МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Васенев Вячеслав Иванович

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ГОРОДОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

1.5.19 — Почвоведение (биологические науки)
1.5.15 — Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Москва, 2024

Диссертация подготовлена в департаменте ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем Аграрно-технологического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный консультант	*Смагин Андрей Валентинович — доктор биологических наук, профессор*
Официальные оппоненты	*Герасимова Мария Иннокентиевна — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета ФГБОУ ВО Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова*
	Воробейчик Евгений Леонидович — доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории экотоксикологии популяций и сообществ ФГБУН Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН
	Минкина Татьяна Михайловна — доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов ФГБОУ ВО Южный федеральный университет

Защита диссертации состоится 28 мая 2024 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП–1, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ, факультет почвоведения, ауд. М-2.

E-mail: paramonovata@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: *https://dissovet.msu.ru/dissertation/2851*

Автореферат разослан 26 марта 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук Т.А. Парамонова

Актуальность проблемы

Урбанизация приводит к радикальным и необратимым изменениям потоков вещества и энергии, формированию урбоэкосистем, принципиально отличающихся от естественных (Pickett et al., 2011; The United Nations…, 2018). Городские почвы — ключевой компонент урбоэкосистемы, формирующийся при доминирующем воздействии антропогенных факторов. Городской остров тепла, техногенные отложения, интродуцированные растения определяют условия формирования городских почв, а почвенное конструирование, загрязнение, засоление и переуплотнение изменяют их свойства и экологические функции. Сочетания прямых и косвенных факторов антропогенного воздействия проявляются в уникальном разнообразии городских почв (Прокофьева и Герасимова, 2018), а возможность адаптации к этим воздействиям определяет устойчивость их экологического функционирования (Lehman and Stahr, 2010; Терехова и др., 2014).

Многие традиционные исследования экологического состояния почв городов акцентировали внимание на факторах их деградации и сопряженных рисках для здоровья населения (Строганова и др., 1997; 2003; Poggio, Vrscaj, 2009; Wei, Yang, 2010). В результате городские почвы можно считать наиболее недооцененным экологическим ресурсом, что парадоксально сочетается с высокой экономической стоимостью земли в городе (Morel et al., 2015; Макаров и др., 2021). Современные концепции устойчивого развития городов уделяют все больше внимания экологическим функциям и экосистемным сервисам (услугам) городской зеленой инфраструктуры: зеленых насаждений и почв (Bretzel et al., 2016; Guilland et al., 2018; Teixeira da Silva et al., 2018; Цветнов и др., 2019). Депонирование углерода – важнейшая экологическая функция почв, определяющая их регулирующую роль в экосистеме и оказывающая непосредственное воздействие на глобальные климатические изменения (Добровольский, Никитин, 1990; Haines-Young, Potschin, 2013). Оценка потоков и запасов углерода в почвах приобретает особую актуальность в связи с развитием принципов углеродной нейтральности, нацеленных на компенсацию

эмиссии парниковых газов за счет депонирования углерода в биомассе и почвах (Указ Президента РФ № 76 от 08.02.21; № 296-ФЗ от 02.07.21; Abakumov, Polyakov, 2021; Карелин и др., 2021).

По сравнению с почвами естественных и агроэкосистем, поглощение углерода и эмиссия парниковых газов почвами городов изучены недостаточно. Локальные исследования (Прокофьева и др., 2008; Liu et al., 2018) и литературные обзоры (Lorenz and Lal, 2008, 2015; Luo et al., 2012; Водяницкий, 2015) показывают, что запасы углерода в городских почвах могут быть сопоставимы с естественными аналогами и даже превышать их. В то же время многие работы свидетельствуют об интенсивной минерализации углерода органических соединений городских почв, приводящей к высокой эмиссии CO_2 (Kaye et al., 2005; Можарова и др., 2018; Goncharova et al., 2019; Karelin et al., 2021). Показана высокая неоднородность и динамичность потоков и запасов углерода в почвах городов (Weissert et al., 2016), однако факторы этой пространственно-временной изменчивости остаются малоизученными.

Цель работы – оценить экологические факторы, определяющие закономерности пространственной неоднородности и временной динамики запасов углерода в почвах городов Европейской территории России, условия и механизмы их накопления и устойчивости.

Задачи исследования:

1. Анализ механизмов формирования запасов углерода в городских почвах и изучение факторов, определяющих их пространственную неоднородность на локальном, региональном и глобальном уровнях пространственной организации почвенного покрова.
2. Анализ разнообразия почвогрунтов и их компонентов, используемых для задач почвенного конструирования, и оценка их влияния на формирование и устойчивость запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса с учетом динамики гидротермических условий и контрастной антропогенной нагрузки.

3. Сравнительный анализ запасов углерода и эмиссии CO_2 почв различных функциональных зонах городов Москва и Курск.

4. Моделирование влияния мезоклиматических аномалий на пространственно-временную изменчивость эмиссии CO_2 и устойчивость углерода органических соединений в почвах Московского мегаполиса.

5. Функционально-экологическая оценка запасов углерода в почвах Московского региона и прогнозирование их устойчивости при разных сценариях урбанизации с использованием адаптированных методов цифровой почвенной картографии, пространственного анализа и моделирования.

6. Сравнительно-географическая оценка запасов углерода и эмиссии CO_2 в почвах городов различных биоклиматических зон Европейской части России и анализ факторов их пространственной неоднородности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования были различные типы (подтипы) городских почв и техногенных почвоподобных образований (ТПО): урбиквазиземы, конструктоземы и реплантоземы г. Москва (полевые и вегетационные эксперименты), урбиквазиземы и урби-стратифицированные дерново-подзолистые почвы и черноземы г. Москва и г. Курск (многолетние мониторинговые исследования), а также различные типы (подтипы) городских почв объектов зеленой инфраструктуры и соответствующие фоновые почвы различных биоклиматических зон Европейской территории России. Предмет исследования – природные и антропогенные факторы пространственно-временной изменчивости запасов углерода в городских почвах.

Методология и методы исследования. Методологическую основу составили обобщения знаний в сфере городского почвообразования (Строганова и др., 1997; Герасимова и др., 2003; Levin et al., 2017; Прокофьева и Герасимова, 2018), экологической оценки и нормирования (Яковлев и др., 2009; Шоба и др., 2013; Терехова и др., 2014; Макаров и др., 2021), экологических функций и экосистемных услуг (Смагин и др., 2005; Morel et al., 2014, 2023). Методы исследования включали лабораторные и полевые вегетационные эксперименты,

мониторинг на стационарах, полевое обследование более 500 локаций с дальнейшим анализом образцов в аккредитованной лаборатории, статистической (в том числе, и геостатистической) обработкой данных, пространственным анализом и моделированием.

Научная новизна. Впервые на основании комплексного иерархического подхода к изучению городских почв на различных пространственных уровнях – образцов почвогрунтов и их компонентов, почв и почвенных конструкций под разными вариантами растительности (~10 м^2), функциональных зон (~ 500 м^2) и отдельных административных округов и городов (от 3 до 2500 км^2), — дана оценка природных и антропогенных факторов, определяющих пространственно-временную изменчивость потоков и запасов углерода почв городов Европейской территории России. Впервые для Московского мегаполиса дана количественная оценка поступления с поставками почвогрунтов углерода органических соединений и показана его низкая устойчивость к биодеструкции в условиях городского острова тепла. Впервые выполнен анализ пространственно-временной неоднородности запасов углерода и эмиссии CO_2 в почвах городов различных биоклиматических зон и подзон (тундра, северная тайга, южная тайга, смешанные и широколиственные леса, лесостепь и степь), проведенный на основе единой синхронизированной методики, который позволил выявить и научно обосновать механизмы формирования запасов углерода городских почв с учетом неоднородности природных и антропогенных факторов**.**

Научная и практическая значимость. Предложены новые подходы к экологическому мониторингу, оценке и рациональному управлению почвами городов с учетом их вклада в формирование углеродного баланса. Показано, что для не менее 20% почвогрунтов, используемых для почвенного конструирования в Москве, содержание органического вещества превышают не только фоновые, но и нормативные значения (ПП-514), а их использование сопряжено с повышенной эмиссией CO_2 в результате быстрой биодеструкции. На основе нового метода, объединившего подходы мезоклиматического моделирования и цифровой почвенной картографии, показано, что влияние городского острова

тепла увеличивает интенсивность биодеструкции углерода органических соединений почвенных конструкций Московского мегаполиса на 10-15%, что необходимо учитывать при проектировании и содержании объектов городской зеленой инфраструктуры с учетом достижения целей углеродной нейтральности. Для городов Европейской территории России построены картосхемы запасов углерода в почвах с учетом природных и антропогенных факторов неоднородности, которые могут служить основой для управления почвенными ресурсами. Для Московского региона дан прогноз изменений запасов углерода при разных сценариях развития урбанизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сочетание высокой скорости накопления и интенсивной биодеструкции углерода органических соединений верхних горизонтов городских почв и почвенных конструкций определяет специфику его аккумуляции: при средних значениях, часто превышающих фоновые, характерна низкая устойчивость, высокая динамичность и пространственная неоднородность.

2. Пространственно-временная изменчивость запасов углерода верхних горизонтов городских почв преимущественно определяется их локальными мезоклиматическими условиями и последействием внесения органических субстратов, проявляя признаки межзональной конвергенции почв урбоэкосистем, в то время как запасы углерода их нижних горизонтов, как правило, сохраняют зонально-провинциальные особенности природных почв и признаки этапов предыдущего землепользования.

3. Спецификой урбоэкосистем следует считать мощные техногенные потоки углерода и антропогенно-инициированную акселерацию динамики его запасов в почвенном покрове. Созданные с доминирующим использованием торфа и смесей на его основе верхние горизонты почвенных конструкций подвергаются быстрой деструкции органических веществ из-за преобладания несвойственных торфу аэробных условий, усиливаемых эффектом городского острова тепла.

4. Соотношение скорости микробного дыхания верхних горизонтов городских почв и запаса в них углерода – информативный показатель устойчивости

углерода органических соединений почв урбоэкосистем, которая может быть выражена через константу биодеструкции и время полуразложения.

5. Доминирование в объектах городского озеленения газонов на торфо-песчаных почвенных конструкциях может приводить к отрицательному углеродному балансу урбоэкосистем, что необходимо учитывать при проектировании и содержании объектов городской зеленой инфраструктуры.

Личный вклад автора заключается в выборе направления исследования, планировании и проведении полевых и лабораторных экспериментов и мониторинговых исследований, проведении измерений на экспериментальных площадках в Москве (регулярно) и других городах (периодически), организации и участии в экспедициях в Московскую, Мурманскую, Курскую и Ростовскую области для полевого исследования городских почв, проведении полевых описаний и отборе образцов, обработке, выполнении статистического анализа данных и пространственного моделирования, систематизации и обобщении результатов, подготовке публикаций. В совместных публикациях вклад автора составлял от 40 до 80%, данные по вкладу автора в каждую публикацию представлены в списке публикаций.

Публикации по теме диссертационной работы. По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ автора, из них 28 — в журналах, входящих в списки Web of Science, Scopus и RSCI.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает введение, обзор литературы (глава 1), описание объектов и методов (глава 2), обсуждение экспериментальных результатов (главы 3-7), заключение, выводы и список литературы. Материалы диссертации изложены на 391 странице, содержат 40 таблиц и 147 рисунков. Список литературы содержит 424 наименования, в том числе 319 англоязычных. Количество томов диссертации – 2.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, были представлены на 37 российских и международных научно-технических мероприятиях, в том числе конгрессах международного союза почвоведов (IUSS) (ДжеДжу, 2014; Рио-де-Жанейро, 2018); съездах Российского общества

почвоведов им. В.В. Докучаева (Петрозаводск, 2014; Белгород, 2018; Сыктывкар, 2022), конференциях рабочей группы IUSS по изучению городских и техногенных почв SUITMA (Марракеш, 2011; Торунь, 2013; Мехико, 2015; Москва, 2017; Сеул, 2019), конференции Pedometrics (Вагенинген, 2017); Генеральной ассамблее Европейского общества наук о Земле (Вена, 2012-2016; 2019-2021), конгрессе Американского геофизического общества (Сан-Франциско, 2012); конференции по почвенной секвестрации углерода (Рейкьявик, 2013); симпозиуме FAO по органическому веществу почв (Рим, 2017), конференциях Smart and Sustainable Cities (Москва, 2018, 2020).

Благодарности. Диссертация включает материалы исследований, которые проводились на протяжении десяти лет в рамках многих проектов, в различных регионах и масштабах. Обработать, организовать и осмыслить полученные данные удалось благодаря постоянному вниманию научного консультанта – Смагина А.В., за что автор ему бесконечно признателен. Автор благодарит и всегда с большим уважением и теплотой помнит своих учителей и наставников – Ананьеву Н.Д., Васенева И.И., Макарова О.А., Яковлева А.С., Стурфогеля Е., Валентини Р., Кузякова Я.В., Прокофьеву Т.В., Лееманса Р., благодаря которым он состоялся в науке и в жизни. Автор благодарен Аграрно-технологическому институту РУДН и его директорам Довлетяровой Э.А. и Плющикову В.Г., которые создали ему все условия, необходимые для комфортной работы и профессионального роста. Работа не смогла бы состояться без самоотверженного труда сотрудников LAMP и Smart Urban Nature, коллег, соратников и друзей, аспирантов и студентов, обеспечивающих бесперебойное поступление мониторинговых данных, участвовавших в полевых выездах и экспедициях, лабораторных анализах и экспериментах. Самую большую благодарность, признательность и любовь автор выражает своей семье – родителям, жене и дочкам за вдохновение, постоянную поддержку, веру, понимание и терпение. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 19-29-05187, 18-35-20052, 15-54-53117, 15-34-70003 и 14-04-20070) и РНФ (проекты № 19-77-300-12 и 17-77-20046).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Запасы и потоки углерода в городских почвах: от локальных наблюдений к глобальным оценкам *(обзор литературы)*

Глава состоит из пяти разделов, которые раскрывают существующие фундаментальные представления о городских почвах, их экологических функциях, экосистемных услугах и роли в балансе углерода наземных экосистем, а также обобщают результаты исследований потоков и запасов углерода в городских почвах и почвенных конструкциях. В первом разделе на основе анализа фундаментальных исследований (Baldocchi et al., 2001; Reichstein et al., 2005; Кудеяров и др., 1995; 2007; Chapin et al., 2006; Заварзин и др., 2007; Карелин, Замолодчиков, 2008; Huang et al., 2020; Lei et al., 2021), международных проектов (Global Carbon Project, Global Carbon Atlas, FLUXNET, ICOS) и межправительственных соглашений (Киотский протокол, Парижские соглашения, доклады МГЭИК) описаны процессы и природно-антропогенные факторы, влияющие на секвестрацию углерода в почве – ключевую экологическую функцию почв в контексте климатических изменений и целей углеродной нейтральности (MA, 2003; Blum, 2005; Добровольский и др., 2012; TEEB, 2010; Adhikari, Hartemink, 2016).

Второй раздел посвящен влиянию урбанизации на формирование и функционирование почв (Строганова и др., 1997; Герасимова и др., 2003; Rossiter, 2007; Charzynski et al., 2013; Прокофьева и др., 2011; 2014; Sharma et al, 2016; UN, 2018; Прокофьева и Герасимова, 2018). На основании обзора источников за последние тридцать лет (с 1991 по 2021) показана постепенная смена приоритетов в исследованиях городских почв от более традиционных оценок негативного антропогенного воздействия и сопряженной деградации почв и земель (Burghardt, 1994; Лысак, 2000; Li et al., 2001; Курбатова и др., 2004) к современным концепциям устойчивого развития, уделяющим особое внимание экологическим функциям и экосистемным услугам, которые городские почвы

могут обеспечить (Raciti et al., 2011; Шоба и др., 2013; Morel et al., 2015; Васенев и др., 2018).

В третьем разделе обобщены экспериментальные данные и модельные оценки запасов и потоков углерода в городских почвах, описываются основные методические подходы и существующие неопределенности. Выделены следующие направления и уровни исследования: 1) мониторинговые исследования на экспериментальных площадках (Lorenz et al., 2006; Bae and Ryu, 2015; Weissert et al., 2016; Смагин и др., 2016; Goncharova et al., 2019; Смагин и Карелин, 2021); 2) полевое обследование, оценка и картографирование (Minasny et al., 2013; Апарин и Сухачева, 2014; Кошелева и др., 2015; Cambou et al., 2018; Горбов, 2018; Richter et al., 2020); 3) пространственный анализ, моделирование, анализ сценариев (Selhorst and Lal, 2012; 2013; Villa et al., 2013, Köchy ye al., 2015; Martynenko et al., 2019; Dvornikov et al., 2021). Показано, что знания о потоках и запасах углерода в городских почвах плохо систематизированы и фрагментарны. Региональные и глобальные базы данных и модели игнорируют запасы углерода в городских почвах (Schaldach and Alcamo, 2007, Schulp and Verburg, 2009), либо оценивают их с высокой степенью неопределенности (Nilsson et al., 2002; Кудеяров и др., 2007; Minasny et al., 2017), что объясняется как разной обеспеченностью стран и регионов экспериментальными данными (например, недостаток данных для России в сравнении с Европой, США и Китаем (Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Stoorvogel and Mulder, 2021)), так и методическими особенностями изучения городских почвах во времени и в пространстве (Stockmann et al., 2013; Красильников и Таргульян, 2019).

