

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи



РОМЗАЙКИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗНООБРАЗИЯ
ЭКОСИСТЕМНЫХ СЕРВИСОВ ГОРОДСКИХ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ
МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА**

Шифр и наименование научной специальности: 03.02.08– экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в департаменте Ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем Аграрно-технологического института ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов.

Научный руководитель *Васенев Вячеслав Иванович, кандидат биологических наук, PhD, доцент департамента ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем Аграрно-технологического института ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов*

Официальные оппоненты: *Макаров Олег Анатольевич – доктор биологических наук, профессор, факультет почвоведения ФГБОУ ВО МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра эрозии и охраны почв, заведующий кафедрой*
Абакумов Евгений Васильевич – доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии биологического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
Хасанова Резеда Фиргатовна – доктор биологических наук, доцент, в.н.с. лаборатории экологии и рационального природопользования Сибайского филиала ГАНУ "Институт стратегических исследований Республики Башкортостан"

Защита диссертации состоится «07» декабря 2021 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.03.05 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: natalia_kovaleva@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/396294293/>

Автореферат разослан «27» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



Н.О. Ковалева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Урбанизация приводит к значительным и часто необратимым изменениям окружающей среды, включая климат, растительность и почву (Sharma et al, 2016; Pickett et al., 2011). Городские почвы формируются в условиях постоянного антропогенного воздействия (запечатывание, загрязнение, переуплотнение, засоление, перемешивание и перемещение верхних горизонтов) и существенно отличаются от естественных аналогов по свойствам, процессам и функциям (Lehman and Stahr, 2010; Vasenev et al., 2017; Мосина, 2002; Мосина и др., 2014). Изначально городские почвы изучались в контексте их загрязнения, деградации и сопряженных с этим рисков для здоровья населения (Курбатова и др., 2004; 2003; Poggio and Vrscaj, 2009; Wei and Yang, 2010; Мосина и др., 2012; Яшин и др., 2014). Современные концепции устойчивого развития, напротив, основное внимание уделяют роли почв в устойчивом функционировании городских экосистем как основы для обеспечения качества жизни в городе (Teixeira da Silva et al., 2018; Васенев и др., 2018; Calzorari et al., 2020). Наиболее востребованным современным эколого-экономическим подходом к анализу окружающей среды и ее компонентов является концепция экосистемных сервисов (услуг) (МА, 2003; ТЕЕВ, 2010; Haines-Young and Potschin-Young, 2018). Несмотря на то, что изначально почвенным экосистемным сервисам не уделялось достаточного внимания (Breure et al., 2012), во многих современных исследованиях подход успешно применяется для оценки почвенных ресурсов (Robinson et al., 2013; Dominati et al., 2014), расчета ущерба от деградации (Цветнов и др., 2019, 2021), поддержки принятия решений в сфере рационального природопользования (Blanchart et al., 2018). Оценка экосистемных сервисов городских почв осложняется отсутствием объективных индикаторов для качественной и количественной оценки, а также высокой пространственной неоднородностью городских почв. Которая, в свою очередь, обусловлена сложным сочетанием естественных и антропогенных факторов, а их набор и степень проявления меняется в зависимости от пространственного уровня анализа. Московский мегаполис, где реконструкция, реновация и расширение территории имеет практически перманентный характер, представляется наиболее перспективным объектом исследования пространственных закономерностей экосистемных сервисов городских почв как важной составляющей прогнозирования устойчивости урбоэкосистем с учетом различных сценариев развития территории и глобальных изменений.

Цель работы – анализ и экологическая оценка экосистемных сервисов городских почв Московского мегаполиса на различных пространственных уровнях (от локального до субрегионального).

Задачи исследования:

1. Изучить существующие подходы экологической оценки экосистемных сервисов почв, их классификации, индикаторы и методы пространственного анализа и картирования на основе современных геоинформационных технологий.

2. Проанализировать свойства и экологические функции городских почв, включая параметры устойчивости органического углерода, загрязнение тяжелыми металлами и буферную способность как основу для оценки их экосистемных сервисов на локальном, городском и субрегиональном уровнях.

3. Используя современные методы экспресс-анализа, оценить пространственную неоднородность экосистемных сервисов городских почв на локальном уровне на примере университетского кампуса.

4. Дать экологическую оценку факторам пространственного разнообразия экосистемных сервисов почв Москвы (в границах до 2012 г.).

5. Оценить влияние истории землепользования и современного функционального зонирования на изменение свойств и экосистемных сервисов почв ТиНАО г. Москва (Новой Москвы).

6. Провести сравнительный анализ факторов пространственной неоднородности экосистемных сервисов городских почв и опыта применения геоинформационных технологий в их оценке для информационного обеспечения принятия решений по устойчивому развитию почвенных ресурсов города.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования являлись городские почвы Московского мегаполиса, изученные на разных пространственных уровнях. *Предметом* исследования стали физико-химические и микробиологические свойства городских почв, разработанные на их основе индикаторы экосистемных сервисов городских почв и факторы их пространственного разнообразия, включая естественные (климат, рельеф, растительность, фоновые почвы) и антропогенные (запечатанность, загрязнение, функциональное и историческое зонирование).

Научная новизна. В работе предложены почвенно-экологические индикаторы для пространственного анализа и оценки экосистемных сервисов городских почв, что является необходимым связующим звеном между исследованиями отдельных свойств городских почв и оценкой экосистемных сервисов, основанных преимущественно на косвенных факторах (тип землепользования и характеристики земной поверхности). Выявлены основные факторы пространственной неоднородности экосистемных сервисов на локальном (мероприятия по содержанию зеленых насаждений, удаленность от основных дорог), городском (запечатанность, эффект городского острова тепла)

и субрегиональном (история землепользования, функциональное зонирование, удаленность от центра) уровнях. Показано, что существующие подходы к экологическому нормированию не всегда объективно позволяют оценить экосистемные сервисы городских почв, в частности, недооценивают их способностью служить геохимическим барьером для тяжелых металлов, но переоценивают устойчивость органического вещества.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аккумуляция (секвестрация) углерода и геохимический барьер поглощения тяжелых металлов – ключевые экосистемные услуги городских почв, экологическая оценка которых необходима для поддержки принятия решений в сфере устойчивого развития города.

2. Существующие практики экологического нормирования почв Москвы без учета эффективности экосистемного сервиса геохимического барьера могут привести к завышению рисков загрязнения в центральной части города и их занижению в лесопарковых зонах на окраинах.

3. Пространственная оценка сервиса аккумуляции углерода отражает повышенные риски потенциальной эмиссии парниковых газов почвенными конструкциями на основе торфо-песчаных смесей в селитебных и рекреационных зонах г. Москвы под воздействием городского острова тепла.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты формируют более объективное представление о свойствах, экологических функциях и экосистемных сервисах городских почв и закономерностях их пространственного распределения. Данные могут быть ценным дополнением как к существующим подходам оценки экосистемных сервисов (например, TEEB, CICES), так и к субрегиональным и глобальным моделям почвенных свойств (S-world, WISE), в которых информация о городских почвах, как правило, очень ограничена. Практическое применение результатов работы может позволить дополнить и скорректировать существующие подходы к мониторингу, оценке и нормированию городских почв, в частности, их пространственной экстраполяции с учетом неоднородности территории Московского мегаполиса. Разработанные подходы к пространственному анализу и картографированию экосистемных сервисов городских почв могут быть востребованы для решения задач поддержания и улучшения качества городской среды органами местного самоуправления поселений и городских округов, в частности, задач оценки устойчивости и комфортности городской среды (распоряжение Правительства РФ от 5 ноября 2019 г 7 № 2624-р).

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследований основаны на экспериментальных данных, полученных автором на

базе международного научного центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН с использованием методов полевого и лабораторного анализа, статистической и геостатистической обработки. Материалы работы были представлены *на российских и международных конференциях: XX, XXII и XXIII Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2017, 2019, 2020); XXV Pedometrics 2017 (Вагенинген, Нидерланды, 2017); V конференции «Математическое моделирование в экологии «ЭкоМатМод-2017» (Пушино, 2017); VII конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование» (Москва, 2018); SSC (Москва, 2018); 9-м и 10-м международных конгрессах SUITMA в Москве (2017) и Сеуле (Южная Корея, 2019).*

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 работы: 10 статей в научных журналах (из них 9 – включены в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 2 – рекомендованы ВАК), 1 методическое пособие и 13 тезисов в сборниках отечественных и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, обзор литературы (Глава I), описание объектов и методов исследования (Глава II), результаты и их обсуждение (Главы III - VI), заключение, список литературы. Диссертация изложена на 133 страницах, содержит 20 таблиц и 40 рисунков. Список литературы включает 223 источника, из них 79 – отечественные и 144 – иностранные.

