

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гончаров Никита Вячеславович

**Твердые атмосферные выпадения как компонент городских экосистем
(на примере г. Москвы)**

Специальность 1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026

Работа подготовлена на кафедре географии почв факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель

Прокофьева Татьяна Вадимовна –
кандидат биологических наук,
доцент

Официальные оппоненты

Безуглова Ольга Степановна –
доктор биологических наук,
профессор, Южный федеральный
университет, кафедра почвоведения
и оценки земельных ресурсов,
профессор

Кошелева Наталья Евгеньевна –
доктор географических наук, МГУ
имени М.В.Ломоносова,
географический факультет, кафедра
геохимии ландшафтов и географии
почв, профессор

Евдокимова Мария Витальевна –
кандидат биологических наук, МГУ
имени М.В.Ломоносова, факультет
почвоведения, кафедра земельных
ресурсов и оценки почв, доцент

Защита диссертации состоится «24» ноября 2026 года на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2.

Тел: 8(495)–939-24-67, 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 также в электронном виде и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4028>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Т.А. Парамонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В техногенном преобразовании городских экосистем важную роль играют взвешенные твердые частицы, которые оказывают значительное влияние на городскую окружающую среду: изменяют параметры глобального и приземного климата (Casazza et al., 2018; Романовская, Савин, 2021), загрязняют почвы (Касимов и др., 2016, 2025), угнетают растительность (Chaturvedi et al., 2013), вредят здоровью человека (Калаева и др., 2016; Zhang et al., 2015). Подобные частицы, осевшие на поверхность земли из атмосферного аэрозоля называют твердыми атмосферными выпадениями (ТАВ) (Прокофьева и др., 2015).

Опубликовано большое количество работ по изучению ТАВ, значительная часть которых посвящена исследованиям химического состава: (Власов и др., 2015; Кошелева и др., 2019, 2020; Ладонин, Михайлова, 2020; Васильчук Дж.Ю. 2023, Чикидова, Завгородняя, 2020; Осипова и др., 2024). Также представлены работы по биологической составляющей ТАВ (Barberán, et al., 2015; Gao et al., 2020; Zhou et al., 2021), и исследования пылевых выпадений в снеге (Шатилов, 2001; Язиков и др., 2016; Таловская, 2022). Тем не менее, вопрос влияния данных частиц на компоненты городских экосистем остается недостаточно освещенным.

Цель работы – выявить степень и характер влияния ТАВ на компоненты городских экосистем.

Задачи работы:

1. Определить интенсивность аэральной нагрузки на участках города Москвы, различающихся по функциональному использованию и почвенным характеристикам.
2. Установить комплекс диагностических признаков (морфология, элементный состав) для идентификации компонентов ТАВ и на его основе охарактеризовать вещественный состав образцов ТАВ на участках исследования.
3. Определить химический состав ТАВ.
4. Выявить характерные черты комплекса микроорганизмов в пылевых выпадениях, а также наиболее вероятные источники поступления микроорганизмов в атмосферу.
5. Выявить влияние ТАВ на растения.
6. Исследовать влияние ТАВ на морфологические характеристики и химические свойства городских почв, их способность к смачиванию.

Объектом исследования являются наземные экосистемы города

Москвы, **предметом исследования** – ТАВ, как часть этих экосистем.

Научная новизна.

Впервые предложена оригинальная классификация летних ТАВ для разных функциональных зон г. Москвы, включающая 18 групп частиц. Новизна заключается в применении комплексного подхода, при котором ТАВ рассматриваются как сложная система, состоящая из частиц различного генезиса (живых и косных, природных и техногенных), которые поступают на поверхность почвы и оказывают воздействие на компоненты городских экосистем. Дана комплексная характеристика бактериальных и грибных компонентов ТАВ. На основе сопряженного анализа микробиологического, вещественного и химического состава доказана тесная генетическая связь ТАВ с городскими почвами. Расширены представления о влиянии ТАВ на водно-физические свойства почв: впервые определена скорость возможной деградации водооталкивающих свойств и доказана роль городских ТАВ в увеличении почвенной гидрофобности. Детализированы сведения о скорости накопления негативного (фитотоксического) эффекта в городских экосистемах при высокой пылевой нагрузке.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для оптимизации систем ухода за городскими зелеными насаждениями, подверженными регулярной пылевой нагрузке. Данные о составе ТАВ и их влиянии на экосистемы могут служить научной базой при разработке управленческих решений и нормативных документов в сфере экологического и санитарного мониторинга. Самостоятельную практическую ценность имеет предложенный в работе метод внесения ТАВ в почву при постановке модельных экспериментов: он позволяет осуществлять корректное моделирование пылевой нагрузки для оценки ее влияния на почвенные свойства и проведения фитотестирования.

