северо-западным направлениями (рис. 4).

Прогнозирование запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса по данным свойств и объемов поставляемых почвогрунтов. Принимая во внимание, что значительная часть поверхностных горизонтов почвенных конструкций озелененных территорий Москвы формируется из ввозимых почвогрунтов, можно дать прогнозную оценку запасов углерода в этих горизонтах на основании данных объемов поставок и свойств почвогрунтов. Суммарно за два года компании-поставщики, принявшие участие в исследовании, завезли в Москву 2.7 млн м³ почвогрунтов, что при средней мощности органогенного горизонта RAT в 10 см достаточно для озеленения и благоустройства территории в 27 км². Это соответствует 28% от площади всех газонов дворовых

Таблица 2. Свойства почвогрунтов, используемых для создания почвенных конструкций в Московском мегаполисе в 2016 и 2017 гг.

Свойство	2016	2017	Нормативные значений для создания и ремонта газонов (ПП-514)
pH_{KCl}	6.2 ± 0.3	5.7 ± 0.2	5.0–7.5
$C_{\text{орг}}$, %	$7.0 \pm 1.1^*$	13.3 ± 2.2	5.8–11.6
Физическая глина, %	23.6 ± 1.1	20.3 ± 1.6	15–25

* Статистически значимые различия средних значений между годами (t -test, $p < 0.05$).

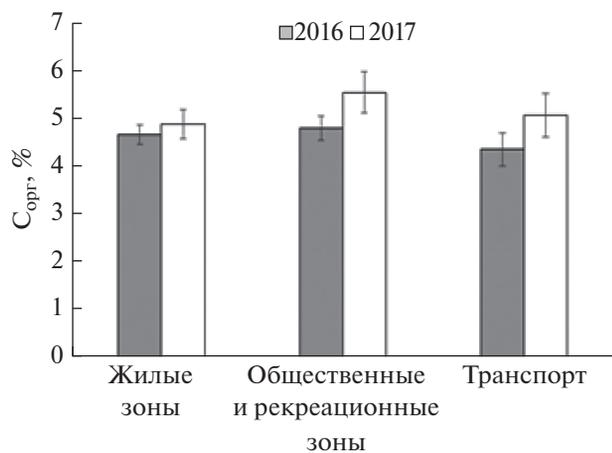


Рис. 5. Содержание $C_{\text{орг}}$ в слое 0–20 см почв различных функциональных зон г. Москва (среднее и ошибка среднего) в 2016 и 2017 гг.

территорий г. Москвы и в 1.5 раза превышает площадь газонов, находящихся на балансе ГБУ “Автомобильные дороги” [7]. Средневзвешенное содержание органического углерода, рассчитанное за два года с учетом объемов поставок и свойств грунта, составило 7.7%. Значения по годам составили 6.9% в 2016 и 8.1% в 2017. При расчетном значении плотности почвы 1.1 г/см³ запасы углерода в слое 0–10 см составят 84 т/га. Эти значения в 1.5–2 раза превышают полученные ранее оценки для Москвы [3, 53]. Что объяснимо, принимая во внимание, что предыдущие оценки учитывали все незапечатанные территории мегаполиса, а не только почвенные конструкции, где содержание органического углерода в большинстве случаев выше, чем, например, в почвах городских лесопарков.

Для оценки адекватности прогнозирования запасов углерода в почвенных конструкциях по данным объемов и свойств почвогрунтов полученные результаты были сопоставлены с результатами анализа проб, отобранных в 192 и 190 точках в 2016 и 2017 гг. соответственно, равномерно распределенных по территории города и являющихся частью программы мониторинга состояния почв Москвы. Результаты полевого обследования показали высокую пространственную неоднородность содержания $C_{\text{орг}}$ с коэффициентом вариации 60–80%. Такое варьирование в целом характерно для свойств городских почв [2, 46, 62], особенно для запасов углерода [5, 34, 46], на которые воздействует множество естественных (климат, тип растительности) и антропогенных (тип почвогрунта, технология конструирования, внесение удобрений) факторов. Средние значения различались как для административных округов (максимальные значения в центральном округе), так и для функциональных зон (рис. 5). Однако различия в основном были статистически незна-