Личный вклад автора. Автор изучил и обобщил литературные и нормативные данные, связанные с темой диссертационного исследования, выполнил все полевые измерения, отбор почвенных образцов и их лабораторные анализы, а также работы по статистической обработке и анализу данных, расчету индикаторов для оценки экосистемных сервисов, разработке и составлению карт при помощи ГИС-методов.

Благодарности. Автор выражает огромную благодарность научному руководителю В.И. Васеневу за помощь на всех этапах выполнения исследования и бесценный опыт в подготовке научных публикаций и докладов конференций. Автор признателен за советы и обсуждение результатов Р.А. Брыковой и К.В. Иващенко, а также коллектив центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» АТИ РУДН за помощь и всестороннюю поддержку. Работа выполнена при поддержке проекта РУДН «Аспирант полного дня», реализуемой в рамках программы «5-100». Исследования на различных этапах частично финансировались за счет средств грантов РФФИ № 18-35-20052 мол_а_вед и № 19-29-05187 мк и гранта РНФ № 19-77-30012.

ГЛАВА I. Экологические функции и экосистемные сервисы городских почв.

Почва - один из ключевых компонентов природных, природно-антропогенных и антропогенных экосистем (Ковда, 1985; Glanz, 1995; Добровольский, Никитин, 1990, 2000, 2012; Blum, 2005). Как объект юридических и экономических взаимоотношений почва рассматривается в более широком контексте, являясь частью земель. Помимо почвенного покрова земли характеризуются пространством, рельефом, климатом, растительностью, недрами и водами (ГОСТ 26640-85). Таким образом, оценки почв и земель неразрывно связаны, так как почва является одним из компонентов, влияющих на стоимостную и качественную характеристику земель, которые в свою очередь являются основой хозяйственной и иной деятельности.

Более широкую и комплексную оценку почвенные ресурсы получили после появления учения о почвенных функциях и концепции экосистемных сервисов. Вместе с развитием этих учений возросла и значимость почвы в экосистеме. Так, например, в 1992 году американские исследователи Дрегне и Чоу оценили ущерб лишь от потери продуктивности земель в 42 миллиарда долларов в год на глобальном уровне (Dregne and Chou, 1992), однако, после расширения спектра почвенных экосистемных сервисов и функций, ущерб от деградации земель увеличился от сотен миллиардов до десятков триллионов долларов (LADA, 2020; Costanza et al., 2014).

Концепция экосистемных сервисов (ЭС) пришла на смену экстенсивной политике бесплатных природных благ в середине 1950-х годов. Определение термину «Экосистемные сервисы (услуги)» как выгоды, которую человек напрямую или косвенно может получить от экосистемы, было дано в работе «The value of the world's ecosystem services and natural capital» (Constanza et al., 1997). В рамках развития этой концепции с начала 2000-х годов основная работа американских и европейских экономистов была нацелена на разработку методик, которые позволили бы оценить блага экосистемы, не имеющих цены, например, регулирование климата и обезвреживание отходов (Krieger, 2001). С появлением новых исследований классификация экосистемных сервисов несколько менялась и расширялась (De Groot et al., 2002; MEA, 2005; ТЕЕВ, 2010), но она по-прежнему включает в себя четыре основные категории: обеспечивающие; регулирующие; поддерживающие и культурные сервисы.

В процессе перехода концепции экосистемных сервисов от теории к практическому применению и разработки качественных и количественных подходов к их оценке, роль почвенных свойств и функций возросла, что и отразилось в уточненных и дополненных современных классификациях (CICES, 2017). Однако, сложность оценки экосистемных сервисов городских

почв была связана не только с их пестротой и динамикой, но и со сложившимся восприятием почв города как загрязненных, переуплотненных, обладающих низкой микробиологической активностью, другими словами, сильно деградированных почв (Курбатова и др., 2004; McKinney, 2006). Сильный импульс в области исследования роли городских почв в эффективности экосистемных сервисов был дан после публикации работы «Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs)» (Morel et al., 2015). При этом, в зависимости от функционального назначения одни и те же группы почв выполняют как сервисы, так и обратные им диссервисы.

Стоит отметить, что именно для городских территорий пространственная оценка экосистемных сервисов городских почв с применением геоинформационных систем (ГИС) становится наиболее востребованным методом анализа и подачи информации. Тесное соседство открытых и закрытых пространств, озелененных и неблагоустроенных кластеров, а также пестрота функциональных зон, усложняют эту задачу, но вместе с тем, учет этих факторов, делает такие исследования наиболее интересными для конечного потребителя и полными для оценки роли городских почв на субрегиональном и глобальном уровнях (Effland and Pouyat, 1997; Roussel et al., 2018; Blanchart et al., 2018).

ГЛАВА II. Объекты и методы исследования.

Объектами исследования являлись городские почвы (урбостратоземы и урбо-стратифицированные дерново-подзолистые почвы по КПП (2004)) Московского мегаполиса, их свойства и экосистемные сервисы, изученные на локальном, городском и субрегиональном уровнях. На локальном уровне изучены почвы территории кампуса РУДН (Москва, ул. Миклухо-Маклая). На городском уровне исследовались почвы различных функциональных зон на территории Москвы в границах до 2012 г. (9 административных округов). На субрегиональном уровне были рассмотрены почвы Троицкого и Новомосковского административных округов (Новая Москва), включая новые (созданные после 2012 г.) и старые (организованные до 2012 г.) селитебные и рекреационные зоны населенных пунктов. Дерново-подзолистые и агро-дерново-подзолистые почвы (Retisols albic) лесных, пахотных и залежных экосистем Новой Москвы включены в анализ в качестве фона. Характеристики объектов обобщены в таблице 1 и на рисунке 1.

Выбор разномасштабных объектов позволил изучить факторы пространственного разнообразия экосистемных сервисов городских почв, влияние которых проявляется на различных пространственных уровнях. На

локальном уровне изучено влияние типа растительности, организации территории, мероприятий по уходу и содержанию. На уровне города в качестве основных факторов пространственной неоднородности изучены запечатанность территории, функциональное и историческое зонирование. Неоднородность почвенного покрова, история землепользования, размер и возраст поселений дополнили перечень факторов, изученных на субрегиональном уровне на примере Новой Москвы, как значительной территории, испытывающую интенсивную урбанизацию в период с 2012 года до настоящего времени.

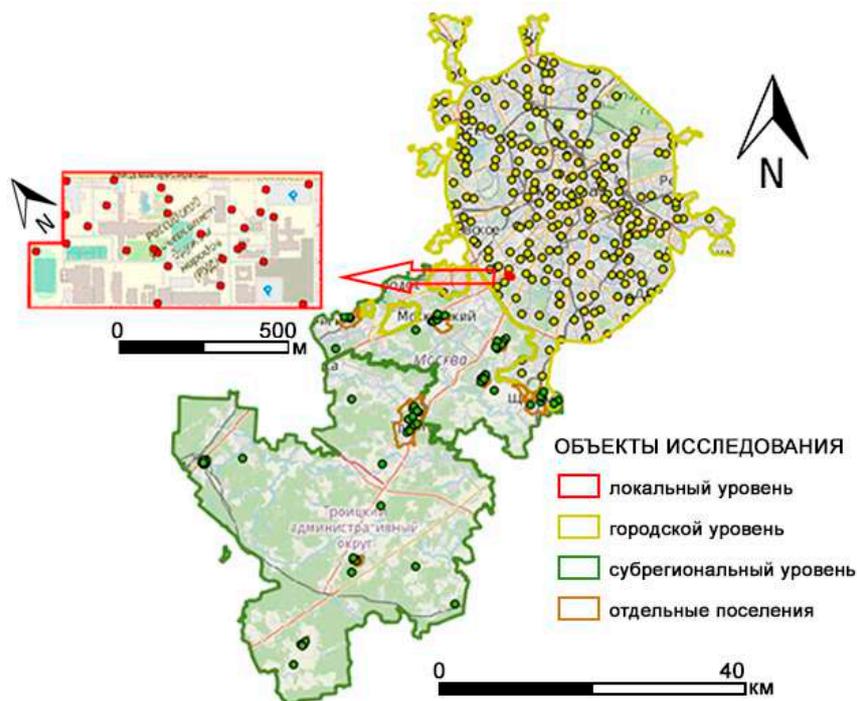


Рис.1 Схема расположения объектов исследования с точками пробоотбора

Таблица 1 Характеристика объектов исследования

Объект	Пространственный уровень	Площадь, км ²	Фактор разнообразия	Год обследования	Кол-во точек
Кампус РУДН	Локальный	0.4	Тип растительности, расстояние до источников антропогенной нагрузки	2020	30
Москва (в границах до 2012 г.)	Городской	1070	Запечатанность, функциональное зонирование	2018	224
ТиНАО	Субрегиональный	1480	Землепользование	2018-2019	74