Четвертый раздел посвящен анализу природных и антропогенных факторов, определяющих пространственно-временную изменчивость запасов углерода в городских почвах. В нем систематизированы и обобщены результаты исследований прямого (через запечатывание, загрязнение, засоление, снятие и перемещение плодородного слоя, почвенное конструирование) и косвенного (через изменение факторов почвообразования) антропогенного воздействия на процессы аккумуляции углерода в почвах городов и их устойчивость

(Строганова и др., 1997; Kaye et al., 2005; Elvidge et al., 2007; Raciti et al., 2012; Zhao et al., 2013; Wei et al, 2014; Piotrowska-Długosz and Charzyński, 2015; Prokof'eva et al., 2015, 2017; Rillig et al., 2021). Пятый раздел обобщает существующие подходы, ограничения и перспективы применения результатов анализа баланса углерода городских почв в проектах устойчивого развития городской среды в контексте целей углеродной нейтральности. Наряду с обзором и систематизацией имеющейся информации о запасах углерода в городских почвах, анализ литературы позволил выявить существующие пробелы в знаниях: 1) наиболее исследованы запасы углерода органических соединений в поверхностном горизонте, в то время как нижние горизонты и другие формы углерода (карбонатов, микробной биомассы, пирогенная) остаются малоизученными; 2) исследований городов умеренного климата на порядок больше по сравнению с аридными условиями или Арктической зоной; 3) большинство работ представляют собой оценки запасов углерода в почвах города в сравнении с естественными аналогами без учета возраста и истории землепользования. Отмечен недостаток сравнительных исследований запасов углерода в городских почвах, расположенных в различных природных зонах и климатических условиях. Существующие публикации (например, Pouyat et al., 2006; 2015) обобщают данные, полученные различными методами в разное время, но не приводят пространственно дифференцированных климатических данных и поэтому не позволяют проанализировать регионально-типологические закономерности механизмов накопления углерода с учетом антропогенных воздействий и климатических условий. Выявлению таких регионально-типологических закономерностей на основании комплексного анализа воздействия природных и антропогенных факторов на пространственно-временную изменчивость запасов углерода городских почв посвящена представляемая работа.

ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований

Запасы углерода в городских почвах и их устойчивость к биодеструкции

Углерод в городских почвах содержится в различных формах: органических соединениях ($C_{орг}$), карбонатах ($C_{карб}$), микробной биомассе ($C_{мик}$), пирогенной форме («черный» углерод, $C_{ч}$). Основное внимание в работе уделялось $C_{орг}$ (определение для почв по ГОСТ 26213-91, для почвогрунтов с высокой долей торфа - ГОСТ 27753.10-88). Для большинства объектов определяли $C_{мик}$ (метод субстрат-индуцированного дыхания: Anderson and Domsh, 1986; Ананьева и др., 2011) и оценивали его долю в общем содержании углерода. Определение $C_{карб}$ (метод Шейблера) и его доли в общих запасах углерода проводили в рамках сравнительно-географической оценки в зональном ряду почв городов Европейской части России, а $C_{ч}$ рассматривали только на глобальном уровне в обзоре литературы. Для отдельных задач изучали общий углерод ($C_{общ}$) (высокотемпературное каталитическое сжигание на CN анализаторе) без разделения на фракции и формы.

Устойчивость запасов углерода к биодеструкции оценивали через константу биодеструкции (k), время полуразложения ($T_{0.5}$) и оборачиваемости ($T_{0.95}$). Параметры рассчитывали по отношению микробной продукции CO_2 (микробного дыхания, МД) к содержанию/ запасам углерода. В лабораторных условиях микробное (базальное) дыхание определяли после предынкубации образцов в соответствии с ISO 16072:2002. В полевых условиях микробное дыхание оценивали как часть от общего почвенного дыхания на основании полевого разделения (сравнение функциональных зон в гг. Москва и Курск, Саржанов и др., 2015) или расчетных коэффициентов (Hanson, 2000; Kuzyakov, 2006). Показатель $T_{0.5}$ выражали в годах и интерпретировали как период микробной деструкции половины содержания / запасов органического вещества в образце почвогрунта или фиксированном слое почвы с учетом гидротермических условий, но без учета поступления углерода извне (подробная методика: Smagin et al., 2018).

Анализ глобальных закономерностей запасов углерода в городских почвах (глава 3) провели на основании обзора 1617 статей, содержащих данные для 116 городов мира. В итоговую базу данных вошли значения запасов $C_{орг}$, $C_{карб}$ и $C_{ч}$, другие почвенные свойства (pH, $N_{общ}$, C/N), параметры природных и антропогенных факторов. В качестве естественного фона для сравнения использовали значения, полученные по гармонизированной карте почв мира (HWSD, FAO, 1995) и базе ISRIC-WoSIS (Batjes, 2014) для зонального типа почв в радиусе 10 км от границ изучаемого населенного пункта. На основе полученной базы были проанализированы факторы, определяющие неоднородность запасов углерода внутри города, между городами, а также вдоль климатического градиента.

Изучение устойчивости содержания и запасов углерода органических соединений в почвенных конструкциях, почвогрунтах и компонентах (глава 4)

Разнообразие свойств почвогрунтов и их компонентов изучали по данным анкетирования крупных поставщиков (объем, рецептура) и лабораторных анализов представительных образцов (содержание $C_{орг}$, гранулометрический состав, pH_{KCl}). Для Московского региона более детально были изучены 10 наиболее распространенных компонентов, 10 вариантов почвогрунтов на основе этих компонентов и дерново-подзол (Umbric Podzol, Серебряный бор, 0-20 см) в качестве фона, репрезентативного для значительной территории г. Москва. Анализировали основные химические (pH_{H2O}, pH_{KCl}, $C_{общ}$, $N_{общ}$, P, K), микробиологические ($C_{мик}$, МД, qCO_2=МД/$C_{мик}$) и гидрофизические (основная гидрофизическая характеристика, ОГХ; влажность завядания, ВЗ; наименьшая влагоемкость, НВ; полная влагоемкость, ПВ) свойства. Параметры устойчивости (k, $T_{0.5}$) для двух компонентов и четырех вариантов почвогрунтов оценивали при стандартных (22ºС, НВ) и контрастных (10, 22, 30 и 40 ºС; ВЗ, НВ и ПВ) гидротермических условиях.

Для одного варианта почвогрунта были проведены 8-месячные вегетационные эксперименты с посевом газонных трав, позволившие оценить потоки и запасы углерода, в том числе при воздействии дозированной

антропогенной нагрузки. Для этого потенциально токсичные металлы (смесь солей Zn, Cd, Pb, Cr, Ni и Cu, концентрации от 6.5 мг $кг^{-1}$ для Cd до 75 мг $кг^{-1}$ для Zn) и соль (NaCl, 30 и 90 ммоль $л^{-1}$) вносили через 4 месяца после создания почвенных конструкций. Наблюдали изменение прироста биомассы, почвенного и экосистемного дыхания и микробиологической активности. Динамику потоков и запасов углерода в почвенных конструкциях в реальных условиях города наблюдали в рамках мониторинговых исследований на стационарных площадках (кампус РГАУ-МСХА, Москва). Изучено влияние технологии конструирования, типа почвогрунта (6 вариантов) и мощности органогенного горизонта (3 варианта) на изменение запасов углерода в почве и растительной биомассе. Наблюдение за динамикой наземной и корневой биомассы (укосы 1–4 раза в месяц, отбор корней – 1 раз в год), дыханием почвы и растительности (портативные газоанализаторы Li-6400 и PPS EGM5 с темной и прозрачной камерами) позволили оценить почвенную эмиссию CO_2 и чистый экосистемный обмен (ЧЭО), который определяли двумя способами: напрямую (суммарный поток с поверхности почвы с растительностью в прозрачной камере в момент времени) и косвенно (по разнице прироста наземной и корневой биомассы и микробной эмиссии CO_2 за сезон).

Сравнительный анализ запасов углерода и эмиссии CO_2 в городских почвах различных функциональных зон Москвы и Курска (глава 5)

Для двух городов Европейской России – Москвы (южно-таежная подзона, наблюдения 2012–2014 и 2019–2020 гг.) и Курска (лесостепная подзона, наблюдения 2014–2020 гг. – были рассмотрены рекреационная, селитебная и промышленная/ транспортная зоны в сравнении с ненарушенным фоном (12 участков по 10 площадок на каждом, описание приведено в табл. 2 диссертации). Для каждой зоны были проанализированы запасы $C_{орг}$, значения $C_{мик}$ и индикаторы микробной активности (МД, qCO_2, $C_{мик}/C_{орг}$) с учетом их профильного распределения. Суточную, сезонную и многолетнюю динамику эмиссии CO_2 наблюдали с использованием портативных ИК газоанализаторов Li-820 (LiCor, США) и EGM5 (PPS, США) с параллельным измерением

температуры воздуха и почвы (CheckTemp, Hanna, Германия) и влажности почвы (SM-300, DeltaT, Великобритания). Разделение микробного и корневого компонентов дыхания проводили в полевых условиях по методу исключения корней (методика: Sarzhanov et al., 2015 - Курск и Vasenev et al., 2018 - Москва).

Пространственный анализ запасов углерода в почвах г. Москва и Московской области (глава 6) проводили для представительной выборки почв (n=242; случайно-стратифицированный отбор), включая слои 0-10, 10-30 и 30-50 см и профиль до 400 см для объекта в историческом центре. Для анализа пространственной неоднородности и картографирования запасов углерода использовали подходы цифровой почвенной картографии (ЦПК), адаптированные для городских условий путем добавления в модель наряду с традиционными факторами / предикторами (рельеф – DEM SRTM; температура – мезоклиматическая модель COSMO-CLM; растительность – Sentinel-2A MSI) специфичных: запечатанность; Евклидово расстояние до дорог (данные Open Street Map, OSM и Sentinel-2A MSI); возраст застройки (data.nextgis.com/ru/moredata/), функциональное зонирование – OSM; тип зеленых насаждений – Sentinel-2A MSI). Взаимосвязь между запасами углерода и факторами/ предикторами аппроксимировали обобщенной моделью регрессии (GLM). Значимость факторов в полной модели проверяли по t-критерию и изменению R^2_{adj}, незначимые ($p>0,05$) факторы исключали. В результате были получены карты запасов углерода с разрешением 30 м и выявлены факторы, определившие их пространственное распределение.

Оценку изменений запасов углерода в почвах в результате запечатывания территории Новой Москвы проводили на основе разработанных карт запечатанности в 1970 г., 1990 г. (оцифровка топографических карт) и 2020 г. (данные OSM и дистанционного зондирования) с разделением на дороги разных категорий и застройку и усредненных запасов углерода естественных почв в 1970 г., экстраполированных по оцифрованной карте почв Московской области (Почвы Московской области, 2002). Мощность слоя, снятого при дорожном строительстве, определяли по ГОСТ 17.5.3.06-85.

Моделирование влияния эффекта городского острова тепла на запасы углерода и микробное дыхание почв Московского мегаполиса проводили в два этапа: 1) регрессионный анализ отклика МД почв г. Москва (0-10 см, n = 140; pH_{H2O} от 4,5 до 8,5; $C_{орг}$ от 1 до >30%) на изменение гидротермических условий в лабораторном эксперименте (температура 10, 22, 30 и 40 °C, влажность 0,3 и 0,7 ПВ); 2) применение полученного уравнения для интеграции цифровой карты запасов углерода в слое 0-10 см и мезоклиматической модели COSMO-CLM (разрешение 500 м, период моделирования май–октябрь 2019 г.).

Прогнозирование изменений запасов углерода в почвах Московской области в результате урбанизации в 2015–2050 гг. включало три этапа: 1) построение карты запасов углерода Московской области на 2015 г. (ЦПК); 2) моделирование урбанизации за период 2015-2050 гг. (логистическая регрессионная модель зависимости вероятности урбанизации от биоклиматических и социально-экономических факторов); 3) корректировка построенных карт запасов углерода с учетом новых урбанизированных территорий в 2050 г. Опорная база данных для настройки модели включала запасы $C_{орг}$ в почвах 240 локаций, отобранных в различных функциональных зонах Москвы и населенных пунктов Московской области, отличающихся биоклиматическими условиями, площадью и историей: Дубна, Сергиев Посад, Воскресенск, Шатура, Пущино и Серебряные Пруды, а также естественных и агроэкосистем вблизи поселений (методика: Vasenev et al., 2014; 2018).

Сравнительно-географическую оценку запасов углерода в зональном ряду почв городов Европейской территории России проводили в 2019-2020 гг. для селитебных зон шести городов, различающихся по биоклиматическим условиям, площади, истории и экономике: Мурманск, Апатиты, Москва, Пущино, Курск и Ростов-на-Дону (табл. 3 диссертации). Для каждого города в 50 рандомизированных точках (для Москвы – в 140 точках) смешанные образцы почв отбирали по горизонтам и по слоям (0-10, 10-20, 20-30 и 30-50 см), подстилочные горизонты исключали. В образцах определяли содержание $C_{орг}$ и $C_{карб}$ и оценивали индикаторы микробной активности ($C_{мик}$, МД, qCO_2). Для всех

городов были построены картосхемы запасов $C_{орг}$ с учетом оценки запечатанности территории. Динамику запасов углерода оценивали по эмиссии CO_2, измеряемой в центральной части города и на фоновом участке (газовый анализатор AZ-77532, 10 точек на каждом участке, характеризующих газонную, кустарниковую и древесную растительность), с периодичностью 2 раза в месяц в течение вегетационного сезона с одновременным измерением температуры и влажности. Непрерывное наблюдение температуры воздуха (на высоте 2 м) и почвы (глубина 7 и 20 см) велось с использованием автономного датчика температуры iButton DS1922.

Логика работы последовательно рассматривает различные иерархические уровни от отдельного почвогрунта, компонента, профиля городской почвы или почвенной конструкции до регионального и глобального (рис. 1). Объекты, методы и наблюдаемые показатели обобщены в таблицах 5-7 диссертации и описаны в соответствующих главах диссертации.

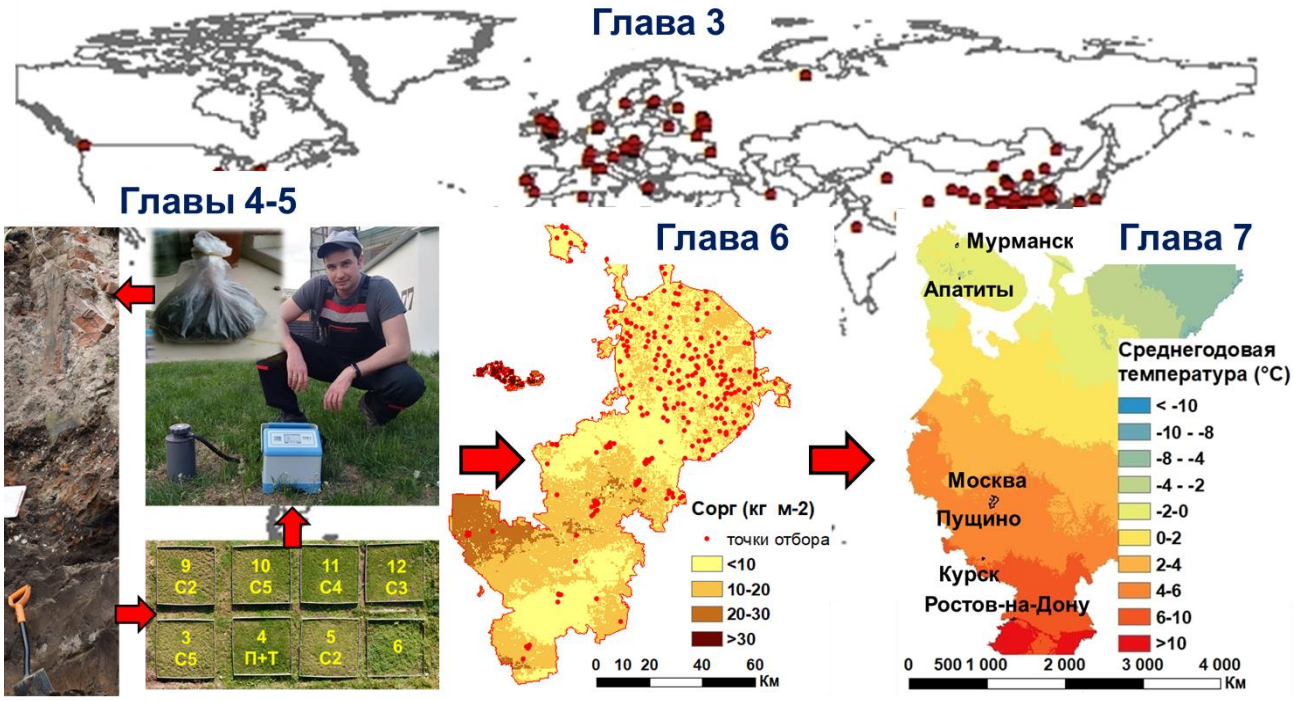


Рисунок 1 – Иерархическая организация объектов исследования

ГЛАВА 3. Запасы углерода в городских почвах мира

Анализ запасов углерода в почвах 116 городов мира показал, что запасы $C_{орг}$ в городских почвах, усредненные для слоев 0-10 и 0-100 см, несмотря на высокую внутреннюю неоднородность, были статистически значимо (t-тест, $p<0.05$) выше, чем в фоновых почвах (3,6±0,2 и 14,0±0,7 кг С $м^{-2}$ и 2,1±0,1 и 8,1±1,0 кг С $м^{-2}$ соответственно). Запасы $C_{карб}$ в слое 0-10 см были также несколько выше в городских почвах, чем в фоновых (0,53±0,05 кг С $м^{-2}$ и 0,50±0,04 кг С $м^{-2}$ соответственно), в то время как для слоя 0-100 см показана обратная закономерность. Это можно объяснить различным происхождением $C_{карб}$ - цементная пыль и строительные материалы – для почв городов (Lorenz, Lal, 2015; Прокофьева и др., 2019), и карбонатные новообразования в почвообразующих породах – для фоновых почв (Zamanian et al., 2016). Запасы $C_{орг}$ в почвах холодного (группа D по Кёппену-Гейгеру) и умеренного (группа C) климата были значимо выше, чем в аридном климате (группа B). Максимальные запасы $C_{карб}$ показаны для аридного климата, причем их доля в общем запасе углерода слоя 0-100 см в фоновых почвах была в 4 раза выше, чем в соответствующих городских почвах (рис. 2).