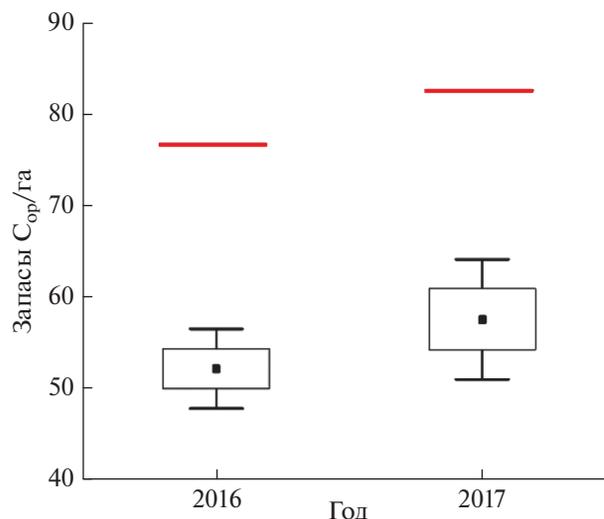


Рис. 6. Оценка удельных запасов $C_{\text{орг}}$ в слое 0–10 см почвенных конструкций Московского мегаполиса по данным полевого обследования (график Box&Whiskers отражает среднее, ошибку среднего и 95%-ный доверительный интервал) по сравнению с оценкой по данным свойств и объема поставок почвогрунтов (красные линии – средневзвешенное значение).

чимыми из-за высокого внутреннего разнообразия. Запасы органического углерода в слое 0–10 см составили 48 ± 2 и 58 ± 3 т/га в 2016 и в 2017 гг. соответственно. Полученные значения на 30–40% ниже оценок, рассчитанных на основании анализа поставок почвогрунтов (рис. 6).

Частично это можно объяснить глубиной отбора пробы (0–20 см), вследствие чего средние значения в расчетном слое 0–10 см, скорее всего, занижаются. Тем не менее, глубина 0–20 см является стандартной для мониторинга состояния почв в Москве и большинстве других городов мира (например, в Риме – 20 см, в Нью-Йорке – 6 дюймов (15.2 см) [25]) и данные о состоянии городских почв, как правило, приводятся для этой глубины. Безусловно, объем поставок почвогрунтов, сертифицируемых АНО “Московский экологический регистр” составляет не более половины от общего объема завозимых в Москву грунтов, и экстраполяция полученных данных на всю территорию города сопряжена со значительной неопределенностью в оценке. Наконец, сложно предположить, что в 2016–2017 гг. произошла полная замена поверхностного горизонта, в связи с чем насыпные горизонты многих изученных почвенных конструкций сформированы при более ранних поставках. В то же время нельзя не отметить, что в абсолютных значениях оценки, полученные по данным мониторинга и на основании расчетов, отличаются не более, чем на 25–30 т/га, что для оценок запасов углерода очень немного. Например, обзорные статьи по запасам углерода в городских почвах мира [30, 38, 39, 43] отражают

разброс в 50 т/га и более. Интересно отметить схожую динамику запасов по данным мониторинга и расчетным данным, показавшим увеличение на 10 и 14% соответственно в 2017 по сравнению с 2016 г.

Роль почвенных конструкций в формировании запасов углерода в городских почвах. Основной причиной несовпадения прогнозных и экспериментальных оценок запасов $C_{орг}$ в почвенных конструкциях является, очевидно, сложность и разноплановость процессов вовлечения органического вещества, поступающего с почвогрунтами, в цикл углерода городских почв. В короткой перспективе внесение обогащенных углеродом субстратов приводит к быстрому увеличению запасов $C_{орг}$ в верхнем горизонте. Однако этот эффект, как правило, непродолжителен из-за быстрой минерализации [26, 49]. Основным результатом станет всплеск эмиссии парниковых газов [32], а запасы углерода практически не увеличатся, а теоретически могут даже сократиться из-за прайминг-эффекта [27, 33]. В долгосрочной перспективе грамотное использование почвогрунтов с умеренным содержанием $C_{орг}$ для повышения плодородия городских почв и устойчивости газонов и зеленых насаждений к антропогенной нагрузке будет способствовать постепенному накоплению запасов углерода за счет прироста корневой биомассы и гумификации [24, 45, 57]. Таким образом, количество $C_{орг}$, поступающего с ввозимыми почвогрунтами, нельзя автоматически прибавлять к запасам углерода в почве. Скорее, его стоит рассматривать как важный фактор, который может воздействовать на процессы и накопления, и минерализации углерода в городских почвах и в зависимости от стратегии использования активизирует один из этих процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание почвенных конструкций становится неотъемлемой частью городского озеленения и благоустройства. Выбор рецептуры и характеристик почвогрунтов из большого разнообразия вариантов, доступных на рынке, во многом определяет важные экологические функции почвенных конструкций, в первую очередь накопление и устойчивость запасов углерода. Анализ поставляемых в Москву почвогрунтов и их компонентов по данным анкетирования крупных компаний-поставщиков позволил получить представление об объемах поставок и неоднородности свойств грунтов. За два года в Москву было ввезено 2.7 млн т почвогрунтов — объем, достаточный для озеленения трети всех газонов дворовых территорий города. При схожей рецептуре содержание органического углерода в почвогрунтах варьировало от 2 до 32% в зависимости от места добычи и производства компонентов почвогрунтов. Исходя из свойств