Методология и методы исследования. Сравнительно-географический метод использован для выделения ряда участков по степени антропогенной нагрузки. Сбор проб ТАВ осуществлялся при помощи прямого осаждения пыли на пылеловушки, также использовались сметы с поверхностей. Методологической основой для микроскопических исследований вещественного состава ТАВ являлись работы коллектива авторов Томского политехнического университета под руководством проф. Е.Г.Язикова (Язиков и др., 2025). Изучение микробиологического состава ТАВ проводилось с помощью посева на питательную среду, далее использовали молекулярно-генетические методы, метод прямой люминесцентной микроскопии.

Исследование токсичности ТАВ для растений проводилось на основе методики “Фитоскан” ФР.1.31.2012.11560 с предложенным способом добавления ТАВ в тест-почву. Для определения гидрофобности почв, загрязненных ТАВ, использовали метод просачивания водной капли (WDPT-тест). В работе, в том числе и для ТАВ, использовались традиционные методы химического анализа почв.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплексный подход к изучению ТАВ демонстрирует их тесную взаимосвязь с почвенным покровом. При этом ТАВ, имея в основе компоненты почвенного происхождения выступают не только как производное почвы, но и как фактор негативного воздействия на нее, проявляющийся в химическом загрязнении, увеличении гидрофобных свойств, встраивании антропогенных частиц в гумусово-аккумулятивные горизонты.

2. ТАВ зон с высокой антропогенной нагрузкой являются источником токсического воздействия, что проявляется в негативном влиянии на рост и развитие растений за счет изменения их жизненных условий.

3. В городских экосистемах ТАВ выступают местом обитания и источником распространения микроорганизмов, обеспечивая их перераспределение между атмосферным воздухом, филопланой и почвами.

Личный вклад автора. Автором, помимо сбора образцов ТАВ и почв, самостоятельно проведены анализ пылевой нагрузки, анализ вещественного состава ТАВ, исследование гидрофобности ТАВ и городских почв, исследование токсичности ТАВ для растений, подготовлены публикации.

Публикации. Основные положения и выводы диссертации изложены в 4 научных работах, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы и 3 приложений. Материалы работы изложены на 178 страницах, содержат 16 таблиц, 43 рисунка. Список литературы включает 239 источников, в том числе 135 на иностранных языках.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследования опубликованы в изданиях, индексируемых в системах Scopus, RSCI и представлены на конференциях: International Conference of Atmospheric Dust - DUST 2021 - Hybrid Meeting (2021), 11-th Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas (SUITMA 11, 2022), Всероссийская научная конференция с международным участием «Экология грибов и грибоподобных

организмов: факты, гипотезы, тенденции» (2023), IX съезд Общества почвоведов им. В.В.Докучаева (2024), «Города на пути из настоящего в будущее» V Геоурбанистические чтения (2025), II Международная научная конференция «Роль почв в биосфере и жизни человека» (2025).

Благодарности. Автор работы выражает искреннюю благодарность научному руководителю, к.б.н., доценту Т.В. Прокофьевой за всестороннюю помощь на всех этапах подготовки работы. Также автор признателен д.б.н. Г.Н. Федотову, д.б.н. В.А. Тереховой, сотрудникам кафедры географии почв за важные замечания и рекомендации к работе. Автор также благодарен к.б.н. О.А.Салимгареевой за проведение многочисленных сессий на сканирующем электронном микроскопе и помощь в идентификации частиц ТАВ, д.б.н. Л.В. Лысак, к.б.н. А.М. Глушаковой, А.Е. Ивановой, Т.А. Грачевой за проведение микробиологического анализа, лабораторному центру Почвенного института им. В. В. Докучаева за определение химических свойств, студентке Кузьминой Марине за проведение анализа шлифов городских почв, к.б.н. И.В. Горепекину за технические консультации, а также за помощь в сборе образцов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Обзор литературы

В составе атмосферного аэрозоля основным компонентом являются «твердые частицы, доля которых составляет до 75 % аэрозольной нагрузки. По различным оценкам, общее содержание пыли в атмосфере варьирует от 6 до 30 Тг» (Романовская, Савин, 2021).