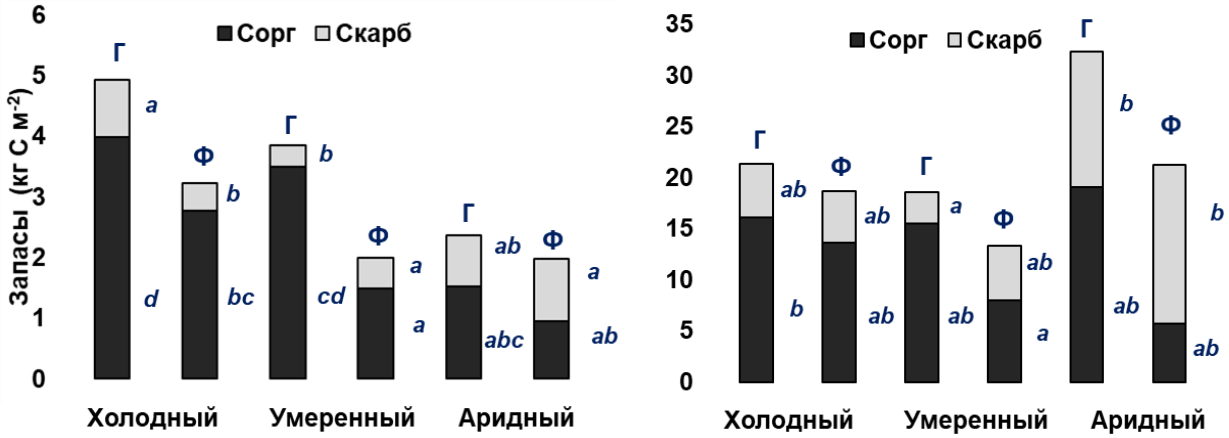
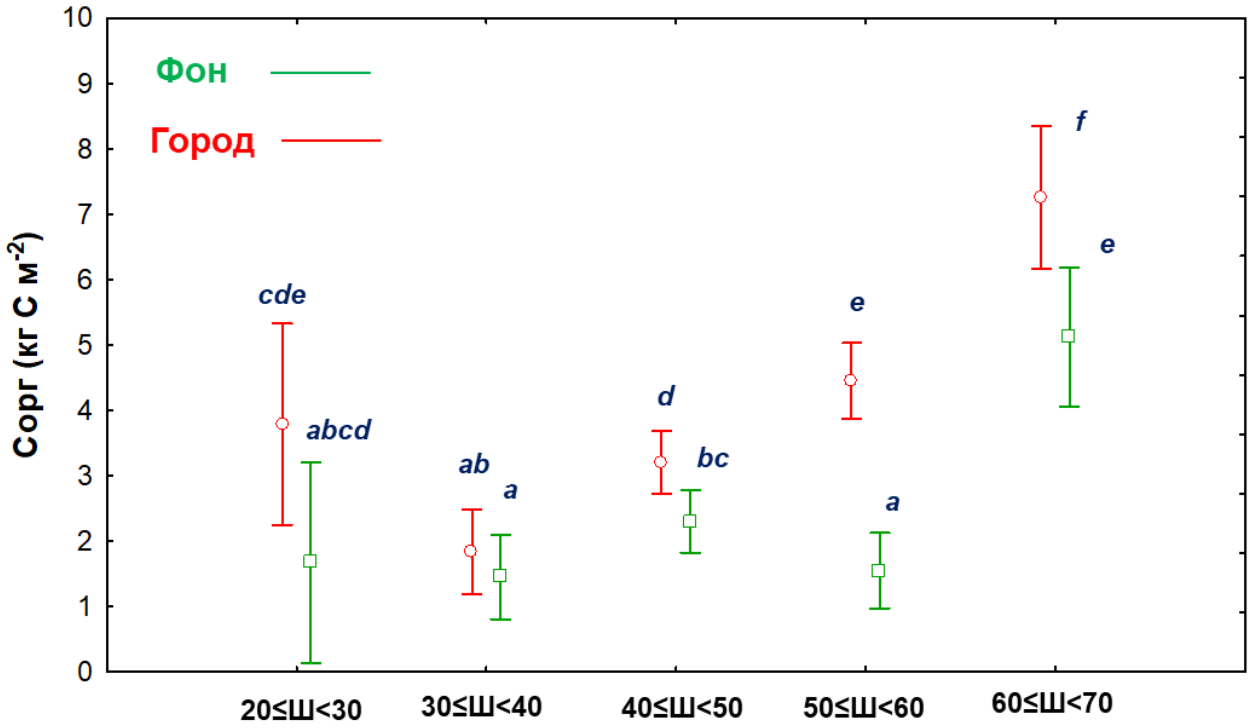


Рисунок 2 – Запасы $C_{орг}$ и $C_{карб}$ в слое 0-10 см (слева) и 0-100 см (справа) городских (Г) и фоновых (Ф) почв (фактор П) различных климатических групп (фактор К); буквы обозначают гомогенные группы на основании пост-хок критерия Тьюки ($p<0.05$) для двухфакторного дисперсионного анализа (П×К) для $C_{карб}$ (верхний ряд) и $C_{орг}$ (нижний ряд)

Средние запасы $C_{орг}$ в слое 0-10 см городских почв закономерно увеличивалось от тропиков и субтропиков (~20 – 40°) до высоких широт (60 –

70°), при этом в зонах умеренного и арктического климата запасы $C_{орг}$ в городских почвах было значимо выше по сравнению с фоновыми (рис. 3).



Рисунок–- 3 Запасы $C_{орг}$ (среднее и 95% доверительный интервал) в слое 0-10 см городских и фоновых почв (фактор П), усредненные по диапазону широт (фактор Ш); буквы обозначают гомогенные группы на основании пост-хок критерия Фишера LSD ($p<0.05$) для двухфакторного дисперсионного анализа (П×Ш)

Выявленную закономерность можно объяснить менее интенсивной минерализацией в более холодных условиях органического вещества легко разлагаемых субстратов (торф, компосты, растительные грунты), часто используемых для создания верхних горизонтов городских почв. Отдельные публикации свидетельствуют об увеличении запасов $C_ч$ в городских почвах северных широт, что может быть связано с дополнительными поступлениями продуктов сжигания топлива (Lehndorff et al., 2015; Liu, Yang, 2021).

Разнообразие запасов углерода почв внутри городов определялось функциональным зонированием. Максимальные запасы $C_{орг}$ в слое 0-10 см отмечены для рекреационных зон, а в слое 0-100 см – для селитебных и общественных зон (рис. 4). В промышленных и придорожных зонах формируются более высокие запасы $C_{карб}$ и $C_ч$, что объясняется как обилием техногенных включений, так и дополнительным поступлением от

промышленных объектов и транспорта. В рекреационных зонах повышенные запасы $C_{орг}$ в слое 0-10 см часто формируются в результате привноса органических субстратов в процессе озеленения и благоустройства, а также интенсивного корнеобразования за счет мероприятий по уходу за насаждениями (Shchepeleva et al., 2017). Высокие запасы углерода в метровом слое почв жилой зоны являются результатом постепенного накопления продуктов селитебной активности на протяжении десятков и сотен лет. Особый интерес представляют «неочевидные» запасы в запечатанных почвах и культурных слоях (Piotrowska-Długosz, Charzyński, 2014; Смагин и др., 2016). В слоях запечатанных почв глубже 50 см запасы $C_{орг}$ были лишь на 10% ниже, а $C_{карб}$ – в два раза выше, чем в почвах под газонами. Вероятно, запасы $C_{карб}$ в запечатанных почвах могут иметь как техногенное, так и педогенное происхождение, связанное с растворением избытков CO_2 при ограниченном газообмене в системе «почва-атмосфера». В целом, глубокие слои (100-200 см) городских почв обеспечивали более половины их общих запасов $C_{орг}$, в то время как для фоновых дерново-подзолистых почв (Retisols) и черноземов (Chernozems) - только 6 и 36% соответственно (рис. 5).

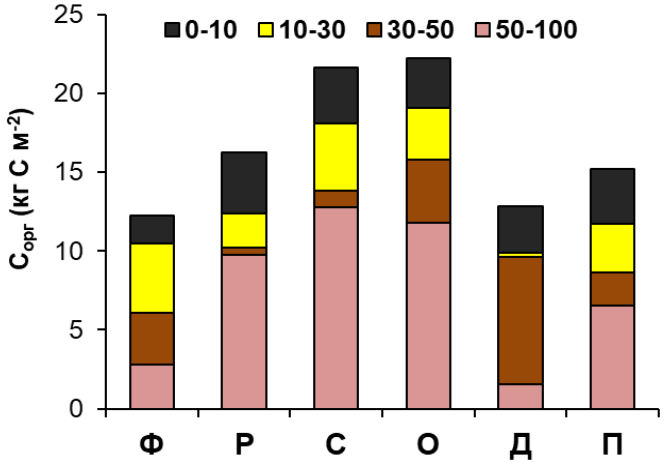


Рисунок 4 – Запасы $C_{орг}$ в слоях 0-10, 10-30, 30-50 и 50-100 см почв рекреационных (Р), селитебных (С), общественных (О), придорожных (Д) и промышленных (П) зон и фоновых территорий (Ф)

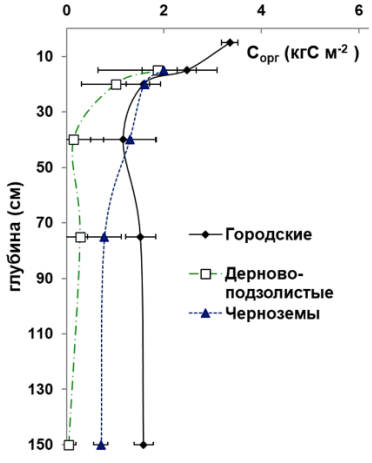


Рисунок 5 – Профильное распределение запасов $C_{орг}$ в городских почвах (результат анализа) по сравнению с фоновыми (база WoSIS (Batjes, 1996; 2009)

Анализ разработанной глобальной базы данных подтвердил, что почвы городов по запасам углерода могут превосходить даже самые плодородные

естественные почвы. Расчетная скорость прироста запасов углерода в городских почвах составляет в среднем 0,2-0,3 кг С $м^{-2}$ в год, что значительно выше, чем для большинства естественных почв и может объясняться регулярным антропогенным поступлением углерода в поверхностные горизонты в результате совокупности процессов городского метаболизма.

ГЛАВА 4. Потоки и запасы углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса

Анализ объемов и свойств почвогрунтов и их компонентов, применяемых для почвенного конструирования в Московском мегаполисе

Динамичное развитие и благоустройство Москвы определяет высокую потребность города в почвогрунтах. Несмотря на созданную нормативную базу (Закон г. Москвы 04.07.07№ 31 «О городских почвах», Постановления правительства Москвы от 27.07.04 № 514 и от 10.09.22 № 743) процесс создания почвенных конструкций остается недостаточно регламентированным, а рынок почвогрунтов — непрозрачным и сложным для анализа. Почвогрунты и их компоненты очень разнообразны по свойствам и происхождению. Анкетирование компаний-поставщиков (n = 27, суммарная доля на рынке более 50%, по экспертной оценке АНО «Московский экологический регистр») показало, что ежегодно в Москву завозят не менее 1,35 миллионов $м^3$ почвогрунтов. При изготовлении почвогрунтов основными компонентами (в совокупности до 90%) были растительный грунт («срезка»), котлованный грунт, низинный и верховой торф и песок. Основные поставки растительного грунта осуществлялись с территорий активной застройки и не подразумевали перевозку на большие расстояния. Низинный торф, напротив, поставлялся издалека: с севера, северо-запада и востока Московской области и даже из соседних регионов, где исторически развита добыча торфа (рис. 6).

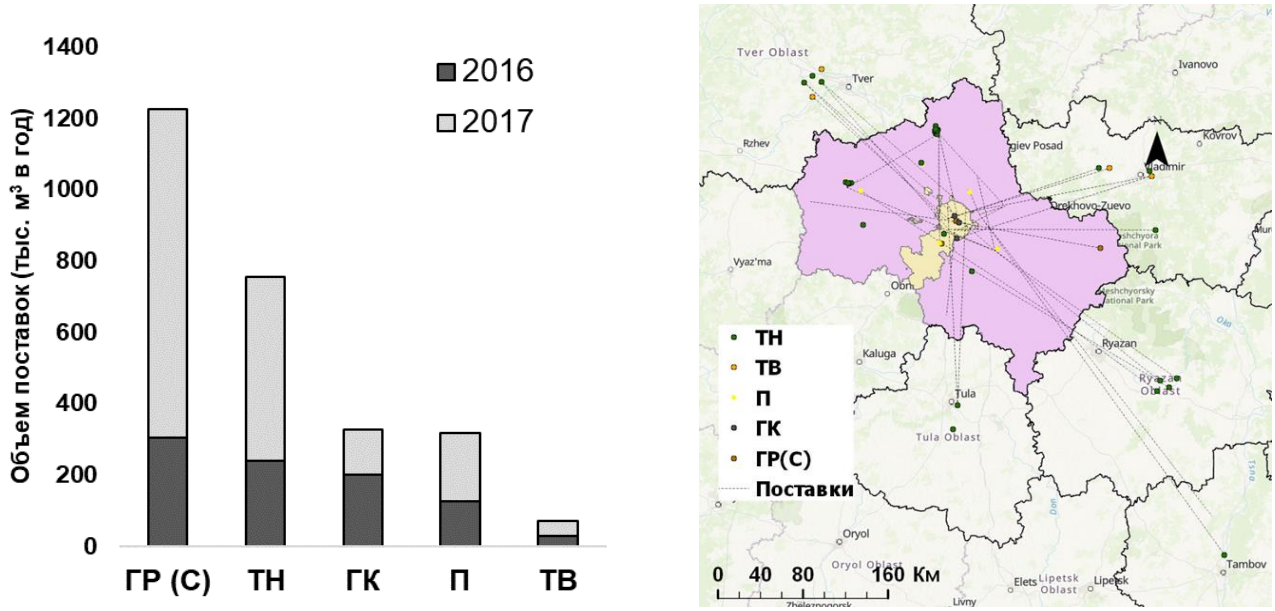


Рисунок 6 – Объемы (слева) и направления (справа) поставок в Москву основных компонентов почвогрунтов: грунта растительного (срезки) (ГР(С)), низинного торфа (ТН), грунта котлованного (ГК), верхового торфа (ТВ) и песка (П) по данным анкетирования 27 компаний-поставщиков в 2016-2017 гг.

Содержание $C_{орг}$ для 80% общей выборки образцов находилось в диапазоне от 5 до 15%, однако для 20% выборки отмечено превышение не только фоновых, но и нормативных значений (ПП-514). Суммарное поступление $C_{орг}$ с почвогрунтами составило 110 тыс. т С $год^{-1}$. Для анализа неоднородности по содержанию $C_{орг}$ были детально изучены по 10 наиболее распространенных компонентов и почвогрунтов. Компоненты были подразделены на группы по происхождению (торфа, грунты и осадки), а почвогрунты — по количеству компонентов (простые — 2, сложные — >2) и доле торфа (> / < 30% объема). Средние значения содержания $C_{общ}$ и N, а также $C_{мик}$ и МД значимо уменьшались в ряду торфа > осадки > грунты (ANOVA, LSD-test). Показатель $T_{0.5}$ для осадков и грунтов был близок к фоновым почвам (10-20 лет), а для торфов — не превышал 4 года. Содержание $C_{мик}$ в фоновых почвах было на 50-70% меньше, чем в торфах и осадках, однако отношение $C_{мик}/C_{орг}$ (доля $C_{мик}$ в $C_{орг}$, выраженная в %), отражающее микробную доступность углерода, в фоновых почвах было в 2-10 раз выше по сравнению с изученными компонентами (рис. 7). Содержание $C_{общ}$, $N_{общ}$, $C_{мик}$ и скорость МД в простых (двухкомпонентных) почвогрунтах превосходили таковые в сложных в 2-4 раза, однако устойчивость органического

вещества была снижена, о чем свидетельствуют меньшее значение $C_{мик}/C_{орг}$ (0,28% - простые и 0,56% - сложные) и высокий qCO_2 (рис. 8). Значение $T_{0.5}$ для почвогрунтов было в 2-5 раза меньше, чем для фоновой почвы.