Методы

Полевые исследования. Выбор участков обследования осуществлялся по стратифицированному рандомизированному методу - внутри каждой категории (тип растительности, функциональная зона и т.п.) участки для отбора проб

выбирались случайным образом. Выборка для каждого фактора варьировала от 5 до 30 точек в зависимости от масштаба исследования. На каждом участке смешанные почвенные образцы отбирались бурением с площадки 2×2 м методом конверта. Образцы для анализа химических свойств отбирались по горизонтам до глубины 50 см с последующим пересчетом показателей по мощностям 0-10 см, 10-30 см, 30-50 см. Образцы для микробиологического анализа отбирались в слое 0-10 см. Образцы для определения плотности почв отбирали с поверхности методом кольца по Качинскому. Для каждой точки проводилось полевое определение гранулометрического состава (метод Захарова), цвета (с использованием шкалы Мансела) и геопривязка в системе WGS 84 (GPS Garmin eTrex 10).

Анализ физико-химических свойств. Все образцы высушивали на воздухе и просеивали после удаления фрагментов корней и растений. Гранулометрический состав определяли методом пипетки (Шейн и Карпачевский, 2007), *плотность* – весовым методом после высушивания почвы (105°C, 8ч). *Содержание общего углерода* – методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе (Elementar vario TOC select), *содержание органического углерода (C_{org})* - бихроматным окислением с последующим титриметрическим анализом (Воробьева, 1998), рН_{H2O} - потенциометрическим методом (ЭКОТЕСТ - 2000, электрод сравнения и электрод “Эком-рН”). *Валовое содержание тяжелых металлов (ТМ)*, включая Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Mn и As было измерено методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP OES) с пробоподготовкой 3 мл HNO₃+ 2 мл HF + 1 мл HCl + 5 мл H₂O на 0.25 г, а для определения Hg использовался анализатор RA-915 с префиксом распыления RP-91C (М-МВИ-80-2008). На локальном уровне дополнительно к лабораторному анализу применялся экспресс-метод анализа содержания ТМ с использованием портативного рентген-флуоресцентного анализатора (pXRF Olympus Vanta). Измерения проводились в 3 повторностях с экспозицией 60 секунд после высушивания до воздушно-сухого состояния, гомогенизации и измельчения до размера частиц менее 2 мм. Комплексное загрязнение ТМ оценивалось по интегральным индексам, которые широко используются в российской и международной практике оценки качества почвы и экологического контроля: суммарный показатель загрязнения – Zc (МУ-2.1.7.730-99, 2013), индекс загрязнения - PI_{Nemerow} (Inengite et al. 2015) и индекс экологических рисков - PERI (Lim et al., 2008; Weissmannova & Pavlovsky, 2017).

Анализ микробиологических свойств. Микробиологические показатели измеряли для просушенных и просеянных через 1 мм образцов после предварительной инкубации при 50-60% полной влагоемкости (ПВ) (7 суток,

22°C). *Субстрат-индуцированное дыхание (СИД)* определяли по регистрации начального максимального выделения CO₂ из обогащенной глюкозой почвы (Anderson, Domsh, 1978). Навеску почвы 1 г (для торфа 0.5 г) помещали во флакон (15 мл), добавляли раствор глюкозы (0.1 мл г⁻¹, 5 мг глюкозы г⁻¹), герметично закрывали и инкубировали при 22°C в течение 3-5 ч. Затем определяли концентрацию CO₂ в газовой фазе флакона методом газовой хроматографии (Кристалл 2000). *Углерод микробной биомассы C_{мик}* (мкг С г⁻¹) определяли по формуле: СИД × 40.04 + 0.37 (Anderson and Domsh, 1978) с учетом концентрации CO₂ в газовой фазе флакона, ее объема, навески образца и времени его инкубации. *Базальное дыхание (БД)* почвы измеряли в образце почвы, инкубированном 24 ч при 22°C (ISO 16072:2002, Ananyeva et al., 2008) с добавлением в почву дистиллированной воды (0.1 мл г⁻¹) вместо глюкозы. БД выражали в мкг CO₂-С г⁻¹ ч⁻¹ и рассчитывали также на единицу площади почвы (г CO₂ м⁻² сут⁻¹) с учетом плотности ее верхнего 10-ти см слоя. *Микробный метаболический коэффициент* (удельное дыхание почвенных микроорганизмов) определяли по отношению БД / C_{мик} = qCO₂ (мкг С-CO₂ мг⁻¹ C_{мик} ч⁻¹).

Индикаторы и методы оценки экосистемных сервисов. Полученные данные о физико-химических и микробиологических свойствах почв использовались для оценки двух регулирующих экосистемных сервисов по классификации, предложенной Morel et al. (2015) для почв городских и техногенных территорий (SUITMA): 1) эффективность аккумуляции углерода и 2) эффективность геохимического барьера для загрязнения ТМ.

Эффективность аккумуляции углерода оценивали по константе биодеструкции (k) и времени оборачиваемости (T), рассчитанным на основании БД и содержания углерода в слое 0-10 см (Raich and Schlesinger, 1992; Smagin et al., 2018). Для оценки экосистемного сервиса использовалась трехбалльная шкала на основе параметра T: 1 балл (высокая эффективность) - для 10<T<30; 2 балла (средняя эффективность) – для 5<T<10 и 30<T<60; 3 балла (низкая эффективность) – для T <5 и T>60. Диапазон от 10 до 30 лет принят в качестве оптимума, поскольку включает медиану нормального распределения параметра T для всей выборки результатов исследования, т.е. характеризует наиболее типичное значения показателя для изученных городских почв Москвы. При этом диапазон включает значения, полученные для ненарушенных лесных экосистем Москвы и Московской области (Сусьян и др., 2009; Визирская, 2014; Иващенко, 2017), которые можно считать эталонными. Значения T ниже оптимальных свидетельствуют о низкой устойчивости запасов углерода и высоких экологических рисков эмиссии парниковых газов за счет быстрой минерализации (Shchepeleva et al, 2017; Smagin et al., 2018), в то время как

значения выше оптимальных могут указывать на низкую микробную доступность и низкую эффективность вовлечения углерода в биологический круговорот (Kuzyakov and Blagodatskaya, 2015).

Эффективность геохимического барьера оценивали на основании двух параметров: 1) загрязнение ТМ и 2) буферной способности, рассчитанной на основе гранулометрического состава, кислотности почвы и содержания органического вещества. Каждый из параметров оценивался по 3-балльной шкале. Загрязнение ТМ оценивался на основе фоновой концентрации для Московской области (СП 11-102-97, 1997) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК): 1 балл (низкое загрязнение) - содержание ТМ \leq фон; 2 балла (среднее загрязнение) - фон > содержание ТМ \leq ОДК; 3 балла (высокое загрязнение) – содержание ТМ > ОДК. Для оценки буферной способности почв гранулометрический состав, рН и $C_{орг}$ также были оценены по 3-балльной шкале. На основе общего предположения об иммобилизирующем воздействии физической глины на ТМ (Antoniadis et al., 2017) гранулометрического состава был оценен следующим образом: 1 балл (высокая буферная способность) - для торфа и глины, 2 балла (средняя буферная способность) - для суглинка, 3 балла (низкая буферная способность) - для супеси и песка. Комплексный эффект рН и $C_{орг}$ на подвижность каждого отдельного ТМ был оценен на основе детального литературного обзора, оценки в баллах обобщены в Таблице 2.