ТАВ представляют собой сложную полидисперсную систему, состоящую из различных частиц природного происхождения (первичные биологические аэрозольные частицы, микрочастицы кварца, полевых шпатов, глинистых минералов, солей и др.), основными источниками которых являются жизнедеятельность организмов, ветровая эрозия почв, импульверизация морских аэрозолей, деятельность вулканов (Boucher, 2015; Романовская, Савин, 2021; Prokof'eva et al., 2021) и антропогенного происхождения (частицы шлаков, золы, сажи, кирпича, краски, истирания шин, тормозных колодок, асфальта), связанные со сжиганием ископаемого топлива, работой промышленных производств, деятельностью автотранспорта (Язиков, 2006, Zavgorodnyaya et al., 2019; Глинянова, Фомичев, 2020; Osorio-Martinez et al., 2023; Popovichcheva et al., 2024). В связи с этим характерна неоднородная химическая природа пылеаэрозоля. В его составе обнаруживаются тяжелые металлы, нефтепродукты, полиароматические углеводороды, соли противогололедных реагентов и др. (Zhang et al., 2015;

Глинянова, Фомичев, 2021; Николаева и др., 2022; Касимов, 2025). В зависимости от методики и места отбора проб ТАВ характеризуется различным соотношением природных и антропогенных частиц (Таловская, 2022).

ГЛАВА 2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты исследования

Работа выполнена на 7 участках исследования (табл. 1, рис. 1), расположенных в различных частях города Москвы.

Таблица 1. Характеристика участков исследования

Расположение	Условное обозначение	ОМВ, ед. СИ * $10^{-3} \pm s$	Почва	Тип функц. использования
г.о. Мытищи, МКАД, 97 км	МКАД	0,24±0,09 (фон) 2,69±1,36 (место пылеловушки)	Элювозем глеевый	Транспортная зона
Москва, р-он Хамовники, ул. Льва Толстого	Хм	0,35±0,12	Урбостратозем на погребенном ржавозёме	Рекреационно-общественная зона
г.о Балашиха, Щелковское шоссе, НП “Лосиный остров”	ЛО	0,36±0,15	Ржавозем	Рекреационная зона
г. Москва, р-он Раменки, ул. Менделеевская	БС	0,49±0,13	Рекреазем на техн. отложениях, подстилаемых агродерново-подзолистой почвой на покровных суглинках	Рекреационно-общественная зона
г. Москва, р-он Можайский, ул. Вересаева	ИМГРЭ	0,43±0,38	Урбостратозем маломощный на техногенных отложениях	Селитебная зона
г. Москва, р-он Дорогомилово, Кутузовский тоннель	ТТК	0,72±0,29	Реплантозем	Селитебно-транспортная зона
г. Москва, р-он Донской, Ленинский проспект	ИПЭЭ	1,75±0,12	Урбостратозем на техногенных отложениях	Селитебно-транспортная зона

Основой для выбора участков служили принадлежность к определённым типу функциональных зон города, характеризующихся разной степенью техногенной нагрузки, которую оценивали с помощью показателя объемной магнитной восприимчивости почв (Гладышева, 2007).