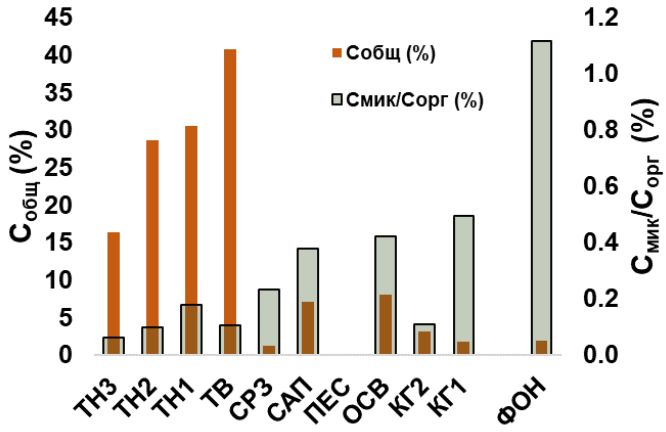


Рисунок 7 – Содержание общего углерода и соотношение $C_{мик}/C_{орг}$ для компонентов (СРЗ – «срезка», САП -сапропель, КГ -котлованный грунт)

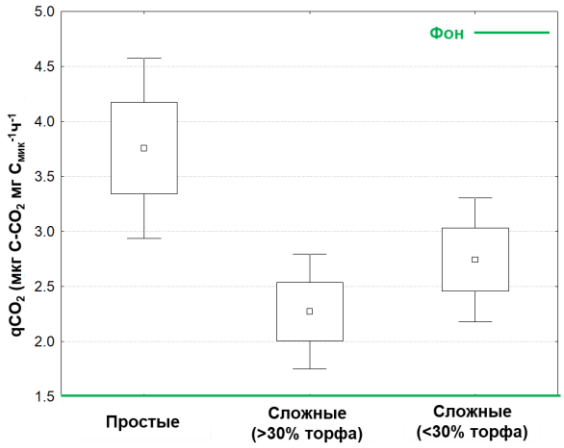


Рисунок 8 - Микробный метаболический коэффициент для групп почвогрунтов

Устойчивость органического вещества двух компонентов (ТН1 и ТН3) и четырех вариантов почвогрунтов (ПГ1, ПГ2, ПГ3 и ПГ4) оценивалась по отклику МД на различные гидротермические условия. Для всех субстратов максимальное МД показано при 30-40 ºС и влажности 50-70 % ПВ, а минимальное – при температуре – 10 ºС, недостатке или избытке влаги. При этом повышение температуры сокращало $T_{0.5}$ в 2-3 раза для почвогрунта и до 10 раз для низинного торфа (рис. 9).

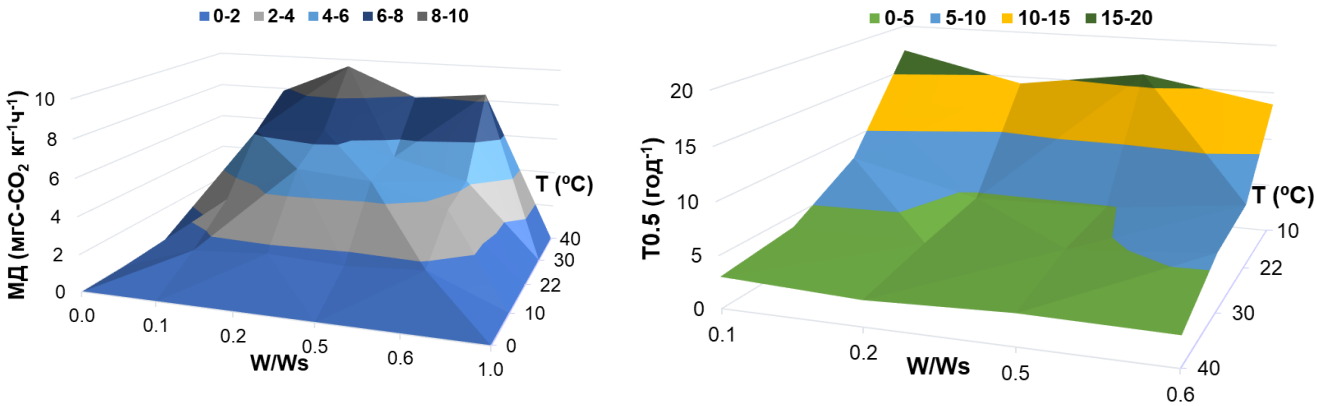


Рисунок 9 – Динамика микробного дыхания (МД, слева) и времени полуразложения ($T_{0.5}$, справа) почвогрунта ПГ1 при контрастных гидротермических условиях

Влияние антропогенной нагрузки (засоление, загрязнение потенциально токсичными металлами) на потоки и запасы углерода было изучено в рамках вегетационного эксперимента на примере почвогрунта ПГ1 с посевом овсяницы (*Festuca arundinacea*). Засоление оказало негативное воздействие на запасы углерода в корневой биомассе и почвенное дыхание (угнетение одного из параметров микробной активности - базального дыхания) (табл. 1). Загрязнение (Cd, Zn, Ni, Pb и Cu) привело к уменьшению надземной биомассы более чем в два раза и снижению чистого экосистемного обмена.

Таблица 1 – Влияние засоления на потоки и запасы углерода в системе почвенная конструкция – газон (среднее ± ошибка среднего)

Показатель	Концентрация NaCl (ммоль)		
	0	30	90
Прирост надземной биомассы, г сух. в-ва $м^{-2}сут^{-1}$	3,41 ±0,36	3,56 ± 0,21	3,01 ± 0,10
Суммарная корневая биомасса, г сух. $м^{-2}$	224 ± 12	144 ± 30	161 ± 46
Соотношение корень/побег	2,00 ± 0,16	1,25 ± 0,21	1,28 ± 0,29
Почвенное дыхание (среднее), г $C\text{-}CO_2$ $м^{-2}сут^{-1}$	2,66 ± 0,60	1,92 ± 0,36	1,81 ± 0,31
Почвенное дыхание (суммарное), г $C\text{-}CO_2$ $м^{-2}$	707	509	482
Базальное дыхание, мг $C\text{-}CO_2$ $кг^{-1}$	1,28 ± 0,07	1,23 ± 0,12	0,74 ± 0,24
Углерод микробной биомассы, мкг $г^{-1}$ почвы	512 ± 24	420 ± 157	577 ± 216

В реальных условиях города в рамках мониторинга на стационарных площадках с посевом газонных трав наблюдали динамику потоков и запасов углерода в почвенных конструкциях с различной мощностью (3 варианта) и составом слоев (5 вариантов) с момента создания и на протяжении 2-3 сезонов. Показано резкое уменьшение содержания $C_{орг}$ в течение уже первых 8-12 месяцев наблюдений с дальнейшей постепенной стабилизацией на уровне фоновых значений (рис. 10). За период наблюдений годовой прирост биомассы растений увеличился в 2,0-2,5 раза, при этом для конструкций с 20-см органогенным горизонтом надземная и корневая биомасса были больше на 50-100% и 70-120% соответственно, чем для вариантов с мощностью 10 и 5 см. Для эмиссии CO_2 почвенными конструкциями были показаны характерные сезонные закономерности, определяемые динамикой температуры почвы (R^2=0,5, $p<0,05$) с максимальным потоком в мае-июне (8-11 г $C\text{-}CO_2$ $м^{-2}$ $сут^{-1}$). Эмиссия CO_2 конструкции с органогенным 20-см горизонтом была в среднем на 20-30% выше

других вариантов. Для всех вариантов почвенных конструкций суммарная (за 3 года) микробная эмиссия CO_2 (рассчитана как половина от почвенной эмиссии) значительно превышала поглощение углерода биомассой, что свидетельствует о неустойчивости системы, причем наибольшее превышение (в 2,6 раза) показано для конструкции с 5-см органогенным горизонтом, а наименьшее (на 70%) – с 20-см (рис. 10).

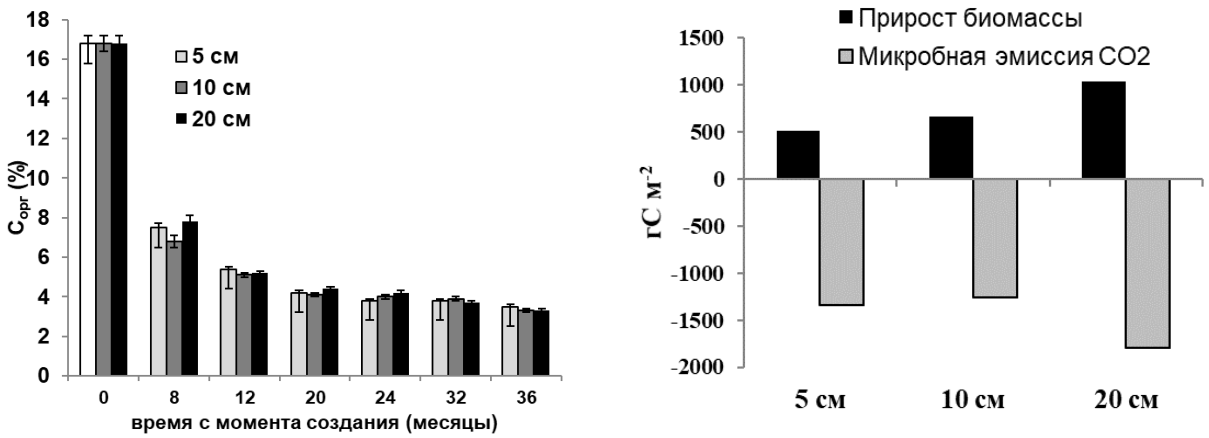


Рисунок 10 – Динамика содержания углерода (среднее и стандартная ошибка) (слева) и соотношение потоков углерода – поглощения за счет прироста биомассы (положительные значения) и эмиссии за счет микробного дыхания (отрицательные значения) (справа) в почвенной конструкции на основе торфо-песчаной смеси мощностью 5, 10 и 20 см

Расчетные значения ЧЭО за 1-й год были сопоставимы для всех типов конструкций (-130 – 140 гСм$^{-2}$), а на 3-й – потери для конструкций с 5-см органогенным горизонтом были в два раза выше таковых для вариантов с мощностью 10 и 20 см (-304, -160 и -176 гСм$^{-2}$ соответственно), что иллюстрирует экологическую и экономическую нецелесообразность создания маломощных (<10 см) почвенных конструкций. Анализ динамики потоков и запасов углерода для 5 вариантов модельных почвенных конструкций (четырех конструкций с 15-см органогенным горизонтом на основе почвогрунтов ПГ5, ПГ6, ПГ9 и ПГ10 и одной конструкции из 10 см низинного торфа (ТН3), перекрытого 5-см слоем песка (ПЕС)), показал снижение запасов $C_{общ}$ в течение первого года на 30-50%, причем эмиссия CO_2 для конструкции ТН3+ПЕС была ниже, чем для других (рис. 11). Расчетный ЧЭО показал слабый сток (~ 10-20 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$) для конструкций ПГ5 и ТН3+ПЕС, а для остальных вариантов – потери ~200-300 гСм$^{-2}$ год$^{-1}$ (рис. 12).

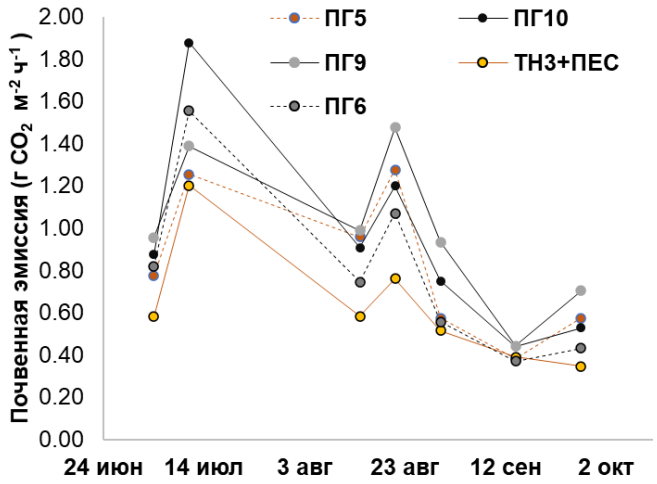


Рисунок 11 – Динамика эмиссии CO_2 почвенными конструкциями

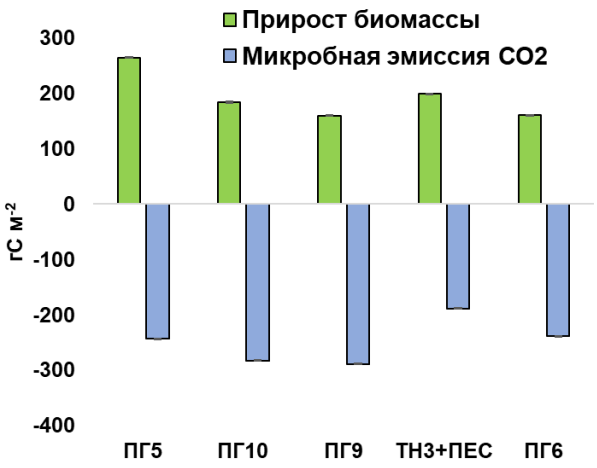


Рисунок 12 - Расчетный ЧЭО CO_2 почвенными конструкциями

Таким образом, результаты лабораторных, вегетационных и полевых экспериментов ставят под сомнение целесообразность доминирования косимых газонов на торфо-песчаных смесях в озеленении Московского мегаполиса (по сравнению с древесно-кустарниковой растительностью) в контексте целей углеродной нейтральности, поскольку они в большинстве случаев не могут выполнять функцию накопления и сохранения органического углерода, по крайней мере, в первые годы после создания.

ГЛАВА 5. Сравнительная оценка потоков и запасов углерода почв различных функциональных зон городов Москва и Курск

Сопоставление почв рекреационных, селитебных и промышленных / транспортных зон Москвы и Курска позволили проанализировать влияние функционального зонирования на запасы углерода и эмиссию CO_2 на фоне различных биоклиматических условий. В Москве запас $C_{орг}$ в слое 0-100 см составил в среднем 14,5±5,2 кгСм$^{-2}$, что в 2,5 раза превысило фоновое значение. В Курске, напротив, запас $C_{орг}$ в почвах был на 60 и 150% ниже в сравнении с фоновой темно-серой почвой и черноземом миграционно-мицеллярным (16,3 и 25,8 кгСм$^{-2}$ соответственно, слой 0-100 см). В Курске содержание $C_{мик}$ закономерно уменьшалось в ряду фон > промышленная > селитебная > рекреационная зоны. В Москве минимальные значения были также показаны для промышленной зоны, максимальные – для селитебной. Наименьшие значения

$C_{мик}/C_{орг}$ для почв обоих городов выявлены для промышленных зон, а наибольшие – для селитебных, при этом между городами этот показатель практически не различался. Показатель $T_{0.95}$ для почв Курска был наибольшим для почв фона и рекреационной зоны, для промышленной и селитебной зоны значения были в 4 раза меньше. Для Москвы, напротив, $T_{0.95}$ в почве промышленной зоны был значительно выше фоновых значений. Это несовпадение связано с тем, что высокое $T_{0.95}$ может быть обусловлено как высоким $C_{орг}$ (К-Ф-1), так и низкой микробной активностью (М-П-1) (табл. 2).

Таблица 2 – Показатели микробной активности и параметры биодеструкции органического вещества почв рекреационной (Р), селитебной (С) и промышленной (П) функциональных зон Москвы (М) и Курска (К) в сравнении с фоновыми почвами (Ф)

Функц. зона	$C_{мик}$, мкг С $г^{-1}$	$C_{мик}/C_{орг}$, %	МД, мг С-CO_2 $кг^{-1}$ $ч^{-1}$	qCO_2, мг С-CO_2 $мг^{-1}$ $C_{мик}$ $ч^{-1}$	k, $год^{-1}$	$T_{0,5}$, лет	$T_{0,95}$, лет
М-Р-1	147	0,51	0,49	3,33	0,081	8,5	36,9
М-С-1	517	2,69	0,47	0,91	0,118	5,9	25,5
М-П-1	130	0,40	0,30	2,31	0,045	15,5	67,3
М-Ф	331	1,50	0,87	2,63	0,190	3,6	15,8
К-Р	610	2,90	0,21	0,34	0,048	14,4	62,5
К-С	400	2,83	0,55	1,38	0,187	3,7	16,1
К-П	300	1,50	0,70	2,33	0,168	4,1	17,8
К-Ф-2	1250	1,39	0,95	0,76	0,051	13,7	59,2

Для всех объектов показаны сопоставимые сезонные тренды почвенной эмиссии CO_2, которые в значительной степени (до 40%) объяснялись температурой почвы. В Курске для всех участков максимальные значения показаны в летний период 2013, 2014 и 2017 гг. Для более холодного лета 2015 г. среднемесячная эмиссия была ниже на 20-30% для фоновых почв и почти в два раза ниже — для почв промышленной зоны. Средняя годовая эмиссия CO_2 почвами промышленной зоны была на 10-30% ниже фоновых значений (рис. 13). Обратная закономерность показана для Москвы, где эмиссия CO_2 фоновой почвы была в 2-5 раз ниже соответствующих городских. При этом наибольшая эмиссия CO_2 городских почв отмечена для придорожной территории, а наименьшая – для селитебной. Вклад микробного дыхания (измерения 2013 г.) в эмиссию CO_2 почвы варьировал от 20-30% на участках с доминированием

древесной растительности до 40-50% - для участков с доминированием травянистой растительности и значимо не различался между городами.