поставляемых грунтов, прогнозные оценки средне-взвешенных запасов углерода в слое 0–10 см почвенных конструкций составили 84 т/га, что сопоставимо с оценками детального полевого обследования 2016–2017 гг. Более того, для прогнозной и экспериментальной оценок показана аналогичная динамика по годам (увеличение на 10–14% в 2017 по сравнению с 2016 г.). Принимая во внимание важную роль почвогрунтов в формировании запасов углерода в городских почвенных конструкциях, анализ и регулирование структуры поставок почвогрунтов, мониторинг и нормирование их свойств является важным инструментом воздействия на экологическое состояние и функции почв города.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность аспирантам департамента ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем О.Н. Ромзайкиной и С.А. Деминой за помощь в проведении лабораторных анализов и участие в подготовке статьи. В работе использованы данные государственного экологического мониторинга ГПБУ “Мосэкомониторинг”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Анализ баланса и свойств почвогрунтов выполнен при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-30012. Анализ запасов углерода в Московском мегаполисе по данным полевых исследований проведен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-35-20052. Статья подготовлена при поддержке “Программы РУДН 5-100”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Д.А., Белова Н.К. Состояние насаждений на Бульварном кольце г. Москвы // Лесной вестник/Forestry bulletin. 2015. Т. 19. № 1. 152–161.
2. Васнев В.И., Ван Ауденховен А.П., Ромзайкина О.Н., Гаджагаева Р.А. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177–1191.
3. Васнев 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.
4. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881.
5. Водяницкий Ю.Н. Органическое вещество в городских почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 8. С. 921–931.
6. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. С. 272.
7. Департамент экономической политики и развития города Москвы. 2017. Сводный отчет о результатах проведения оценки фактического воздействия по-