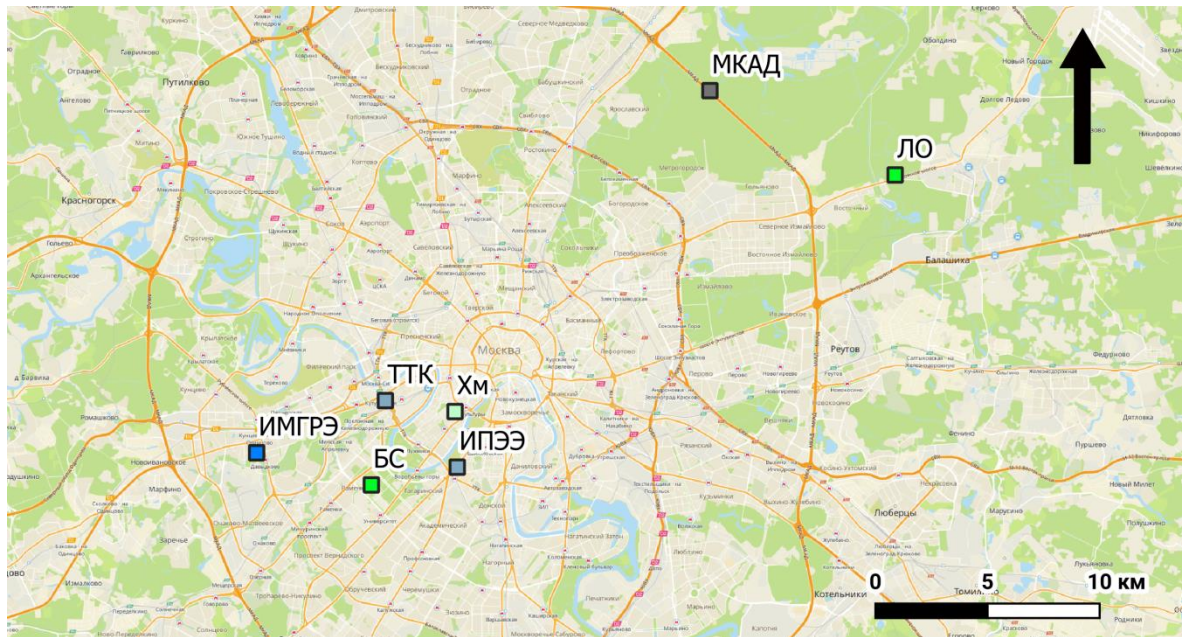


Рисунок 1. Схема участков исследования

2.2. Методы исследования



Сбор TAB. Сбор летних **TAB** для анализа вещественного состава выполнялся при помощи специальных пылеловушек (рис. 2). Для остальных анализов использовали метод смета с поверхностей элементов зданий и сооружений, дорожных конструкций (1-1,2 м от поверхности) в летний и зимний периоды.

Рисунок 2. Установка для сбора TAB

Определение интенсивности выпадения. Для определения интенсивности выпадений в летний период проводился расчет объемов пылевой нагрузки (Методические ..., 1990), согласно формуле:

$$P = Pa/(S \cdot T) \quad (1),$$

где P_a – вес осаждённой пыли; S – проективная площадь осаждения; T – временной интервал проведения эксперимента (1 месяц).

Определение вещественного и элементного состава TAB. Для анализа использовали стереомикроскопы МБС-10, Soptop SZN71, Soptop CX40P факультета почвоведения МГУ (приобретенный по «Программе развития Московского университета»), сканирующие электронные микроскопы (СЭМ) JEOL JSM-6060A, JEOL 6610 LV. Анализ элементного состава проводился с помощью энергодисперсионных микроанализаторов EX-2300 BU, INCA XACT.

Процентное содержание групп частиц определялось на основе метода сравнения С.А. Вахромеева. Частицы объединялись в группы по наличию комплекса морфологических признаков (размера, формы и др.).

Идентификация потенциальных компонентов ТАВ. С целью идентификации частиц был проведен анализ микрообразцов потенциальных компонентов городских ТАВ. На СЭМ были исследованы экскременты животных, частицы автомобильных шин, тормозных колодок, кирпичной крошки, асфальта, частицы бумаги, ваты, пластикового шпагата.

Определение химического и гранулометрического состава ТАВ и почв. Определение концентрации нефтепродуктов проводили согласно ПНД Ф 16.1:2.21-98, массовой доли органического вещества – согласно ГОСТ 26213-91 (по Тюрину), pH водной вытяжки – согласно ГОСТ 26423-85, массовой доли Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Zn, K – согласно ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 ЦВ 5.18.19.01-2005, Si – по методике М-2 2016. Гранулометрический состав определяли с помощью метода лазерной дифрактометрии.

Микробиологический анализ ТАВ и почв. Численность грибов, бактерий, длину актиномицетного мицелия определяли с помощью прямого люминесцентно-микроскопического метода. Идентификацию грибов после посева на агар Чапека проводили с помощью определителей (Пидопличко, 1972; Domsch et al., 2007; Guerro et al., 2012;), секвенирования ДНК. Определение численности и таксономической структуры комплекса культивируемых сапротрофных бактерий – при помощи посева на питательную глюкозо-пептонно-дрожжевую среду с добавлением нистатина (Лысак, 2010), выделение таксонов осуществлялось с помощью определителей (Bergey, 2001; Лысак, 2010), с помощью анализа 16S рРНК (Belov et al., 2020). Таксономическую структуру прокариотных сообществ также определяли, используя секвенирование 16S рРНК.