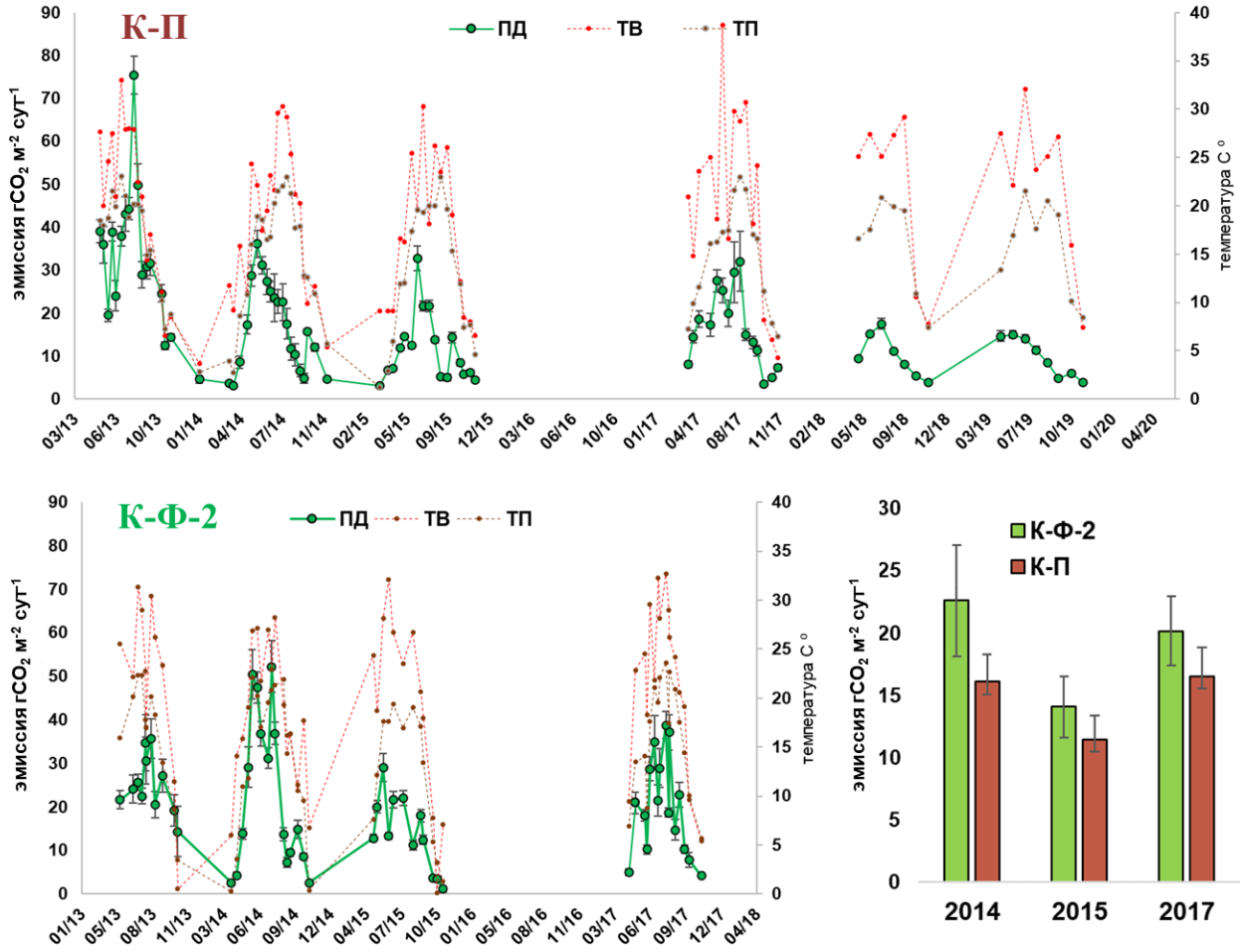


Рисунок 13 – Сезонная динамика и средние значения за безморозный период (среднее и стандартная ошибка) эмиссии CO_2 (ПД), температуры воздуха (ТВ) и почвы (ТП) промышленной зоны Курска (К-П) и фоновых почв (К-Ф-2)

Влияние различных гидротермических условий на эмиссию CO_2 почвой еще заметнее при сравнении участков с газонной и древесно-кустарниковой растительностью внутри функциональных зон (Москва, 2019-2020 гг.). Эмиссия CO_2 почв газонов была в среднем за год на 20-30% выше по сравнению с почвами под древесными насаждениями на том же участке. Различие между участками с одинаковой растительностью, но различным положением (М-Р-2, центр и М-С-2, окраина) достигало 50% (рис. 14) и в значительное степени (до 50%) определялось более высокими температурами и более низкой влажностью почвы в центре по сравнении с периферией.

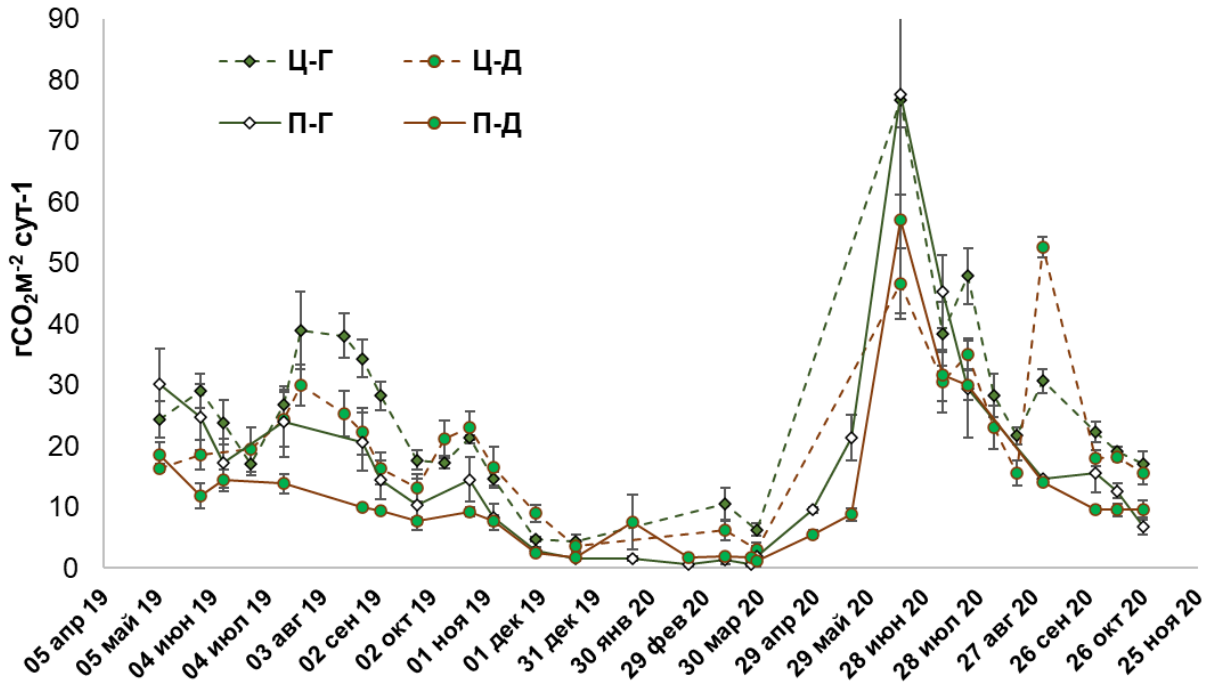


Рисунок 14 – Сезонная динамика эмиссии CO_2 (среднее и стандартная ошибка) почвами под газонной (Г) и древесной (Д) растительностью в центре (Ц) и на окраине (О) Москвы

При значительном различии суммарной годовой микробной эмиссии CO_2 фоновыми почвами (0,4-0,9 и 0,7-1,4 кгСм$^{-2}$ для Москвы и Курска соответственно), значения для городских почв были сопоставимы — 0,7-1,7 кгСм$^{-2}$. И в Москве, и в Курске отношение годовой микробной эмиссии CO_2 к запасам $C_{орг}$ в слое 0-10 см для городских почвы было значимо выше, чем для фоновых. Максимальные значения этого показателя (50-70%), полученные для селитебной зоны Курска и рекреационной зоны Москвы, соответствуют $T_{0.95}$= 4-8 лет и указывают на низкую устойчивость запасов $C_{орг}$ почв этих участков.

ГЛАВА 6. Пространственный анализ и моделирование разнообразия и динамики запасов углерода в почвах Московского мегаполиса

Пространственный анализ запасов углерода в почвах Москвы

Запасы $C_{общ}$ в слое 0-50 см для Москвы (в границах до 2012 г.) были в среднем на 20% ниже, чем для Новой Москвы (ТиНАО г. Москва после 2012 г.). Для почв Москвы показаны значимо более высокие запасы $C_{общ}$ в слое 0-10 см по сравнению с нижележащими, а для Новой Москвы вклад верхнего слоя в его 50-ти см запас не превышал 20%. Показаны статистически значимые (t-критерий, $p<0.05$) зависимости пространственного распределения запасов $C_{общ}$ от рельефа,

расстояния до основных дорог и возраста застройки. Общие запасы углерода с учетом запечатанности почвы составили 25,6 млн тонн, из них 6,1 млн тонн — в слое 0-10 см. Наиболее высокие значения показаны для природоохранных территорий на окраинах («Лосиный остров») и в долине р. Москва («Москворецкий»), а также для западной части Новой Москвы и г. Одинцово. В почвах центральной части города, наряду со снижением средних запасов углерода, показана наиболее высокая неоднородность (рис. 15).

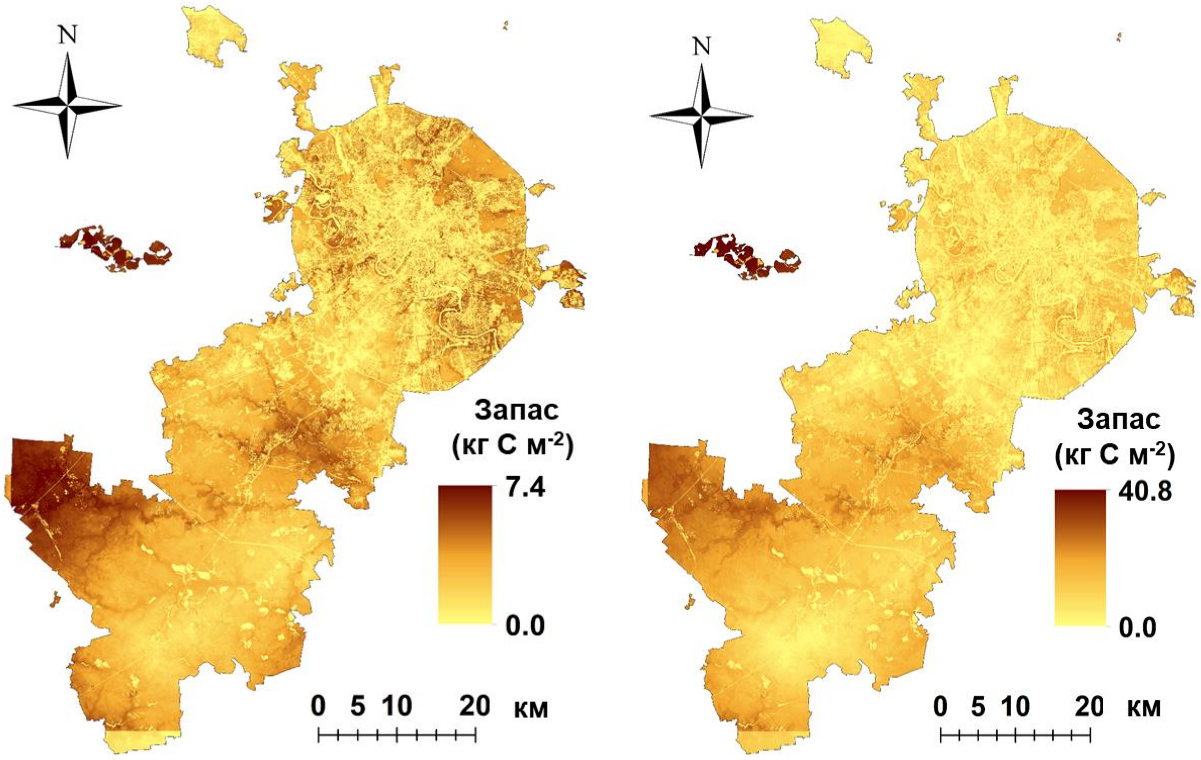


Рисунок 15 – Картосхема запасов $C_{общ}$ в почвах г. Москва для слоя 0-10 см (слева) и 0-50 см (справа)

Запас $C_{общ}$ в 4-х м культурном слое в районе Болотной площади составил 105 кгСм$^{-2}$, при этом более его половины сосредоточено на глубине 200-300 см, а вклад поверхностных (0-50 см) слоев не превышал 15%, что указывает на существенную недооценку почвенных запасов углерода исторических центров. При невысоком содержании $C_{мик}$ (в среднем ~ 80 мкгСг$^{-1}$) наибольшие значения $C_{мик}/C_{орг}$ показаны для наиболее глубоких слоев. Соответственно и $T_{0.5}$ снижается с десятков лет на глубине 50-150 см (112 лет, для слоя техногенного грунта с большим количеством золы и угля) до 2-3 лет на 350-400 см (рис. 16). Несмотря на условность данной оценки в условиях дефицита кислорода результат

свидетельствует о высоких рисках «залповой» эмиссии CO_2, если изоляция культурных слоев будет нарушена. Непродуманные работы по реновации территории в историческом центре с распечатыванием и перемещением техногенных горизонтов и культурных слоев могут вернуть эти погребенные запасы углерода в его экосистемный круговорот.

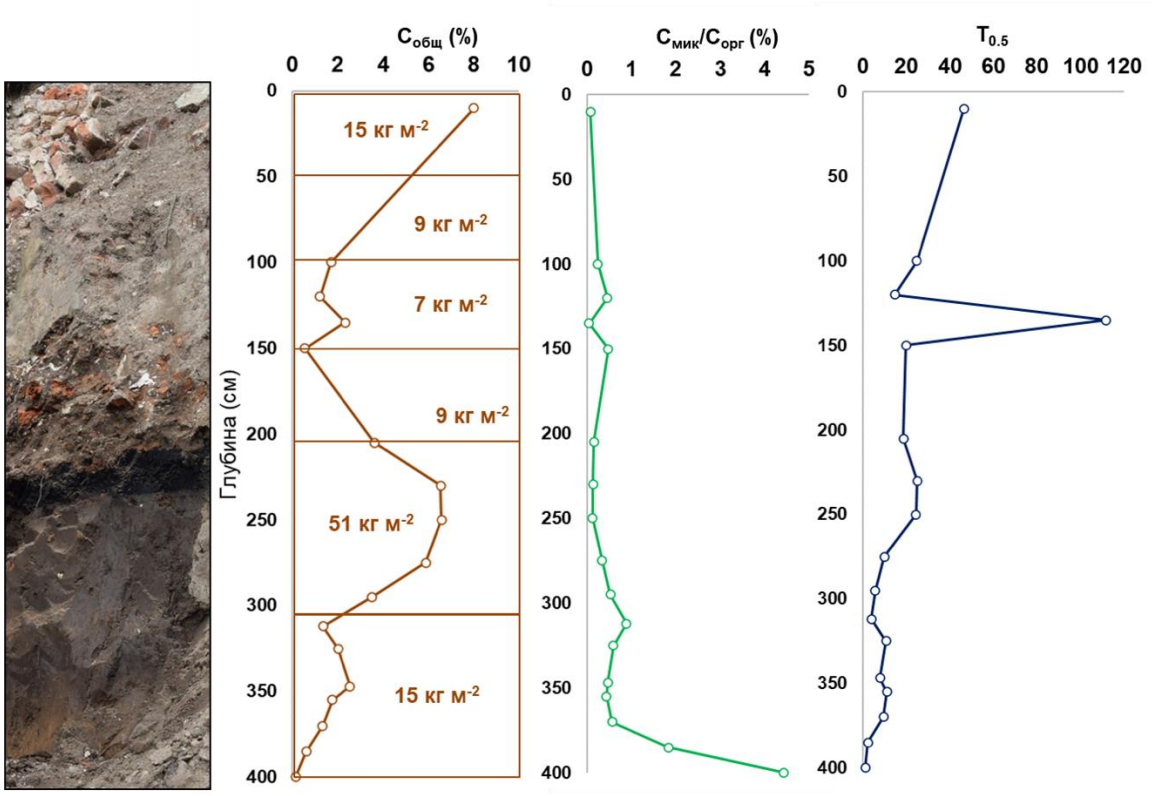


Рисунок 16 – Профильное распределение содержания и запасов углерода, соотношения $C_{мик}/C_{орг}$ и времени полуразложения ($T_{0.5}$), усредненные по слоям раскопа в районе Болотной площади в центре Москвы (2015-2016 гг.)