Таблица 2 Балльная оценка почвенных свойств (сочетание значений рН и $C_{орг}$) как параметров буферной способности почв к загрязнению отдельными металлами*

Металл	pH<5.5	pH<5.5	5.5<pH<7.5	5.5<pH<7.5	pH>7.5	pH>7.5
	$C_{орг}<4$	$C_{орг}>4$	$C_{орг}<4$	$C_{орг}>4$	$C_{орг}<4$	$C_{орг}>4$
Ni	2	2	1	1	1	1
Cu	3	3	1	1	2	2
Zn	3	3	2	2	1	1
Pb	2	1.5	1	0.5	1	0.5
Cd	3	2.5	2	1.5	1	0.5
As	2	1.5	2	1.5	3	2.5
Hg	3	3	2	2	2	2

*На основании данных источников: Новиков и Ахметова (2018); Кошелева и др. (2015); Kabata-Pendias (2011); Rotting et al. (2006); Gustafsson, Pechová, & Berggren (2003); Morin et al. (1999); Глазовская (1997); Scokart, Meeus-Verdinne, & De Borger (1983).

Итоговая оценка сервиса формирования геохимического барьера рассчитана как среднее гармоническое изученных параметров загрязнения и буферной способности (Romzaukina et al., 2021). При этом 1, 2 и 3 балла соответствуют высокой, средней и низкой эффективности геохимического барьера соответственно.

Статистическая обработка. Измерения физико-химических свойств выполняли в двух повторностях, измерение СИД и БД - в трех. Для сравнения средних значений двух выборок использовали критерий Стьюдента (t критерий), 3-х и более независимых выборок (функциональные зоны, землепользования, размер поселения) – однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) с последующим попарным множественным сравнением (критерий Тьюки). Взаимосвязь между физико-химическими и микробиологическими свойствами почв и их экосистемными сервисами оценивали на основе корреляции и регрессионного анализа. Статистическая обработка экспериментальных данных и их визуализация выполнена в программной среде R 3.5.1. и STATISTICA 8.

Пространственный анализ и моделирование. Выбор локаций точек пробоотбора проводился на основе разновременных снимков Google Earth, а также топографических карт 1971 и 1990 для субрегионального уровня с последующей привязкой и векторизацией (оцифровкой). Степень запечатанности и функциональное зонирование оценивалось на основе данных Open Street Map (OSM) с использованием инструментов геообработки и буферизации линейных объектов. Пространственный анализ и моделирование были основаны на принципах цифровой почвенной картографии (DSM), объединяющей методы интерполяции и экстраполяции (McBratney et al., 2003). Интерполяцию проводили по методу обратных взвешенных расстояний (IDW). Для экстраполяции проводили анализ зависимости моделируемой переменной (индикатора экосистемных сервисов) и независимых пространственных факторов (предикторов) по генерализованной модели регрессии (GLM). Для различных уровней учитывались следующие пространственные факторы: (рельеф (DEM SRTM), температура (мезоклиматическая модель COSMO-CLM), тип растительности (дешифрирование снимка Sentinel-2A MSI), история землепользования, функциональное зонирование, запечатанность и расстояние до дорог разных категорий (все по данным OSM и дистанционного зондирования), возраст застройки (data.nextgis.com/ru/moredata/). Конкретные факторы подбирались под каждую модель GLM методом обратной ступенчатой регрессии. Значимость факторов в полной модели проверялась по t-критерию и R^2_{adj} . Полученные уравнения регрессии использовались для построения карт экосистемных сервисов городских почв (разрешение 30 м), используя инструмент «Калькулятор раstra». Пространственный анализ и моделирование проводилось в программах ArcGIS Pro 2.5 и Quantum GIS 2.18. Валидация проводилась по независимой выборке (30% от общей выборки) по показателям ME, r, R^2 и MSD (Gaugh et al., 2003), а на локальном - методом кросс-валидации.

ГЛАВА III. Анализ неоднородности экосистемных сервисов почв университетского кампуса на основании лабораторных и экспресс-методов

Для университетских кампусов характерно сочетание различных категорий поверхности (запечатанные и открытые), типов растительности (газоны, деревья и кустарники), факторов антропогенной нагрузки и степени ее проявления, вследствие чего кампусы часто становятся объектами экологических исследований (Chen et al, 2014; Marrone et al., 2018; Goncharova et al., 2020). Для кампуса РУДН характерна хорошо развитая зеленая инфраструктура, благодаря чему он регулярно признается самым зеленым в России по версии UI GreenMetric. По данным съемки с БПЛА в апреле 2020 года на территории кампуса РУДН были выделены основные типы поверхностей, включая запечатанные и незапечатанные территории. Запечатанные территории, составившие 51.7%, в почвенное обследование не были включены, а для незапечатанных территорий были описаны почвы, характерные для участков ($n=30$) с доминированием газонной, кустарниковой и древесной растительности. Почвы кампуса можно отнести к рекреаземам и реплантоземам по классификации городских почв (Прокофьева и др., 2011). Верхний слой (0-10 см) был представлен преимущественно легким и средним суглинком с реакцией среды от нейтральной до щелочной и содержанием углерода от 2 до 3.5%. Анализ содержания тяжелых металлов (Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Mn) с использованием экспресс-метода pXRF выявил закономерности пространственного распределения, в частности локальные аномалии в зоне, прилегающей к ул. Миклухо-Маклая, и у парковки, в этих зонах концентрации Ni превышали ПДК в 4 раза. Валидация результатов в лаборатории на основе анализа валового содержания ТМ методом ICP OES показала значимую корреляцию и аналогичные пространственные закономерности (r от 0.6 до 0.9, $p < 0.05$) (Рис. 2). Использование поправочного коэффициента, полученного в эксперименте для влажности и гранулометрического состава, показало высокий уровень сходимости методов для медианы и интервального размаха точек.



Рис 2. Картограммы пространственного распределения ТМ (на примере Ni) на территории кампуса РУДН на основе разных методов оценки: pXRF, ICP и скорректированного pXRF (слева направо).

Суммарный показатель загрязнения Z_c на территории кампуса РУДН варьировал для большинства точек в пределах от 30 до 40, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения, а PI -1.2 ± 0.4 и $PI_{Nemerow} - 0.8 \pm 0.5$, что соответствует низкому уровню загрязнения и практически незагрязненным почвам. Таким образом, физико-химические свойства почвы определили ее высокую буферную способность, что в совокупности позволило оценить эффективность геохимического барьера на высоком уровне в диапазоне 1.2 – 1.7 баллов. Различия между устойчивостью почв в точках отбора для газонов (1.5 ± 0.1), деревьев (1.6 ± 0.2) и кустарников (1.6 ± 0.1) оказались незначимы.

Запасы углерода в почвах кампуса достаточно устойчивы – для большей части точек период T находится в оптимальном диапазоне от 10 до 30 лет. Исключение составляет зона, примыкающая к автомобильной мастерской, для которой характерна низкая микробная доступность углерода. Тип растительности не оказал значимого влияния на экосистемные сервисы почв кампуса, в то время как близость к источникам антропогенной нагрузки (элементы дорожно-тропиночной сети, автомастерская, проезжая часть) приводили к снижению оценки на 0.3-0.5 балла (рис. 3). Кросс-валидация показала высокую точность полученных картосхем - R^2 0.82 для и 0.75.

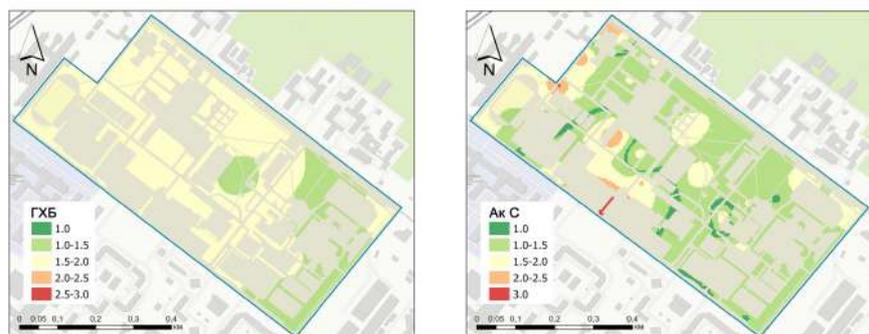


Рис 3. Картосхема эффективности экосистемных сервисов геохимического барьера (слева) и аккумуляции углерода (справа) на территории кампуса РУДН.