- становления Правительства Москвы от 25.02.2015 № 74-ПП “О внесении изменений в постановление Правительства Москвы от 9 ноября 1999 г. № 1018, от 10 сентября 2002 г. № 743-ПП”.
8. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2012. С. 413.
 9. Закон города Москвы от 4 июля 2007 года № 31 О городских почвах (с изменениями на 20 февраля 2019 года).
 10. Курбатова А.С., Башкин В.Н., Баранникова Ю.А., Герасимова С.Г., Никифорова Е.В., Решетина Е.В., Савельева В.А., Савин Д.С., Смагин А.В., Степанов А.Л. Экологические функции городских почв. Смоленск: Маджента. 2004. С. 232.
 11. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв. Автреф. ... докт. биол. наук. М., 2010. 46 с.
 12. Махрова Т.Г., Сапелин А.Ю. Древесные интродуценты в составе насаждений ВДНХ // Лесной вестник. 2016. Т. 20(1). С. 140–146.
 13. Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Многолетняя динамика антропогенной солончеватости почв ВАО Москвы при использовании противогололедных реагентов // Почвоведение. 2017. № 1. С. 93–104.
 14. Постановление 743-ПП “Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы” от 10.09.2002 (с поправками от 17.06.2011).
 15. Постановление Правительства Москвы № 514-ПП “О повышении качества почвогрунтов в городе Москве” от 27.07.2004 (с поправками от 01.06.2018).
 16. 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.
 17. Прохоров И.С. Мониторинг состояния почв города Москвы и предложения по их рекультивации // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1. С. 61–68.
 18. Прохоров И.С., Карев С.Ю. Особенности производства почвогрунтов для озеленения и благоустройства города Москвы // Агрохимический вестник. 2012. № 3. С. 21–25.
 19. Рысин Л.П., Савельева Л.И., Рысин С.Л. Мониторинг лесов на урбанизированных территориях // Экология. 2004. № 4. С. 243–248.
 20. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2012. С. 544.
 21. Смагин А.В., Садовникова Н.Б. Создание почвоподобных конструкций // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1112–1123.
 22. Строганова М.Н., Мягкова А.Д., Прокофьева Т.В. Роль почв в городских экосистемах // Почвоведение. 1997. № 1. С. 96–101.
 23. Хайрулина Е.А., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Потенциально токсичные элементы в почвах Индустриального района г. Перми // Географический вестник. 2019. № 2(49).
 24. Acuna E., Alejandra A., Pastenes V., Villalobos G. Carbon sequestration and photosynthesis in newly established turfgrass cover in central Chile // Agronomy J. 2017. V. 109(2). P. 397–405.
 25. Ajmone-Marsan F., Biasioli M. Trace elements in soils of urban areas // Water. Air. Soil Pollut. 2010. V. 213. P. 121–143.
 26. Allaire S.E., Dufour-L'Arrivée C., Lafond J.A., Lalan-cette R., Brodeur J. Carbon dioxide emissions by urban turfgrass areas. Canadian // J. Soil Science. 2008. V. 88(4). P. 529–532.
 27. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // Biol. Fertil. Soils. 2008. V. 45. P. 115–131.
 28. Brose D.A., Hundal L.S., Oladeji O.O., Kumar K., Granato T.C., Cox A., Abedin Z. Greening a steel mill slag brownfield with biosolids and sediments: A case study // J. Environ. 2016. V. 45. P. 53–61.
 29. Burghardt W. Soils in urban and industrial environments // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 1994. V. 157(3). P. 205–214.
 30. Cambou A., Shaw R.K., Huot H., Vidal-Beaudet L., Hunaault G., Cannavo P., Nold F., Schwartz C. Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris // Sci. Total Environ. 2018. V. 644. P. 452–464.
 31. Cekstere G., Nikodemus O., Osvalde A. Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga // Latvia Urban Forestry and Urban Greening. 2008. V. 7(3). P. 207–217.
 32. Decina M., Hutyra L.R., Gatley 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.
 33. Ditterich F., Poll C., Pronk G.J., Heister K., Chandran A., Rennert T., Kögel-Knabner I., Kandeler E. Succession of soil microbial communities and enzyme activities in artificial soils // Pedobiologia. 2016. V. 59. P. 93–104.
 34. Dmitrakova J., Abakumov E. Dynamics of soil organic carbon of reclaimed lands and the related ecological risks to the additional CO₂ emission // Springer Geography. 2019. P. 97–105.
 35. Fourvel G., Vidal-Beaudet L., Le Bocq A., Brochier V., Théry F., Landry D., Kumarasamy T., Cannavo P. Early structural stability of fine dam sediment in soil construction // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. P. 2647–2663.
 36. Kumar K., Hundal L.S. Soil in the city: Sustainably improving urban soils // J. Environ. Quality. 2016. V. 45. P. 2–8.
 37. Levin M.J., Kim K.-H.J., Morel J.L., Burghardt W., Charzynski P., Shaw R.K. (eds). Soils within Cities. Global approaches to their sustainable management – composition, properties, and functions of soils of the urban environment. Schweizerbart Science Publ., 2017. P. 159–168.
 38. Lorenz K., Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils // Environ. Int. 2009. V. 35. P. 1–8.
 39. Lorenz K., Lal R. Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems // Carbon Management. 2015. V. 6. P. 35–50.
 40. McKinney M.L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. // Biological Conservation. 2006. V. 127. P. 247–260.
 41. Morel J.L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS) // J. Soils Sediments. 2015. V. 15(8). P. 1659–1666.
 42. Prokofeva T.V., Rozanova M.S., Kiriushin A.V. The technosols on 60–70 year-old technogenic deposits of the Lomonosov Moscow state university campus // Springer Geography. 2019. P. 31–41.

43. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Nowak D.J. Carbon storage by urban soils in the United States // *J. Environ. Quality*. 2006. V. 35. P. 566–75.
44. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Dombos M. et al. A Global Comparison of Surface Soil Characteristics Across Five Cities // *Soil Science*. 2015. V. 180. P. 136–145.
45. Qian Y.L., Follett R.F. Assessing soil carbon sequestration in turfgrass systems using long-term soil testing data // *Agronomy J.* 2002. V. 94. P. 30–935.
46. Raciti S., Groffman P., Jenkins J., Pouyat R., Fahey T., Pickett S., Cadenasso M. Accumulation of Carbon and Nitrogen in Residential Soils with Different Land-Use Histories // *Ecosystems*. 2011. V. 14. P. 287–297.
47. Rakshit A. (ed.). Adaptive soil management: from theory to practices. Springer, 2017. P. 571.
48. 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.
49. Townsend-Small A., Czimeczik C.I. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37(2). P. L02707.
50. 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(6). P. 1607–1622.
51. Vasenev V.I., Morel J.L., Nehls T., Shaw R.K., Kim K.J., Hajiaghayeva R.A. Preface // *J. Soils Sediments*. 2019. V. 19(8). P. 3123–3126.
52. Vasenev V.I., Smagin A.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Gavrilenko E.G., Prokofeva T.V., Patlseva A., Stoorvogel J.J., Gosse D.D., Valentini R. Urban Soil's Functions: Monitoring Assessment and Management. Singapore: Springer, 2017. P. 359–409.
53. Vasenev V.I., Stoorvogel J.J., Vasenev I.I., Valentini R. How to map soil organic carbon stocks in highly urbanized regions? // *Geoderma*. 2014. V. 226–227. P. 103–115.
54. Vidal-Beaudet L., Schwartz C., Sere G. et al. Using wastes for fertile urban soil construction – The French Research Project SITERRE, 2017.
55. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobley E., Lang B., von Lützwow M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. 2019. V. 333. P. 149–162.
56. Yang J.-L., Zhang G.-L. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils. A review // *Soil Sci. Plant Nutrition*. 2016. V. 61. P. 30–46.
57. Zirkle G., Lal R., Augustin B. Modeling carbon sequestration in home lawns // *HortScience*. 2011. V. 46. P. 808–814.

Analysis of Imported Soils and for Predicting Carbon Stocks in the Soil Structures of Moscow Metropolis

**I. P. Brianskaia^{1,*}, V. I. Vasenev¹, R. Brykova¹, V. N. Markelova², N. V. Ushakova²,
D. D. Gosse³, E. V. Gavrilenko⁴, and E. V. Blagodatskaya⁵**

¹*Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia*

²*Moscow Environmental Register, Moscow, 119019 Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119191 Russia*

⁴*Department of Nature Management and Environmental Protection of the City of Moscow, Moscow, 119019 Russia*

⁵*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Halle, Germany*

*e-mail: inna.bryanskaya@bk.ru

An increase in the area of landscaping in modern cities makes it particularly important to study the properties and functions of soil structures. Carbon sequestration is one of the main ecological functions of soils, which is actively studied for the soils of natural and agroecosystems, while little is known for urban and human-constructed soils. Carbon stocks in urban soils and, in particular, in soil structures are formed under the dominant influence of anthropogenic factors and are characterized by the high and difficult to predict heterogeneity. One of the main factors that determine the carbon pools of soil structures in Moscow metropolis is the volume and properties of imported soils. In this study, the market of soils supplied to Moscow for landscaping purposes in 2016 and 2017 is considered on the basis of special surveys of supplier companies; sources and volumes of supplied soils and their components are determined, and recipes for their preparation and properties are analyzed. Based on the results obtained, the predicted average organic carbon stock in the upper 10 cm of urban soils is 84 t/ha. A comparison of the obtained estimates with the results of a field survey of a representative sample of Moscow soil monitoring points ($n > 190$) shows that the predicted value is overestimated by 1.5–2.0 times. At the same time, a relatively small absolute excess (by 30–40 t/ha) and similar dynamics of calculated and studied reserves over the years (an increase by 10–14% in 2017 compared to 2016) confirm the assumption of the determining role of imported soils in the formation of carbon reserves of Moscow's soil structures and emphasize the importance of monitoring and rationing the properties of imported soils as the basis for sustainable development of urban ecosystems.

Keywords: urban and anthropogenic soils, soil ecological functions, ecosystem services, constructozems, sustainable development of the city