Оценка изменений запасов углерода в почвах в результате запечатывания территории Новой Москвы

Развитие Новой Москвы сопряжено с активным строительством жилого фонда и инфраструктуры, что не могло не сказаться на запасах почвенного углерода. Исходные запасы углерода в слое 0-100 см, рассчитанные по данным средних значений для подтипов естественных почв составили 14,2 млн тонн. Картографирование запечатанных территорий на период 1971 г. (топографическая карта, 1:200 000), 1990 г. (Landsat 5, 30 м) и 2017 г. (Open Street Map) выявило семикратное увеличение их площади, причем две трети этих территорий относятся к застройке (рис. 17). Снижение запасов почвенного

углерода вследствие запечатывания к 1971 г. составило 200 тыс. тонн, к 1990 г. – 600 тыс. тонн, а к 2017 г. – 1.1 млн. тонн, причем ¾ от общих потерь пришлись на территории жилой застройки. Наибольшие удельные потери отмечены для аллювиальных почв, которые утратили за этот период 10% исходного запаса углерода (130 тыс. из 1,3 млн. тонн). Данные оценки несколько завышают негативное воздействие урбанизации на запасы углерода почвы, поскольку не учитывают дальнейшее использования снятого верхнего почвенного горизонта. При этом, как было показано в Главе 4, углерод органических соединений почвенных конструкций характеризуется низкой устойчивостью к биодеструкции, в особенности в условиях городского острова тепла, поэтому потери в процессе снятия, перемещения и вторичного использования верхних горизонтов неизбежны и весьма значительны.

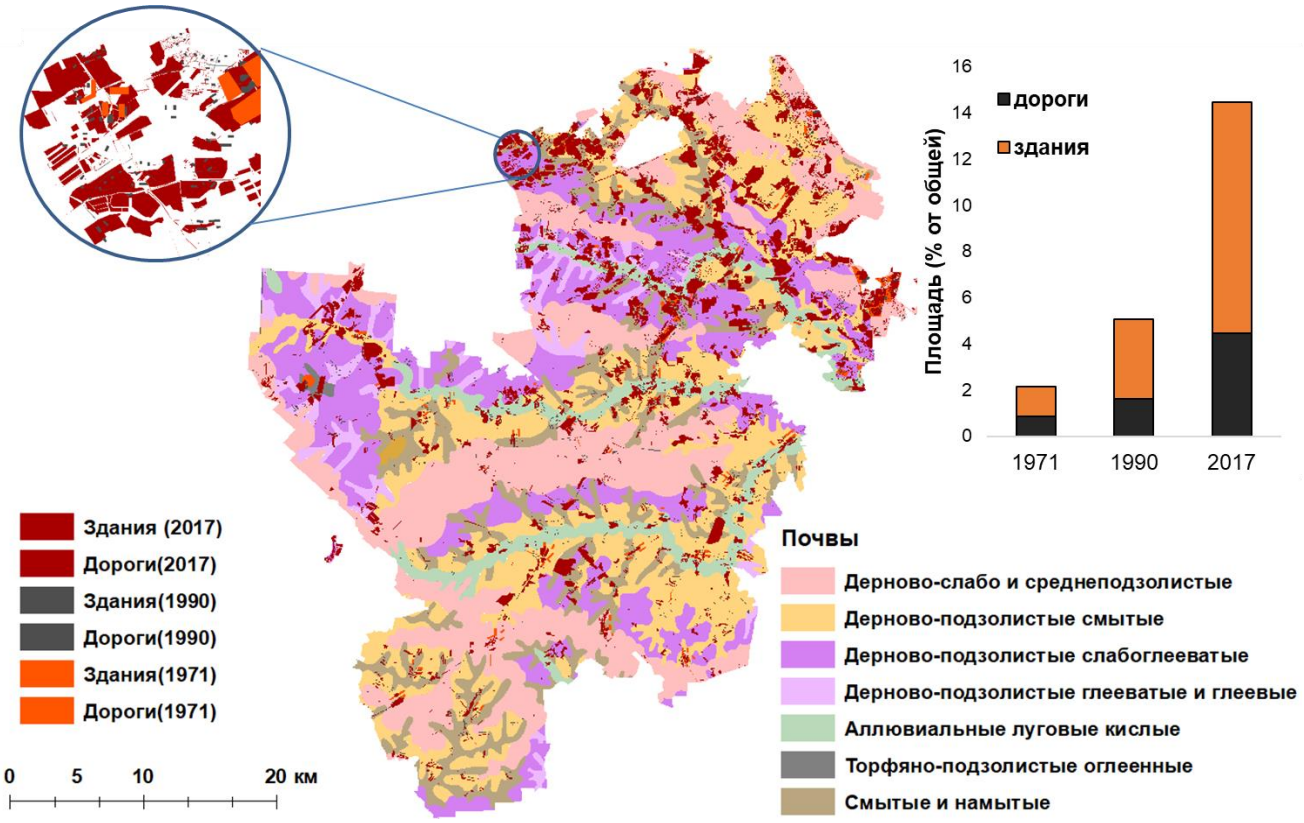


Рисунок 17 – Динамика запечатывания почв на территории Новой Москвы в 1971-2017 гг.

Моделирование влияния эффекта городского острова тепла на запасы углерода и микробное дыхание городских почв Московского мегаполиса

Для анализа воздействия городского острова тепла на содержание и запасы углерода в почвах было проведено комплексное исследование, включающее: 1) анализ зависимости микробного (базального) дыхания (МД) городских почв Москвы от их свойств и гидротермических условий; 2) экстраполяцию выявленных зависимостей в масштабах Московского мегаполиса на основании полученных ранее картограмм запасов углерода и результатов мезоклиматического моделирования температуры и влажности почвы за май-октябрь 2019 г. За исследуемый период повышение температуры воздуха под влиянием городского острова тепла составило в среднем +2,2 ºС, достигая +5,5 ºС для отдельных дней в июне и сентябре. Температура почвы в слое 0-10 см тесно коррелировала с температурой воздуха ($r=0,89$, $p<0,05$), при этом для городских почв среднемесячные превышения достигали +1,8 ºС по сравнению с фоном. Наиболее сильные проявления острова тепла показаны для почв центральной и восточной части города (рис. 18).

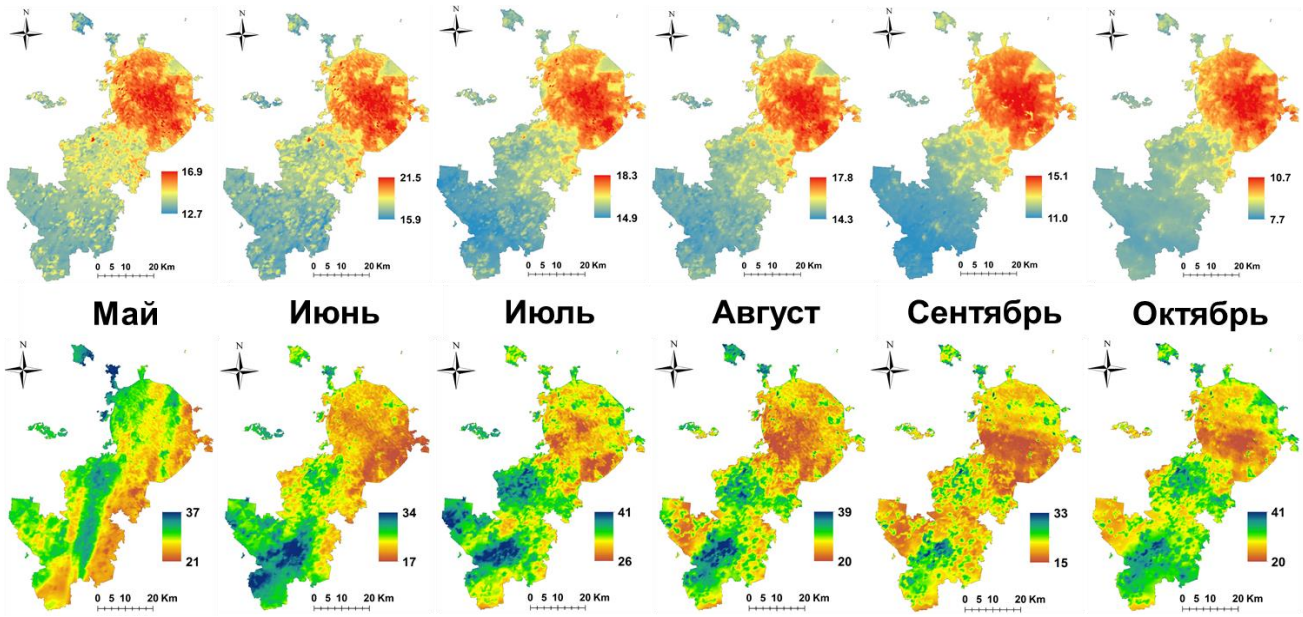


Рисунок 18 – Пространственно-временная неоднородность температуры (верхний ряд) и влажности (нижний ряд) почв Московского мегаполиса (модель COSMO-CLM, 2019 г.)

В результате лабораторного эксперимента была установлена значимая зависимость МД от почвенных параметров lnМД = 1,39+0,04×$T_п$ – 0,34×pH +

0,09× $C_{общ}$ + 0,002×$B_п$, где $T_п$ и $B_п$ – температура и влажность почвы (R^2_{adj} = 0,5, p<0,05 для всей модели и для каждого предиктора). Картографирование МД на основе экстраполяции полученной зависимости показало, что максимальные значения МД приходятся на небольшие по площади участки рекреационных и селитебных зон в центре Москвы, где высокое содержание углерода в торфопесчаных смесях совпадает с наибольшим проявлением городского острова тепла. Показатель $T_{0.5}$ для них не превышал 1-2 года (рис. 19) и может существенно снижаться при климатических изменениях. Дополнительная (по сравнению с моделью, не учитывающей городской остров тепла) эмиссия CO_2 составила 59 тыс. тонн, из которых 84% пришлось на почвы «старой» Москвы.

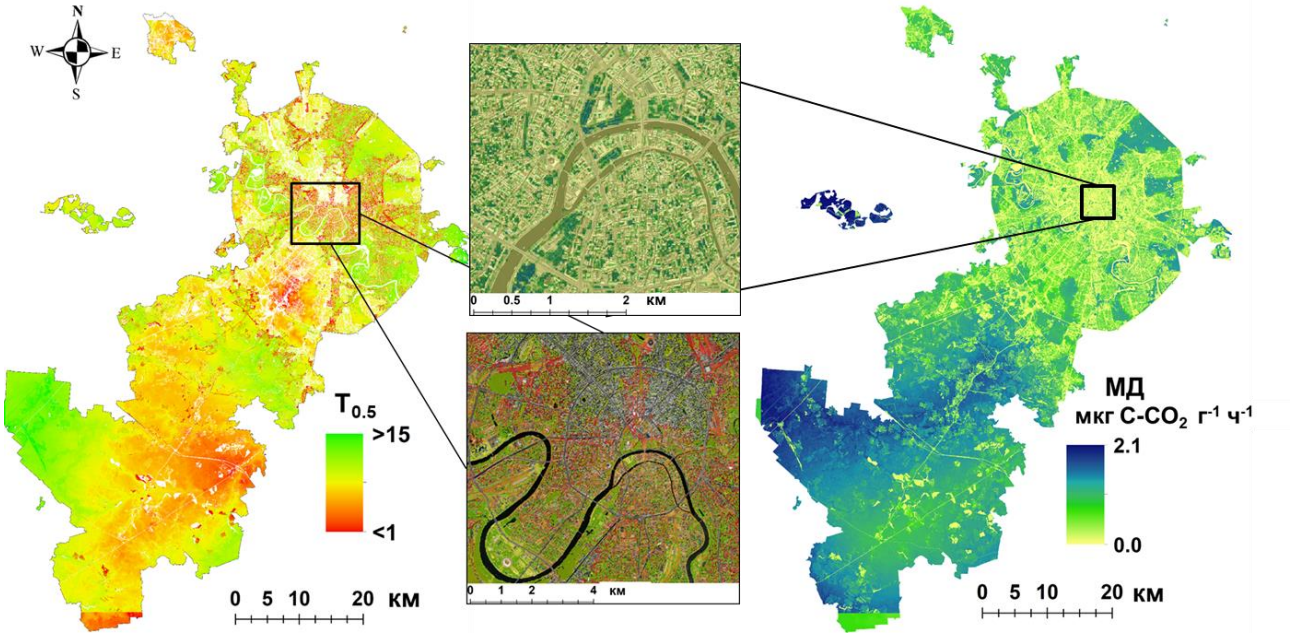


Рисунок 19 – Картограмма микробного дыхания (МД) почв Московского мегаполиса (справа) и времени полуразложения углерода в почве ($T_{0.5}$) (слева) по данным моделирования за июнь 2019 (увеличенные фрагменты: МД (сверху) и $T_{0.5}$ (снизу) для территории исторического центра с прозрачностью 50% и подложкой Google Earth)

Прогнозирование изменений запасов углерода в почвах Московского региона в результате урбанизации в 2015-2050 гг.

Пространственный анализ урбанизации за период 1980-2015 гг., был реализован в виде трех моделей: 1) с учетом всех статистически значимых факторов, 2) с учетом только биоклиматических факторов, 3) с предположением о полной урбанизации Новой Москвы. Прогнозируемая площадь урбанизированных территорий в Московском регионе к 2050 г. варьировала от

2834 км^2 (модель 2) до 4747 км^2 (модель 3) при наиболее достоверном результате 3302 км^2, показанного моделью 1 (R^2_N = 0,74; PCP=91,3). Урбанизация прогнозируется преимущественно на территории сельскохозяйственных угодий (228 км^2) и лесов (264 км^2), что приведет к сокращению фонда земель этих категорий на 1,6 и 1,1% соответственно. Основная урбанизация показана для зон дерново-подзолистых и серых почв, в то время как черноземы Серебряно-Прудского района останутся вне зоны этого влияния.

Если следовать допущению глобальных моделей (например, SoilGrid) о нулевых запасах $C_{орг}$ в почвах городов, то прогнозируемая урбанизация приведет к потере до 9 млн. тонн С. Разработанные модели, напротив, прогнозируют увеличение запасов $C_{орг}$ в слое 0-10 см в среднем на 400 тыс. тонн, а в слое 10-150 см – на 4-10 млн тонн. Предполагается, что потери углерода будут компенсированы за счет его привноса в процессе озеленения, благоустройства и многолетней селитебной активности. Такие результаты возможны при ряде допущений: 1) модель экстраполирует тенденции 1980-2015 гг. и не принимает во внимание законодательные ограничения и регламенты; 2) не учитывается низкая устойчивость запасов углерода в верхних горизонтах городских почв; 3) не учитывается время, необходимое для формирования культурных слоев; 4) не учтены прямые и косвенные эмиссии углерода в процессе образования и функционирования городских почв. В связи с этим, данный прогноз можно считать слишком оптимистичным. Реальные последствия урбанизации будут более комплексными, а результаты – менее однозначными. Тем не менее, возможность сохранения и увеличения запасов углерода в процессе урбанизации представляется интересной и перспективной идеей для задач устойчивого развития города и региона.

ГЛАВА 7. Регионально-географическая оценка запасов углерода и эмиссии CO_2 в почвах селитебных зон городов Европейской территории России

Комплексные мониторинговые исследования, проведенные в шести городах Европейской территории России, выявили основные регионально-

климатические закономерности распределения почвенных запасов углерода и эмиссии CO_2. Запасы $C_{общ}$ в слое 0-10 см почв городов севернее Москвы были выше по сравнению с южными городами (Курск, Ростов-на-Дону), причем в Апатитах, Москве и Пущино $C_{общ}$ почвы было выше соответствующих фоновых значений, а в Курске и Ростове-на-Дону – ниже. Это объясняется, по-видимому, высоким содержанием углерода в фоновых черноземах и быстрой деградацией органического вещества городских почв в жарком климате. Последнее подтверждается значениями $T_{0.5}$, которые для Ростова-на-Дону составили в среднем около 7 лет (в сравнении с 12 и 25 годами для Апатитов и Мурманска). Сопоставление запасов $C_{общ}$ в профиле ожидаемо показало их высокие значения в Курске и Ростове-на-Дону, что связано с большей мощностью городских почв (в среднем 120 см и 70 см), включающей погребенные естественные горизонты. Так, для почв Ростова-на-Дону вклад слоя 0-10 см в общий запас углерода уменьшился с 23 до 13%, а слоя 50-120 см – увеличился с 3 до 37% (рис. 20).