ГЛАВА IV. Пространственные закономерности экосистемных сервисов почв различных функциональных зон Москвы (городской уровень)

Для оценки пространственных закономерностей почвенных экосистемных сервисов на уровне города были изучены почвы в 224 точках, равномерно распределенных в черте города и характеризующих различные функциональные зоны. При высокой неоднородности почвенного покрова в промышленных, селитебных и общественных зонах доминировали рекреаземы, репланотоземы и собственно урбаноземы, а в рекреационных зонах и лесопарках – урбо-дерново-подзолистые почвы. Содержание C_{org} и рН почв лесопарков было значимо ниже, чем для других функциональных зон, где

преобладали нейтральные и слабощелочные почв со средним содержанием $C_{орг}$ от 5.5% для промышленных зон до 8.6% для общественных зон. При этом, в отдельных локациях содержание $C_{орг}$ в верхнем горизонте достигало 40%, что значительно превышает не только фоновые, но и нормативные значения (СП-514). По гранулометрическому составу преобладали легкосуглинистые и супесчаные почвы (Рис. 4). Базальное дыхание варьировало от 0.1 до 2.5 мкг $CO_2-C \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$, показав в среднем 0.7 ± 0.5 мкг $CO_2-C \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$. Наиболее высокие средние значения показаны для лесопарков и рекреационных зон, что соответствует закономерностям, выявленным в предыдущих исследованиях для Москвы (Васенев и др., 2012; Ivashchenko et al., 2019).

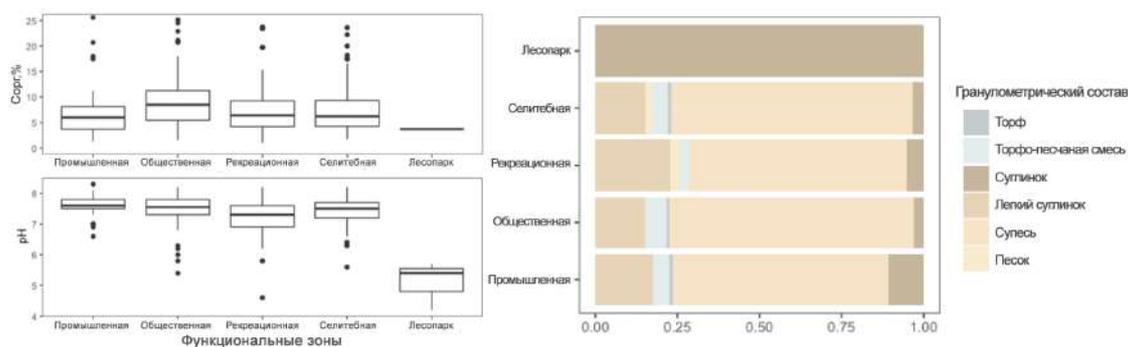


Рис. 4 Содержание органического углерода, кислотность и гранулометрический состав почв для разных функциональных зон Москвы.

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах Москвы варьировало в широких пределах - коэффициент вариации (CV) был выше 50%, а для Cd - 183%. Для As, Cu, Zn, Cd, Pb и Hg доверительный интервал 95% включал значения ОДК, что свидетельствует о потенциальном риске загрязнения для окружающей среды и здоровья населения. Наиболее высокие значения среднего содержания Zn, Pb и Cd показаны для промышленных и общественных зон. В почвах лесопарков содержание Zn, Cd, Pb и Hg было значимо ниже, а As – выше, чем в других зонах. В большинстве точек обследования показано комплексное загрязнение несколькими ТМ, при этом значимые положительные корреляции между концентрациями разных металлов (например, $r = 0,76$ для Zn и Cu; $r = 0,72$ для Cu и Cd; $r = 0,75$ для Ni и Cd) могут указывать на сходные источники загрязнения.

Пространственный анализ и моделирование экосистемных сервисов почв в масштабе города включал как интерполяцию (карты отдельных ТМ и гранулометрического состава), так и экстраполяцию (карты $C_{орг}$, pH и БД) полученных экспериментальных данных. Коэффициенты детерминации R^2_{adj} для генерализованной модели регрессии, используемой для экстраполяции, были статистически значимы ($p < 0.05$) и варьировали от 0.11 до 0.45, что подтверждает высокую пространственную неоднородность городских почв и

комплексность факторов, которые на них влияют. В то же время, результаты кросс-валидации и валидации по независимой выборке (R^2 от 0.4 до 0.9) показали высокую достоверность полученных карт. Основными пространственными факторами (предикторами), вошедшими в модели для всех показателей, были рельеф, расстояние до основных дорог и историческое зонирование. Пространственное распределение $C_{орг}$ и БД также зависло от типа поверхности.

Оценка эффективности экосистемного сервиса аккумуляции углерода подтверждает предположение о низкой устойчивости запасов углерода в городских почвах и почвенных конструкциях (Shchepeleva et al., 2017; Smagin et al., 2018). Оптимальные значения показаны для лесопарков и рекреационных зон, удаленных от центра, в то время как для центральной части города доминировали значения ниже оптимальных. Интересно, что наименьшее значение T показано для небольших скверов и дворовых территорий в центре города, где высокое содержание $C_{орг}$ совпадает с наиболее высокими средними температурами, обусловленными городским островом тепла (Varentsov et al., 2020), стимулирующими минерализацию. Эти «пятна» низкой эффективности аккумуляции углерода представляют значительный экологический риск повышенных эмиссии CO_2 , особенно в жаркий летний период. Анализ пространственных закономерностей сервиса эффективности геохимического барьера показывает зоны с наименьшей эффективностью в восточной части города и в рекреационных и лесопарковых зонах на севере и северо-западе. Интересно, что для центра города показана средняя эффективность. По-видимому, более высокое загрязнение компенсируется более высокой буферной способностью за счет высоких рН и $C_{орг}$, в то время как для слабокислых и бедных органическим веществом почв лесопарков даже относительно невысокие концентрации ТМ могут привести к значительным рискам (Рис.5).

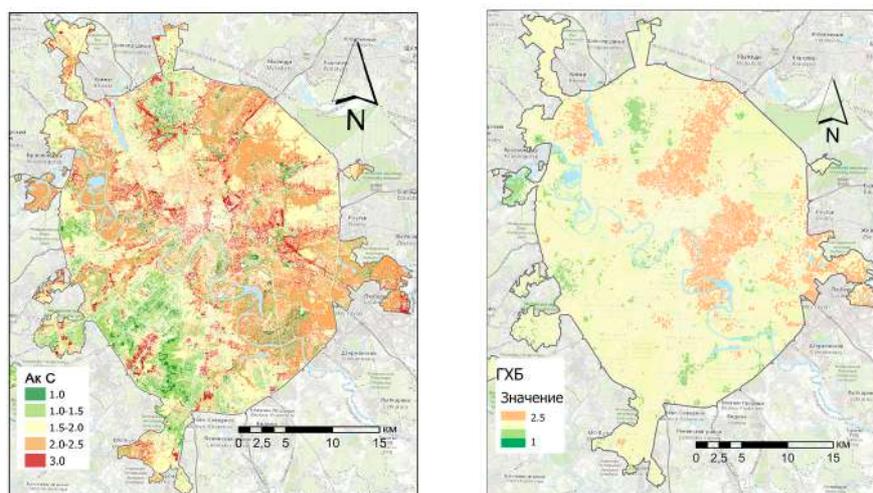


Рис. 5 Картосхема эффективности сервиса аккумуляции углерода (слева) и сервиса геохимического барьера (справа) на уровне города в слое 0-10 см.

ГЛАВА V. Влияние урбанизации на экосистемные сервисы почв Новой Москвы (субрегиональный уровень)

Новая Москва – уникальный объект, где на значительной площади идет стремительная урбанизация, а существенная территория бывших пахотных и залежных земель уже занята новыми рекреационными и селитебными территориями. В рамках итогового этапа исследований был про проведен сравнительный анализ почв старых и новых селитебных и рекреационных зон различных населенных пунктов, вошедших в состав Новой Москвы в сравнении с фоновыми почвами. Результаты обобщены в Таблице 3.