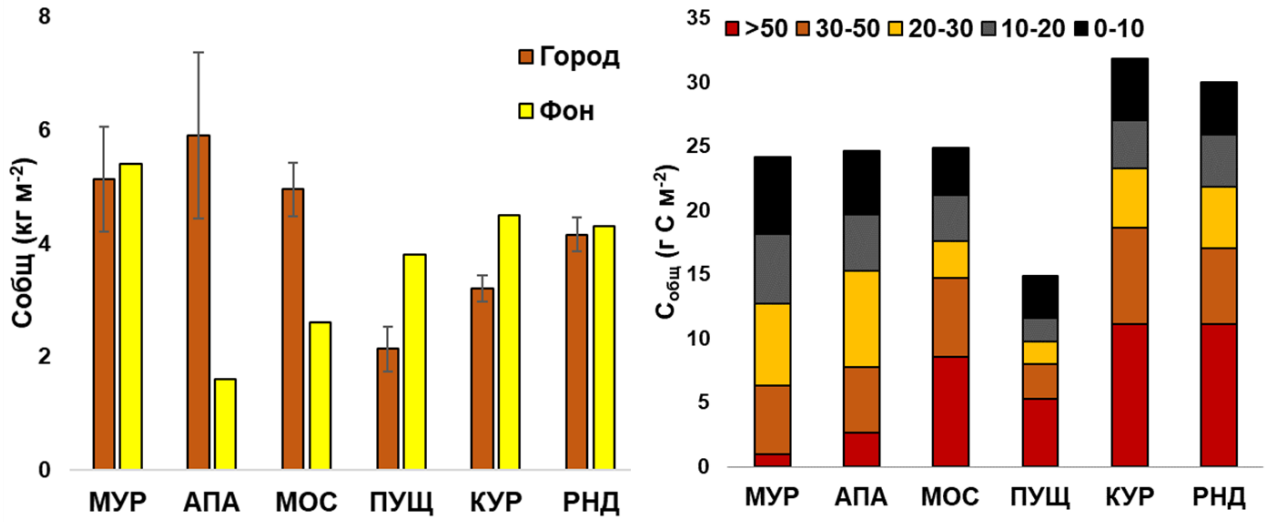


Рисунок 20 – Запасы $C_{общ}$ в слое 0-10 см (слева) и распределение запасов $C_{общ}$ по профилю (справа) для регионального ряда городов Мурманск (МУР), Апатиты (АПА), Москва (МОС), Пущино (ПУЩ), Курск (КУР) и Ростов-на-Дону (РНД)

Интересная зональная закономерность выявлена при анализе вклада в общий запас органического и неорганического углерода. В подзоле Мурманска (фон) доля $C_{карб}$ в $C_{общ}$ не превышала 5%, а в верхних горизонтах городских почв достигала 15%, уменьшаясь на глубине 50 см до 1%. Для Ростова-на-Дону показано, напротив, закономерное увеличение вклада $C_{карб}$ по профилю

городских почв с 5 до 32%, а в фоновом черноземе – с 1 до 78%. При этом для городских почв наибольший вклад $C_{карб}$ показан для слоя 30-50 см (где часто отмечено обильное включение известкового гравия), а для фоновой почвы – на глубине ≥100 см (из-за карбонатных новообразований) (рис. 21).

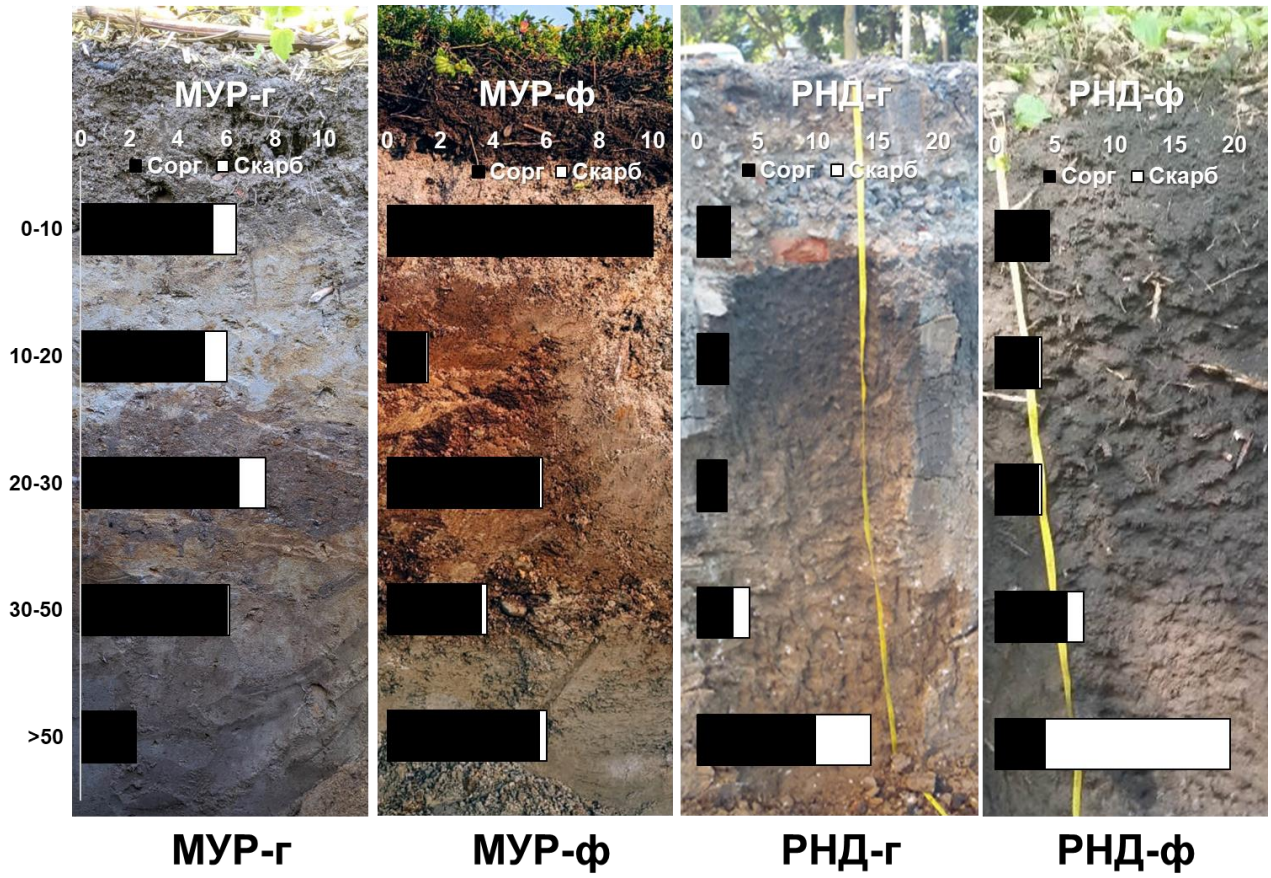


Рисунок 21 – Профильное распределение запасов (кг С м$^{-2}$) $C_{орг}$ и $C_{карб}$ фоновых (ф) и городских (г) почв Мурманска (МУР) и Ростова-на-Дону (РНД) (базовый слой – фотографии типичных профилей фоновых и городских почв)

Для всех городов были показаны более высокие среднегодовые температуры воздуха (0,8-1,2°С) и почв (0,4-1,0°С) по сравнению с фоном (исключение: фоновый участок степи). Влажность почв фоновых участков в степи и лесостепи была ниже соответствующих городских, а в северо-таежной и лесотундровой подзонах – выше. Динамика гидротермических условий в сочетании с неоднородностью почвенных свойств определили пространственно-временную изменчивость эмиссии CO_2 (R^2_{adj} = 0,51; $p<0,05$). Наибольшая среднегодовая эмиссия показана для Ростова-на-Дону (33±2 г CO2 м$^{-2}$ сут$^{-1}$), что было почти в три раза выше, чем для Мурманска. В Ростове-на-Дону и Москве

эмиссия CO_2 городских почв была почти в два раза выше по сравнению с фоном, а для Мурманска и Курска – ниже на 10-15% (рис. 22). В Мурманске и в Ростове-на-Дону 45-60% эмиссии CO_2 приходилось на летний период, в Курске более 50% — на весенний период, а в Москве вклад лета, весны и осени был примерно одинаковым (данные 2021 г., зима не рассматривалась). Летом 2021 г. в центральной России была зафиксирована рекордная жара. Для фоновых и городских участков было показано значимое увеличение температуры и снижение влажности почвы (так, для Ростова-на-Дону температура июля в среднем увеличилась на 3,5°С, а влажность – уменьшилась на 15%). Соответственно увеличилась и почвенная эмиссии CO_2, в первую очередь, для южных городов – в Курске (на 50% в городе и на 20% в лесостепи) и в Ростове-на-Дону (в 2 раза в городе и почти в 3 раза в степи). Для всех городов, за исключением Ростова-на-Дону, прирост эмиссии CO_2 почвы летом 2021 года был значимо выше в городе, чем на фоновых участках, что свидетельствует о более высокой уязвимости городских почв к климатическим изменениям.

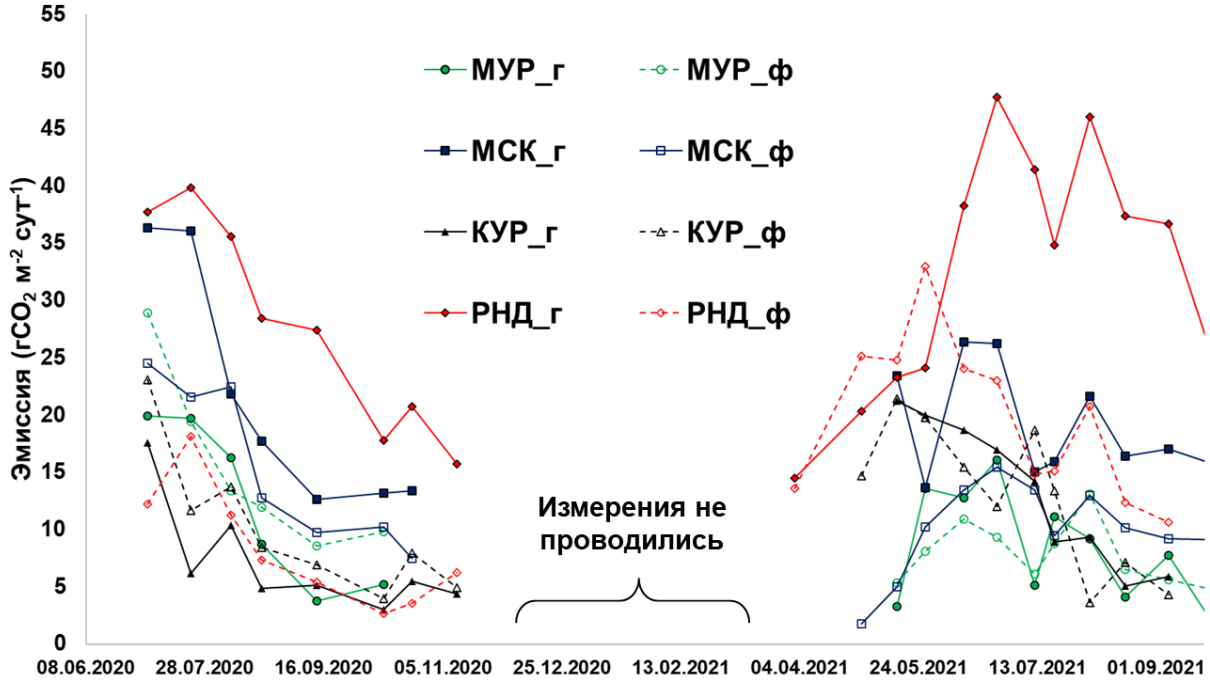


Рисунок 22 – Динамика эмиссии CO_2 городскими и фоновыми почвам в различных биоклиматических зонах в 2020-2021 годах (см. обозначения рис. 20-21)

Соотношение годовой микробной эмиссии CO_2 (с учетом доли МД в общем дыхании, показанной в Главе 5) и запасов углерода в почве можно считать

упрощенным аналогом коэффициента биодеструкции и использовать для расчета $T_{0.5}$. Значения $T_{0.5}$ для городских почв Мурманска было в три раза выше, чем для Ростова-на-Дону, что подтверждает выводы, основанные на их расчете по БД. В 2020 г. $T_{0.5}$ незначимо различался для городских и фоновых почв (за исключением Ростова-на-Дону), но чувствительность к климатическим изменениям 2021 г. у городских почв была выше — уменьшение $T_{0.5}$ на 25-40% для городских и на 10-20% — для фоновых почв всех регионов, за исключением лесотундровой подзоны (табл. 3).

Таблица 3 – Годовая эмиссия CO_2 (ЭМ) и запасы $C_{общ}$ (ЗС) (среднее и стандартное отклонение) в городских (г) и фоновых (ф) почвах вдоль зонального градиента в 2020 и 2021 гг. (см. обозначения рис. 20)

Объект	ЭМ (кг С м$^{-2}$), 2020	ЭМ (кг С м$^{-2}$), 2021	ЗС (кг С м-^{2}), 0-10 см	ЗС (кг С м-^{2}), профиль	$T_{0,5}$ (лет), 2020	$T_{0,5}$ (лет), 2021
МУР-г	0,48±0,11	0,47±0,06	5,1±0,9	28,4±6,7	14,7±7,1	15,1±7,9
МУР-ф	0,68±0,12	0,50±0,03	5,4±1,2	27,8±8,2	11,0±5,2	15,0±5,8
МСК-г	1,02±0,13	1,36±0,06	5,0±0,5	24,9±3,3	6,8±3,3	5,1±3,5
МСК-ф	0,60±0,08	0,69±0,04	3,6±0,3	13,7±2,8	5,9±4,4	5,1±3,9
КУР-г	0,50±0,06	0,97±0,08	3,2±0,2	31,8±5,8	8,9±4,8	4,6±4,2
КУР-ф	0,74±0,08	0,91±0,07	5,0±0,1	54,7±6,6	9,4±5,2	7,6±4,3
РНД-г	1,17±0,12	2,27±0,11	4,2±0,3	30,0±4,1	3,5±2,5	1,8±2,4
РНД-ф	0,45±0,07	1,34±0,08	4,5±0,3	39,3±5,7	14,1±7,7	4,7±6,5

Суммарные запасы $C_{орг}$ в Мурманске (освоенная территория 40,2 км^2) составили 550 тыс. тонн, при этом более половины их общего запаса содержалось в верхних 20 см (6,9 кгСм$^{-2}$). В центральной части города участки с высокими запасами (> 45 кгСм$^{-2}$) фрагментарны и относятся к довоенной застройке (преобладание деревянных строений) или к немногочисленным рекреационным зонам. На периферии города почвы с запасами выше 30 кгСм$^{-2}$ относятся к застройке начала 2000-х (рис. 23 А). Основной вклад в общий запас $C_{орг}$ на окраине города вносят верхние горизонты, а в его центре – слои ниже 30 см. Общие запасы углерода в почвах Московского мегаполиса составили 41,5 млн тонн, причем в Новой Москве они были в 2,5 раза выше по сравнении со «старой» Москвой (рис. 23 Б). Высокие запасы $C_{орг}$ в почве показаны для исторического центра (в основном, слои глубже 30 см), понижений рельефа и на

удалении от основных дорог. Запасы $C_{орг}$ в почвах под травянистой растительностью (в том числе, рудеральной) были выше, чем под деревьями и кустарниками, однако этот фактор оказался значимым только для слоя 0-30 см. Суммарные запасы $C_{орг}$ в Курске (площадь 192 км^2) составили 4,9 млн тонн. Удельные запасы $C_{орг}$ в почвах Курска были в два раза выше (25,4 кгСм$^{-2}$), чем в северных городах. Наибольшие запасы (≥50 кгСм$^{-2}$) показаны для районов малоэтажной застройки 50-70-х годов в районах, фоновыми почвами для которых являются глинисто-иллювиальные черноземы, а наименьшие - для новых районов на серых почвах (рис. 23 В). В Ростове-на-Дону (с учетом Аксая площадь 198 км^2) суммарные запасы углерода составили 2,2 млн тонн, а удельные – 11,1 кгСм$^{-2}$. Наиболее высокие запасы $C_{орг}$ показаны для рекреационных зон с доминированием древесной растительности (рис. 23 Г).

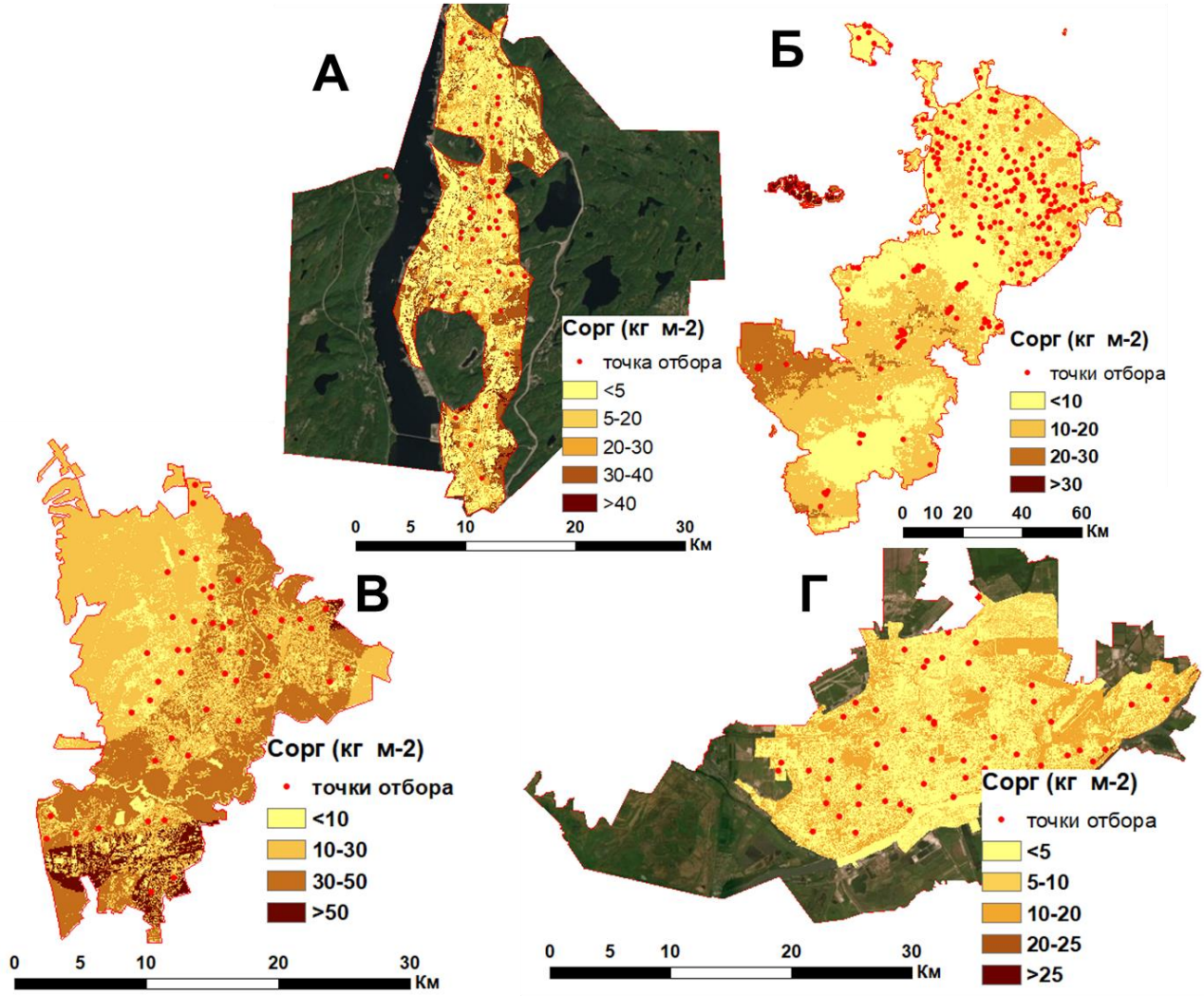


Рисунок 23 - Пространственное распределение удельных запасов $C_{орг}$ в почвах городов Мурманск (А), Москва (Б), Курск (В) и Ростов-на-Дону (Г).

Хотя построенные пространственные модели объяснили менее половины дисперсии запасов $C_{орг}$ в городских почвах (R^2_{adj} от 0,12 до 0,38; $p<0,05$), они были статистически значимыми и четко проиллюстрировали комплексность определяющих запасы факторов, что важно учитывать при оценке запасов углерода на региональном, национальном и глобальном уровнях.

ВЫВОДЫ

1. К основным механизмам формирования запасов углерода в городских почвах следует отнести следующие: внешнее поступление (завоз и распределение органогенных субстратов для озеленения и благоустройства), аккумуляция (поступление с растительными остатками) и консервация (долгосрочное пребывание в культурных слоях и на запечатанных территориях, как правило, в анаэробных условиях). Сочетание высокой скорости накопления и интенсивной биодеструкции органического вещества поверхностных горизонтов определяет значительную пространственную неоднородность и высокую чувствительность к изменениям условий среды.

2. Ежегодные поставки почвогрунтов порядка 1,35 млн $м^3$ определяют до 50% запасов углерода в слое 0-20 см почвенных конструкций Московского мегаполиса, однако от 30 до 70% этих запасов минерализуется в течение первых трех лет за счет высокой биодеструкции. Негативное воздействие на баланс углерода в почвенных конструкциях оказывает как специфика гидротермических условий (температура выше 30ºС при влажности в диапазоне 30-70% полной влагоемкости) за счет увеличения в 3-10 раз по сравнению со стандартными условиями времени полуразложения $T_{0.5}$, так и антропогенная нагрузка за счет снижения прироста растительной биомассы из-за загрязнения и засоления.

3. Почвенные конструкции газонов (от 2 месяцев до 3 лет с момента создания) следует считать нетто-источниками углерода за счет преобладания микробной эмиссии CO_2 над приростом биомассы. Технологические решения

почвенного конструирования (мощность органогенного горизонта более 10 см или экранирование торфа слоем песка) снижают потери углерода.

4. Функциональная зона, удаленность от центра и тип растительности – основные факторы, определяющие пространственную неоднородность гидротермических условий и эмиссии CO_2 почвами Москвы и Курска. Среднегодовая эмиссия CO_2 почвами городских газонов на 20-30% превышает таковую под древесно-кустарниковыми насаждениями при большем вкладе корневого дыхания (до 50% для травянистой растительности и 20-40% для древесно-кустарниковой).

5. Городской остров тепла в Москве увеличивает интенсивность биодеструкции органических соединений почвенных конструкций на 10-15%, что может привести к эмиссии до 16 тыс. тонн С $год^{-1}$ (по данным мезоклиматического моделирования за май-октябрь 2019 г.).

6. Запечатывание почв снижает почвенные запасы углерода в слое 0-100 см как напрямую (снятие и перераспределение плодородного слоя), так и опосредованно (через интенсификацию городского острова тепла). Запечатывание почв территории Новой Москвы привело к потере до 1,1 млн тонн почвенного углерода с 1971 по 2017 гг. При этом в культурных слоях (глубже 200 см) исторической части города за сотни лет аккумулируется и консервируется до 100 кг$См^{-2}$, формируя наиболее значительные и устойчивые запасы почвенного углерода в городе.

7. Урбанизация может приводить как к снижению, так и к увеличению запасов углерода в почве в зависимости от соотношения запечатанных и занятных растительностью территорий, а также от климатических условий и преобладающего типа фоновых почв. Прогнозируемое увеличение площади урбанизированных территорий Московской области к 2050 г. на ~ 3300 $км^2$ может привести к увеличению запасов углерода в верхнем 0-10 см слое почв на 400 тыс. тонн, а в слое 10-150 см на 4-10 млн тонн.

8. В зональном ряду от лесотундры до степи общие запасы углерода в профиле городских почв увеличиваются, а в верхнем 0-10 см слое –

уменьшаются. Эмиссия CO_2 почвами Ростова-на-Дону была в 3 раза выше, а время полуразложения – в 2,5 раза ниже по сравнению с почвами Мурманска. При этом запасы углерода в городских почвах менее устойчивы к климатическим изменениям по сравнению с фоновыми аналогами: в жаркое лето 2021 г. биодеструкция органических соединений в почвах городов увеличилась на 25-40%, а фоновых территорий – на 10-20% по сравнению со среднемноголетними значениями. Пространственная неоднородность запасов углерода городских почв детерминируется сочетанием природных (рельеф, растительность, тип почвы) и специфичных для городов (функциональное и историческое зонирование) факторов.

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI:

1. Dvornikov Y.A., **Vasenev V.I.**, Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., 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 — № 115039. – DOI:10.1016/j.geoderma.2021.115039. SJR Scopus (2022) = 1,933. — количество печатных листов (п.л.) — 1,8; личный вклад — 0,7 п.л.

2. **Vasenev V.**, Varentsov M., Konstantinov P., Romzaykina O., Kanareykina I., Dvornikov Y., Manukyan V. Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis // The Science of the Total Environment. — 2021. — V. 786. — № 147457. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147457. SJR Scopus (2022) = 1,946. — 0,9 п.л.; 0.6 п.л.

3. **Vasenev V.I.**, Slukovskaya M.V., Paltseva A.A., Korneykova M.V., Vasenev I.I., Romzaykina O.N., Ivashchenko K.V. et al. Anthropogenic soils and landscapes of European Russia: Summer school from sea to sea — A didactic prototype // Journal of Environmental Quality. — 2021. — V. 50. — № 1. — P. 63-77. DOI:10.1002/jeq2.20132. SJR Scopus (2022) = 0,803. — 1,0 п.л.; 0,6 п.л.

4. Ivashchenko K., Ananyeva N., Selezneva A., Sushko S., Lepore E., **Vasenev V**., Demina S., Khabibullina F., Vaseneva I., Dolgikh A., Dovletyarova E., Marinari

S. Assessing Soil-like Materials for Ecosystem Services Provided by Constructed Technosols // Land. — 2021. — V. 10. — № 11. DOI: 10.3390/land10111185. SJR Scopus (2022) = 0,647. — 1,5 п.л.; 0,6 п.л.

5. Korneykova M.V., **Vasenev V.I.**, Nikitin D.A., Soshina A.S., Dolgikh A.V., Sotnikova Y.L. Urbanization affects soil microbiome profile distribution in the Russian arctic region // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2021. — V. 18 (21). — № 11665. DOI: 10.3390/ijerph182111665. SJR Scopus (2022) = 0.818.— 1,9 п.л.; 0,8 п.л.

6. Romzaykina O.N., **Vasenev V.I.**, Paltseva A., Kuzyakov Y.V., Neaman A., Dovletyarova E.A. Assessing and mapping urban soils as geochemical barriers for contamination by heavy metal(loid)s in Moscow megapolis // Journal of Environmental Quality — 2021. — V. 50 (1), pp. 22-37. DOI: 10.1002/jeq2.20142. SJR Scopus (2022) = 0,803. — 1,0 п.л.; 0,4 п.л.

7. Slukovskaya M.V., **Vasenev** V.I., Ivashchenko K.V., Dolgikh A.V., Novikov A.I., Kremenetskaya I.P., Ivanova L.A., Gubin, S.V. Organic matter accumulation by alkaline-constructed soils in heavily metal-polluted area of Subarctic zone // Journal of Soils and Sediment — 2021. — V. 21 (5), pp. 2071–2088. DOI: 10.1007/s11368-020-02666-4. SJR Scopus (2022) = 0,900. — 1,8 п.л.; 0,6 п.л.

8. Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., **Васенев В.И.** Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. — 2020. — № 10. — С. 1276 – 1286. DOI: 10.31857/s0032180x20100044. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,1 п.л.; 0,3 п.л.

9. Брянская И.П., **Васенев В.И.**, Брыкова Р.А., Маркелова В.Н., Ушакова Н.В., Госсе Д.Д., Гавриленко Е.В., Благодатская Е.В. Анализ ввозимых почвогрунтов для прогнозирования запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса // Почвоведение. — 2020. — № 12. — С. 1537 – 1546. DOI:10.31857/S0032180X20120047. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1.1 п.л.; 0,4 п.л.

10. Gavrichkova O., Brugnoli E., Calfapietra C., Brykova R.A., Cheng Z., Kuzyakov Y., **Vasenev V.I.**, Liberati D., Moscatelli M.C., Pallozzi E. Secondary soil

salinization in urban lawns: Microbial functioning, vegetation state, and implications for carbon balance // Land Degradation and Development. — 2020. — № 17. — P. 2591-2604. DOI:10.1002/ldr.3627. SJR Scopus (2022) = 1,145. — 1,7 п.л.; 0,4 п.л.

11. Matasov V., Marchesini L.B., Yaroslavtsev A.M., Sala G., Fareeva O., Seregin I., Castaldi S., **Vasenev V.**, Valentini R. IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges // Forests. — 2020. — V. 11 (7). — №. 775.19. DOI:10.3390/f11070775. SJR Scopus (2022) = 0,650. —1,9 п.л.; 0,5 п.л.

12. Deeb M., M. Groffman P., Perl Egendorf S., Blouin M., L. Cao D., Vergnes A., Walsh D., **Vasenev V.**, Morin T., Séré G. Using constructed soils for green infrastructure - Challenges and limitations // SOIL. — 2020. — V. 6. — № 2. — P. 413-434.15. DOI:10.5194/soil-6-413-2020. SJR Scopus (2022) = 1,894. — 2,8 п.л.; 0,7 п.л.

13. Sushko S., Ananyeva N., Ivashchenko K., Kudeyarov V., **Vasenev V.** Soil CO_2 emission, microbial biomass, and microbial respiration of woody and grassy areas in Moscow (Russia) // Journal of Soils and Sediments. — 2019. — V. 19. — № 8. — С. 3217 – 3225. DOI:10.1007/s11368-018-2151-8. SJR Scopus (2022) = 0,900. — 1,0 п.л.; 0,3 п.л.

14. Ivashchenko K., Ananyeva N., Sushko S., Seleznyova A., Kudeyarov V., **Vasenev V.** Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning // Soil and Environment. — 2019. — V.38 — №1. — P. 31-41. DOI:10.25252/SE/19/61524. SJR Scopus (2022) = 0,223. — 1,1 п.л., 0,3 п.л.

15. **Vasenev V.I.**, Yaroslavtsev A.M., Vasenev I.I., Demina S.A., Dovltetyarova E.A. Land-Use Change in New Moscow: First Outcomes after Five Years of Urbanization // Geography, Environment, Sustainability. — 2019. — V. 12. — № 4. — P. 24-34. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-89. SJR Scopus (2022) = 0,314. — 0,7 п.л.; 0,4 п.л.

16. **Васенев В.И.**, Ауденховен А.П.В., Ромзайкина О.Н., Гаджиагаева Р.А. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. — 2018.

— № 10. — С. 1177 – 1191. DOI: 10.1134/S0032180X18100131. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,5 п.л.; 1.0 п.л.

17. **Vasenev V.I.**, Stoorvogel J.J., Leemans R., Valentini R., Hajiaghayeva R.A. Projection of urban expansion and related changes in soil carbon stocks in the Moscow Region // Journal of Cleaner Production. — 2018. — V. 170. — P. 902-914. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.09.161. SJR Scopus (2022) = 1,981. — 2,0 п.л.; 1,4 п.л.

18. **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. DOI:10.1002/ldr.2944. SJR Scopus (2022) = 1,145. — 2,2 п.л.; 1,6 п.л.

19. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., **Vasenev V.I.**, Smagina M.V. Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention // Materials. — 2018. — V. 11 (10). — №. 1889.21. DOI:10.3390/ma11101889. SJR Scopus (2022) = 0,563. — 1,8 п.л.; 0,5 п.л.

20. Sarzhanov D.A., **Vasenev V.I**., Vasenev I.I., Morin T., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V. Carbon stocks and CO2 emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // Catena. — 2017. — V.158. — P. 131-140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.021. SJR Scopus (2022) = 1, 472. — 1,6 п.л.; 0,8 п.л.

21. Shchepeleva A.S., **Vasenev V.I.**, Mazirov I.M., Vasenev I.I., Prokhorov I.S., Gosse D.D. Changes of soil organic carbon stocks and CO_2 emissions at the early stages of urban turf grasses' development // Urban Ecosystems. — 2017. — V. 20. — № 2. — P. 309-321. DOI: 10.1007/s11252-016-0594-5. SJR Scopus (2022) = = 0,811. — 1,5 п.л.; 0,7 п.л.

22. Саржанов Д.А., **Васенев В.И.**, Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р. Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO_2 почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. — 2015. — № 4. — С. 469 – 578. DOI: 10.7868/S0032180X15040097. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,0 п.л.; 0,4 п.л.

23. **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. — № 1. — P. 103-115.41. DOI:10.1016/j.geoderma.2014.03.007. SJR Scopus (2022) = 1,933. — 1,9 п.л.; 1,3 п.л.

24. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., **Васенев В.И.**, Кудеяров В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. — 2014. — № 9. — С. 1077 – 1088. DOI:10.7868/S0032180X14090056. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,2 п.л.; 0,4 п.л.

25. **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. DOI: 10.7868/S0032180X13060117. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,1 п.л.; 0,8 п.л.

26. **Васенев В.И.**, Ананьева Н.Д., Иващенко К.В. Влияние поллютантов (тяжелые металлы, дизельное топливо) на дыхательную активность конструктоземов // Экология. — 2013. — № 6. — С. 436 – 445. DOI: 10.7868/S0367059713060115. IF по РИНЦ = 1,553. — 0,9 п.л.; 0,6 п.л.

27. **Vasenev V.I.**, Stoorvogel J.J., Vasenev I.I. Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region // Catena. — 2013. — V. 107. — P. 96-102.74. DOI: 10.1016/j.catena.2013.02.009. SJR Scopus (2022) = 1, 472. — 1,0 п.л.; 0,8 п.л.

28. **Васенев В.И.**, Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Особенности экологического функционирования конструктоземов на территории Москвы и Московской области // Почвоведение. — 2012. — № 2. — С. 224 – 235. IF по РИНЦ (2022) = 2,880. — 1,2 п.л.; 0,8 п.л.

Полный список опубликованных работ имеется на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА» https://istina.msu.ru/profile/vivat86/