Таблица 4 Физико-химические свойства почв Новой Москвы: фоновые территории (залежь, лес), поле, рекреационные новые (РекН) и старые (РекС), селитебные новые (СелН) и старые (СелС). Результаты представлены сверху вниз для горизонтов 0-10 см, 10-30 см, 30-50 см. Для гранулометрического состава приведены наиболее часто встречаемые показатели: ЛС-легкий суглинок, СС-средний суглинок, ТС-тяжелый суглинок.

ФЗ	Грансостав	pH _{н2о}	С общ, %	Сu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mn, мг/кг	Ni, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг	Hg, мг/кг	Zc
Залежь/ Фон	ЛС	7.1±0.1	2.49±1.63	10.03±3.64	60.75±17.61	457.6±308.1	21.90±4.67	1.51±1.46	16.22±4.78	0.032±0.045	15.8±2.7
	ЛС	7.0±0.1	3.84±4.11	10.89±2.42	61.49±16.56	421.4±256.8	22.95±6.15	1.52±1.44	16.00±5.09	0.032±0.045	16.4±3.8
	СС	6.2±1.1	0.27±0.13	14.27±0.10	49.76±2.32	356.9±61.3	27.48±3.79	0.93±0.72	9.30±0.99	0.078±0.110	11.7±3.4
Лес/ Фон	ЛС	5.1±0.2	3.11±1.57	5.48±2.60	64.08±37.41	880.1±346.7	21.51±2.91	0.79±0.58	11.91±1.99	0.030±0.086	10.6±7.3
	Супесь	5.2±0.3	1.83±1.49	6.29±3.23	55.74±31.53	652.9±245.3	20.29±2.00	0.71±0.50	9.66±2.10	0.029±0.071	8.2±5.9
	Супесь	5.2±0.3	1.77±2.49	8.00±3.40	53.77±27.19	479.9±201.9	23.72±3.39	0.67±0.35	10.15±3.59	0.030±0.054	12.1±3.5
Поле/	Суглинок	5.9±1.2	1.38±0.14	5.99±2.87	46.50±12.76	387.2±248.2	18.74±5.54	0.97±0.79	12.58±1.02	0.031±0.053	8.5±6.6
	ЛС	5.0±1.1	0.83±0.62	5.86±2.81	47.14±14.59	424.4±249.4	19.17±4.89	0.84±0.60	10.62±2.10	0.024±0.023	8.8±8.2
	СС	6.0±1.0	2.54±2.87	6.00±1.46	48.42±15.65	454.8±203.8	20.17±4.31	0.72±0.42	8.25±2.89	0.018±0.031	6.7±4.4
РекН	ЛС	7.5±0.5	4.19±2.84	16.06±10.83	133.48±113.19	318.6±154.7	16.14±6.20	3.29±6.20	17.78±20.20	0.086±0.083	35.7±52.3
	Супесь; Глина	7.5±0.5	2.13±2.69	11.97±6.58	107.67±63.15	356.9±223.3	17.55±5.60	1.32±1.31	14.00±8.99	0.177±0.245	22.9±29.7
	Песок; Глина	7.6±0.6	4.35±5.47	11.66±5.38	89.18±42.25	354.2±216.1	19.09±6.02	1.09±1.07	14.69±6.09	0.170±0.337	12.7±18.6
РекС	ЛС	6.9±0.9	4.17±2.37	11.18±3.67	139.52±122.84	371.1±181.7	16.51±6.12	2.21±1.15	12.85±5.97	0.219±0.558	29.6±19.1
	Супесь; ЛС	7.0±1.0	3.71±5.79	11.33±4.40	121.37±71.79	387.6±232.0	16.71±8.04	1.77±0.91	14.55±8.16	0.111±0.112	25.5±17.2
	ЛС	6.9±1.1	4.71±3.99	11.84±3.74	113.54±59.43	288.1±96.1	17.46±6.16	1.83±0.91	9.86±4.95	0.120±0.178	25.5±19.1
СелН	ЛС; Супесь	7.6±0.4	3.30±2.31	11.31±8.29	123.39±91.06	196.2±82.8	12.98±5.36	2.00±1.19	8.61±6.24	0.120±0.157	26.9±23.15
	Песок; ЛС	7.8±0.4	2.88±3.52	10.34±11.18	132.35±236.53	213.0±101.5	13.70±5.67	1.99±1.59	7.05±4.69	0.168±0.436	29.1±25.0
	ТС; Глина	7.6±0.9	3.57±2.32	10.08±4.31	107.82±108.49	181.6±27.5	13.36±5.63	2.39±1.29	9.12±5.00	0.142±0.361	26.0±19.8
СелС	Супесь; ЛС	7.5±0.4	4.27±3.32	12.05±5.33	129.43±75.25	287.3±97.8	15.67±5.06	2.33±1.65	14.35±13.33	0.196±0.235	36.02±38.5
	ЛС	7.8±0.4	6.05±5.75	15.01±9.41	149.69±101.34	344.8±124.4	17.71±8.12	2.26±1.06	15.26±12.66	0.143±0.115	29.2±25.3
	СС; Глина	7.8±0.3	2.62±1.84	12.18±4.39	129.11±86.51	385.2±146.1	19.13±6.28	2.33±1.27	12.65±8.68	0.082±0.061	23.4±16.4

Для почв населенных пунктов Новой Москвы характерна нейтральная и слабощелочная реакция среды: рН варьирует от 6.1 до 7.8, что в среднем на единицу выше, чем для фоновых лесных территорий. Содержание $S_{\text{общ}}$ в городских почвах также на 30-50% выше, чем для фоновых территорий. Для селитебных зон характерны более высокие средние значения рН и $S_{\text{общ}}$, чем для рекреационных. Как правило, содержание $S_{\text{общ}}$ в новых селитебных зонах было выше для слоя 0-10 см и ниже для слоя 10-30 см, чем для старых, в то время как для рекреационных зон значимых отличий не было выявлено. Максимальные значения $S_{\text{мик}}$ и БД показаны для наименее нарушенных лесных и старых рекреационных зон. Средние значения рекреационных зон выше, чем селитебных, а новых – ниже, чем старых (рис. 6). Таким образом, негативное влияние антропогенной нагрузки на микробиологическую активность почв, показано и на субрегиональном уровне.

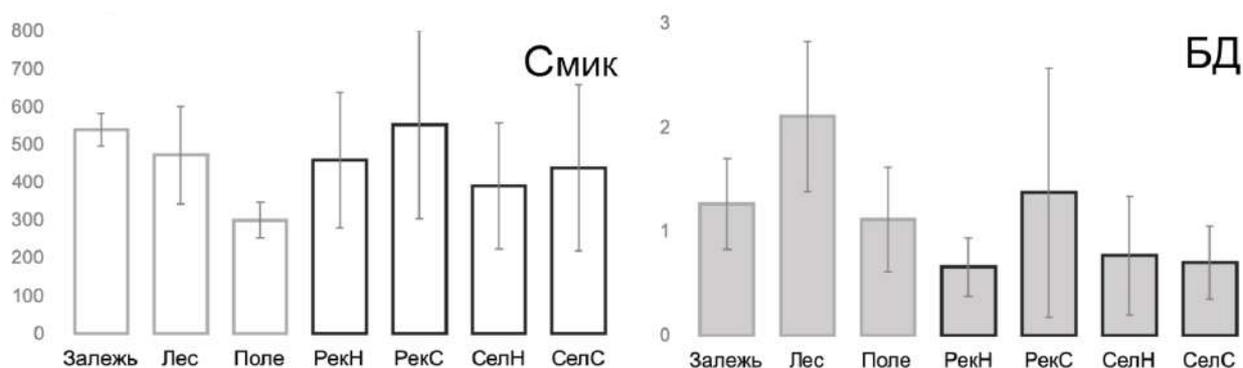


Рис. 6 Микробиологические свойства почв разных функциональных зон Новой Москвы. Единицы измерения для $S_{\text{мик}}$ - мкг С г⁻¹, БД - мкг СО₂-С г⁻¹ ч⁻¹.

Среднее содержание ТМ не превышало нормативных значений для фоновых почв, в то время как для городских почв содержание одного или нескольких ТМ превышало ОДК в 87 % случаев. Индекс Z_c для городских почв соответствует умеренному уровню загрязнения, а для новых рекреационных и старых селитебных зон в верхнем слое среднее значение превышает границу опасного уровня. Среди отдельных поселений наиболее высокие значения Z_c показаны для населенных пунктов с высокой плотностью автомобильной и железнодорожной сетей - пос. Кокошкино (44.5□35.4) в Северо-Западной части ТиНАО и г. Щербинка (46.1□19.4) в Восточной части ТиНАО, для этих населенных пунктов уровень загрязнения по показателю Z_c достиг опасного уровня. Уровень экологических рисков по оценке PERI для большинства населенных пунктов находится в опасном диапазоне от 300 до 600. В целом, для поселений, расположенных ближе к Москве и больших по площади, характерны превышения показателей по всем исследованным индексам.

Среднее значение экосистемного сервиса геохимического барьера почв Новой Москвы составляет 1.4 балла, что говорит о высокой эффективности почв и характеризует субрегиональный уровень исследования устойчивым к загрязнению. Высокое содержание углерода, нейтральная реакция среды и суглинистый гранулометрический состав определили более высокую эффективность сервиса для городских почв, чем для лесных, залежных и пахотных. В целом, пространственное распределение сервиса достаточно равномерное с максимальными значениями эффективности, показанными для Западной части в районе поселка Киевский. Карта эффективности аккумуляции углерода более контрастная. Оптимальные средние значения экосистемного сервиса аккумуляции углерода почвами на субрегиональном уровне исследования показаны для фоновых лесов (1.70) и залежей (1.69), а также старых рекреационных зон (1.87 баллов). В селитебных зонах параметр Т превышал фоновые значения, доходя до среднего показателя 43.2 года для новых и старых селитебных зон (рис. 7). Факторы, определившие неоднородность экосистемных сервисов почв Новой Москвы, частично совпадают с ранее изученными (рельеф, расстояние до основных дорог), однако по сравнению с Москвой значимым также становится фактор типа землепользования и растительности. Данные факторы в совокупности позволили объяснить до 45% от общей вариации параметров экосистемных сервисов (R^2_{adj} от 0.11 до 0.45), что является высоким показателем для большого и неоднородного по почвенно-экологическим условиям региона.

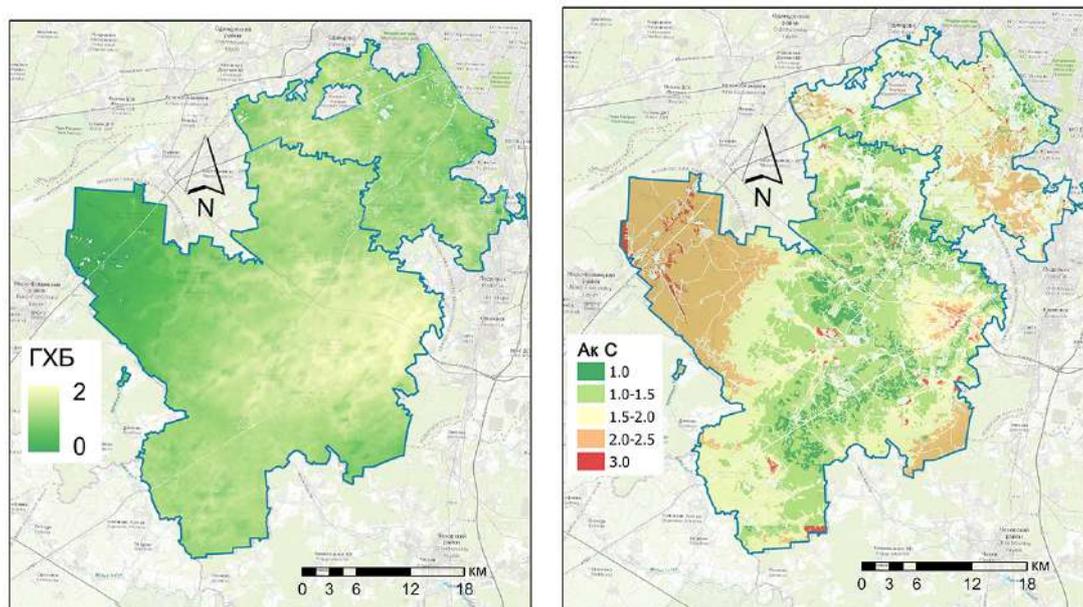


Рис 7. Картосхема эффективности сервиса геохимического барьера (слева) и аккумуляции углерода (справа) на территории ТиНАО в слое 0-10 см.

ГЛАВА VI. Применение оценки экосистемных сервисов почв для задач устойчивого развития города: перспективы и ограничения

В заключительной главе рассмотрены факторы неоднородности экосистемных сервисов почв на различных пространственных уровнях, проанализированы преимущества и недостатки разработанного метода в сравнении со стандартными подходами и дана оценка перспективе внедрения оценки экосистемных сервисов городских почв для решения городских задач различных уровней: озеленение и благоустройство, городское планирование и устойчивое развитие.

Применение комплексных подходов в управлении объектами на локальном уровне приведет к более рациональному использованию ресурсов и материальных средств, поскольку рассчитанный ущерб может не соответствовать реальному уровню затрат. В качестве иллюстрации этого предположения была дана экономическая оценка снижению эффективности экосистемных сервисов почв кампуса РУДН в связи с загрязнением тяжелыми металлами. Расчёт основан на оценке ущерба от загрязнения почвогрунтов кампуса РУДН тяжелыми металлами в соответствии с методикой исчисления размера вреда, причиненного почвам (Приказ МПРиЭ РФ № 238) на основе уровня загрязнения. Размер ущерба по данной методике составил 38.4 млн рублей при опасном уровне загрязнения по показателю Z_c . В противовес этому показателю была рассчитана среднегодовая стоимость обслуживания 1 га благоустроенной территории с преобладанием газонных покрытий (ПП-743). В итоге, стоимость обслуживания составила от 7 до 10 млн. рублей в год. Стоит отметить, что комплекс мероприятий по уходу и благоустройству не нацелен на снижение уровня загрязнения напрямую, однако, с повышением качества почвы и улучшением состояния растений, увеличивается и эффективность экосистемных сервисов. Это хорошо иллюстрирует схема мероприятий по благоустройству кампуса РУДН: участки, где проводились реконструкции газона в 2019-2020 г. на картосхеме соответствуют зонам с высокой эффективностью ЭС аккумуляции углерода и ГХБ (Рис. 8).

Сопоставление результатов исследования на уровне Москвы с официальными данными о состоянии почв (Кульбачевский, 2019) также показывает, что карты загрязнения (по сути превышения санитарно-гигиенических нормативов) и карты устойчивости почв к загрязнению во многом не совпадают. Так, представление о максимальных рисках загрязнения в центральной части города и минимальных в ООПТ не всегда верно, т.к. низкая емкость геохимического барьера повышает риски загрязнения даже при сравнительно небольшом содержании тяжелых металлов. Целесообразным представляется увеличение точек мониторинга и частоты наблюдений

состояния почв на территориях ООПТ (сейчас составляют менее 5% от точек наблюдения ГПБУ «Мосэкомониторинг»), а также корректировка наблюдаемых показателей с учетом буферной способности почв (Рис. 8). Анализ сервиса эффективности аккумуляции углерода показывает, что чаще всего неоптимальные значения сервиса (как меньше, так и выше оптимальных) фиксируются в селитебных и рекреационных зонах, а также вдоль дорог в центральной части города, где высокое содержание $C_{орг}$ совпадает с максимальным проявлением городского острова тепла, а, следовательно, высокими рисками интенсивной минерализации. Разброс значений не удивителен, принимая во внимание разрешенные значения содержания $C_{орг}$ от 4 до 20% (СП-514), что в зависимости от условий может привести как к высоким рискам минерализации, так и наоборот, низкой микробной доступности. Целесообразно скорректировать нормативные значения в соответствии с полученными результатами.

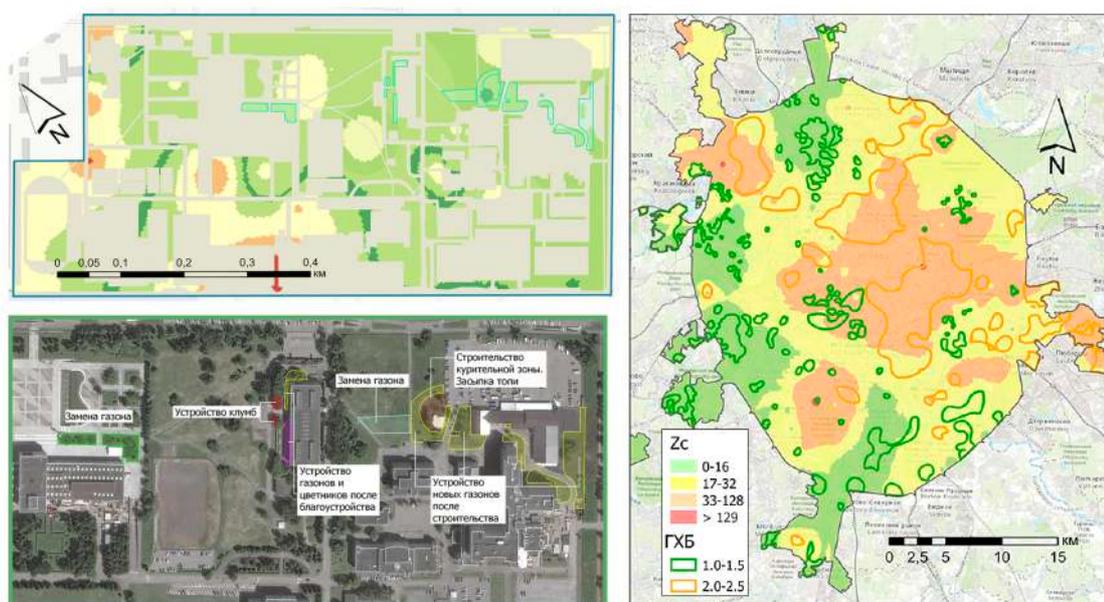


Рис. 8. Сравнение сервиса ГХБ и схема проделанных работ по реконструкции газонных покрытий на глубину до 10 см за 2019-2020 год на территории РУДН и сравнение показателя Z_c и эффективности сервиса ГХБ для Москвы.

Сфера применения результатов в Новой Москве наиболее масштабная, т.к. не только характеризует значения экосистемных услуг городских почв, но и показывает их изменение в процессе урбанизации. По основным показателям городские почвы Новой Москвы занимают промежуточное положение между фоновыми территориями и почвами Москвы в границах до 2012 года, что позволяет охарактеризовать Новую Москву как «транзитную стадию» урбанизации и интерпретировать полученные оценки для поддержки принятия решений по устойчивому развитию региона.

ВЫВОДЫ

1. Для экосистемных сервисов городских почв Московского мегаполиса показана высокая пространственная неоднородность (CV от 26% до 40%) на всех уровнях. Статистически значимыми факторами, определившими от 10 до 45% от общей дисперсии, стали рельеф, расстояние от основных дорог и историческое зонирование на уровне города, история и тип землепользования - на уровне региона.

2. Для территории кампуса РУДН средние оценки экосистемных сервисов составили 1.4 (высокая) для аккумуляции углерода и 1.6 (выше среднего) для геохимического барьера, при этом близость к источникам антропогенной нагрузки (дорога, парковка, автомастерская) повышала значение на 0.3-0.5 балла для обоих сервисов.

3. Пространственные закономерности, выявленные с использованием экспресс-метода pXRF, значимо коррелируют с лабораторными результатами (ICP-OES), но для корректной оценки абсолютных значений необходимо использовать калибровочные коэффициенты с учетом гранулометрического состава и влажности почв.

4. На уровне города зоны повышенного риска загрязнения, полученные на основании индексов Z_c , PERI, $PI_{Neverow}$, не полностью соответствуют зонам различной эффективности сервиса геохимического барьера. Так в центральной части более высокое загрязнение частично компенсируется более высокой буферной способностью из-за высокого содержания Сорг и слабощелочной реакции среды. Для ООПТ, наоборот, показана низкая устойчивость даже при невысоких концентрациях тяжелых металлов.

5. Для г. Москва показана эффективность сервиса аккумуляции углерода ниже среднего (2.1 балла), при этом наименьшие значения характерны для центральной части, где повышенное содержание Сорг совпадает с наиболее интенсивным проявлением городского острова тепла.

6. Среднее содержание тяжелых металлов в почвах Новой Москвы не превышало нормативных значений для фоновых почв, в то время как для городских почв содержание одного или нескольких ТМ превышало ОДК в 87 % случаев, а в населенных пунктах с максимальной антропогенной нагрузкой (Щербинка, Московский) показаны высокие риски загрязнения. Новая Москва по свойствам и экосистемным сервисам почв занимает промежуточное положение между естественными территориями и Москвой в границах до 2012 г., при этом отмечается ухудшение средних оценок экосистемных сервисов городских почв по градиенту от периферии к центру.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 03.02.08– экология.

1. Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., **Romzaykina O.N.**, Grigorieva V.E., Litvinov Y. A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing. // *Geoderma*. — 2021 — 399: 115039. DOI:10.1016/j.geoderma.2021.115039. (IF 2020 = 6.11).
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. // *Science of the Total Environment*. — 2021. — 786: 147457. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.147457 (IF 2020 = 7.96).
3. Matasov V., Yaroslavtsev A., Bukin S., Konstantinov P., Vasenev V., Grigoreva V., **Romzaykina O.**, Dvornikov Yu., Sayanov A., Maximova O., Ecosystem Services Approach for Landscaping Project: The Case of Metropolia Residential Complex. In: Vasenev V. et al. (eds) *Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure*. SSC 2020. Springer Geography. Springer, Cham, — 2021. — P. 319-330 DOI:10.1007/978-3-030-75285-9_29
4. **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 megalopolis. // *Journal of Environmental Quality*. — 2020. — Vol. 50.— P. 22– 37. DOI: 10.1002/jeq2.20142 (IF 2020 = 2.75).
5. Vasenev V.I., Slukovskaya M.V., Cheng Z., Paltseva A., Thomas N., 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*. — 2020. — Vol. 50. — P. 63– 77. DOI:10.1002/jeq2.20132 (IF 2020 = 2.75).
6. **Romzaykina O.**, Vasenev V., Andrianova D., Neaman A., Gosse D. The Effect of Sealing on Soil Carbon Stocks in New Moscow// In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z. et al., (eds) *Green Technologies and Infrastructure to Enhance Urban Ecosystem Services*. SSC 2018. Springer Geography. Springer, Cham. — 2020. — P. 29-36. DOI:10.1007/978-3-030-16091-3_5.
7. Vasenev V., Veretelnikova I.V., Brianskaia I.P., Demina S., **Romzaykina O.N.**, Pulatov B., & Pulatov A. Soil Electroconductivity as a Proxy to Monitor the Desertification in the Hungry Steppe (Uzbekistan) // In: Vasenev V., Dovletyarova E., Cheng Z. et al., (eds) *Green Technologies and Infrastructure to Enhance Urban Ecosystem Services*. SSC 2018. Springer Geography. Springer, Cham. — 2020. — P. 125-132. DOI:10.1007/978-3-030-16091-3_15.
8. Vasenev V.I., Van Oudenhoven, A.P.E., **Romzaykina, O.N.**, Hajiaghaeva R.A. The Ecological Functions and Ecosystem Services of Urban and Technogenic Soils: from Theory to Practice (A Review) // *Eurasian Soil Science*. — 2018. — Vol. 51. — P. 1119–1132. DOI:10.1134/S1064229318100137 (IF 2018 = 1.04).
9. **Romzaykina O.N.**, Vasenev V.I., Khakimova R.R., Hajiaghayeva R., Stoorvogel J.J., Dovletyarova E.A. Spatial variability of soil properties in the urban park before and after reconstruction// *Soil and Environment*. — 2017. — Vol. 36. — No. 2. — P. 155-165. DOI:10.25252/SE/17/51219 (IF 2017 = 0.74).

**Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ (без дублирования)**

10. Vasenev V.I., Stoorvogel J.J., Plyushchikov V.G., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., **Romzaykina O.N.** Basal respiration as a proxy to understand spatial trends in CO₂ emissions in the Moscow region// Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. — 2016. — No. 4. — С. 94-107. DOI: 10.22363/2312-797X-2016-4-94-107.