Сапротрофный бактериальный комплекс был охарактеризован на основе критериев, разработанных в МГУ имени М.В. Ломоносова (Лысак, 2010). Для идентификации представителей семейства *Enterobacteriaceae* использовали посев на хромогенную высокоселективную среду Rebecca® EB. Содержание санитарно-показательных микроорганизмов изучали в соответствии с методическими рекомендациями (МР ФЦ/4022. Методы ...; МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка ...).

Рассчитывали индексы разнообразия Чао, Шеннона, Симпсона и Пиелу.

Определение гидрофобности ТАВ и почв в условиях модельного опыта. Определение гидрофобности ТАВ и почв проводилось с помощью метода просачивания водной капли (WDPT-тест) (Bachmann et al., 2000). Измерения

проводили в десятикратной повторности. В качестве внутригородского фона была исследована гидрофобность образцов почв Алешкинского леса (район “Северное Тушино”, Москва).

Фитотестирование осуществлялось на основе методики “Фитоскан” ФР.1.39.2012.11560. Измерения проводили в трехкратной повторности (по 12-14 семян для каждой повторности в зависимости от вида тест-растения). В качестве тест-культур – райграс пастбищный (*Lolium Perenne* L.) и кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). Тест-параметры – всхожесть и длина корня.

Микростроение почв было исследовано в шлифах при помощи микроскопов «ПОЛАМ Л-213М» и «Soptor CX40P» с камерой «SIMAGIS TC-5CU», приобретенного по «Программе развития Московского университета».

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью пакета Statistica 8.0. Нулевую гипотезу отвергали при уровне значимости $p < 0,05$. Параметрический дисперсионный анализ использовали для данных с однородными дисперсиями. Достоверность межгрупповых различий оценивали с помощью теста Тьюки. Также использовали тест Краскела-Уоллеса.

Диагностика почв. Для наименования почв использовали классификацию и диагностику почв России (Шишов и др., 2004) и дополнения для классификации городских почв (Прокофьева и др., 2014).

ГЛАВА 3. Результаты и их обсуждение

3.1. Объем аэральных выпадений

На участках было определено количество ТАВ (табл. 2). Наименьшая нагрузка отмечена для участков **Хм** и **БС**, что подтверждается предыдущими исследованиями (Prokof'eva et al., 2021).

Таблица 2. Аэральная нагрузка на участках исследования

	2022		2023	
	кг/(км ² ·сут)	г/(м ² ·год)	кг/(км ² ·сут)	г/(м ² ·год)
Хм	50	18	184	67
ИПЭЭ	350	128	329	120
БС	83	30	–	–
ИМГРЭ	67	24	–	–
ЛО	–	–	201	91
МКАД	–	–	174	64

“–” - не определялось

Для **Хм** на следующий год зафиксировано увеличение нагрузки более чем

в 3 раза, что связано с повышенным пылением местности из-за проводившихся рядом в период экспозиции опыта строительных работ. Максимальная степень нагрузки получена для участка **ИПЭЭ**.

Таким образом, максимальный уровень пылевой нагрузки – на участках с активным пылением местности (**Хм** (2023), в том числе вблизи крупных магистралей (**ИПЭЭ**, **ЛО**, **МКАД**)), тогда как зоны с низким трафиком и развитым озеленением (**БС**, **Хм** (2022)) отличаются минимальным уровнем нагрузки.

3.2. Выделение характерных групп ТАВ и их процентное содержание в образцах

Анализ ТАВ с помощью оптических методов и элементного анализа позволил выделить 18 характерных групп частиц, которые были разделены на 2 составляющих: минеральную и органическую (рис. 3).

Для всех участков наибольшую долю в пробах имеют группы, характеризующие минеральные и почвенные частицы, (в среднем 67% от состава пробы), что указывает на их почвенно-породное происхождение.

Наибольшее количество карбонатных частиц зафиксировано на участках **ИПЭЭ**, **Хм**, **БС**, наименьшее – на участках **МКАД** и **ЛО**, что согласуется с некарбонатностью почв и объясняется слабой застроенностью территории.

Наибольшая доля частиц кирпича и строительных растворов получена для участков **Хм** и **ИПЭЭ**. Наличие металлических сферул и повышенное количество частиц асфальта – на участках **ИПЭЭ** и **БС**, что связано с близостью к крупным автомагистралям. На участках **ИПЭЭ**, **ИМГРЭ**, **ЛО** зафиксированы частицы металлических ограждений.

Доля органической составляющей на всех участках имеет схожее распределение. Наибольшая доля – на участке **Хм** за счёт большого количества водорослей, что обусловлено их связью с филлопланой деревьев.

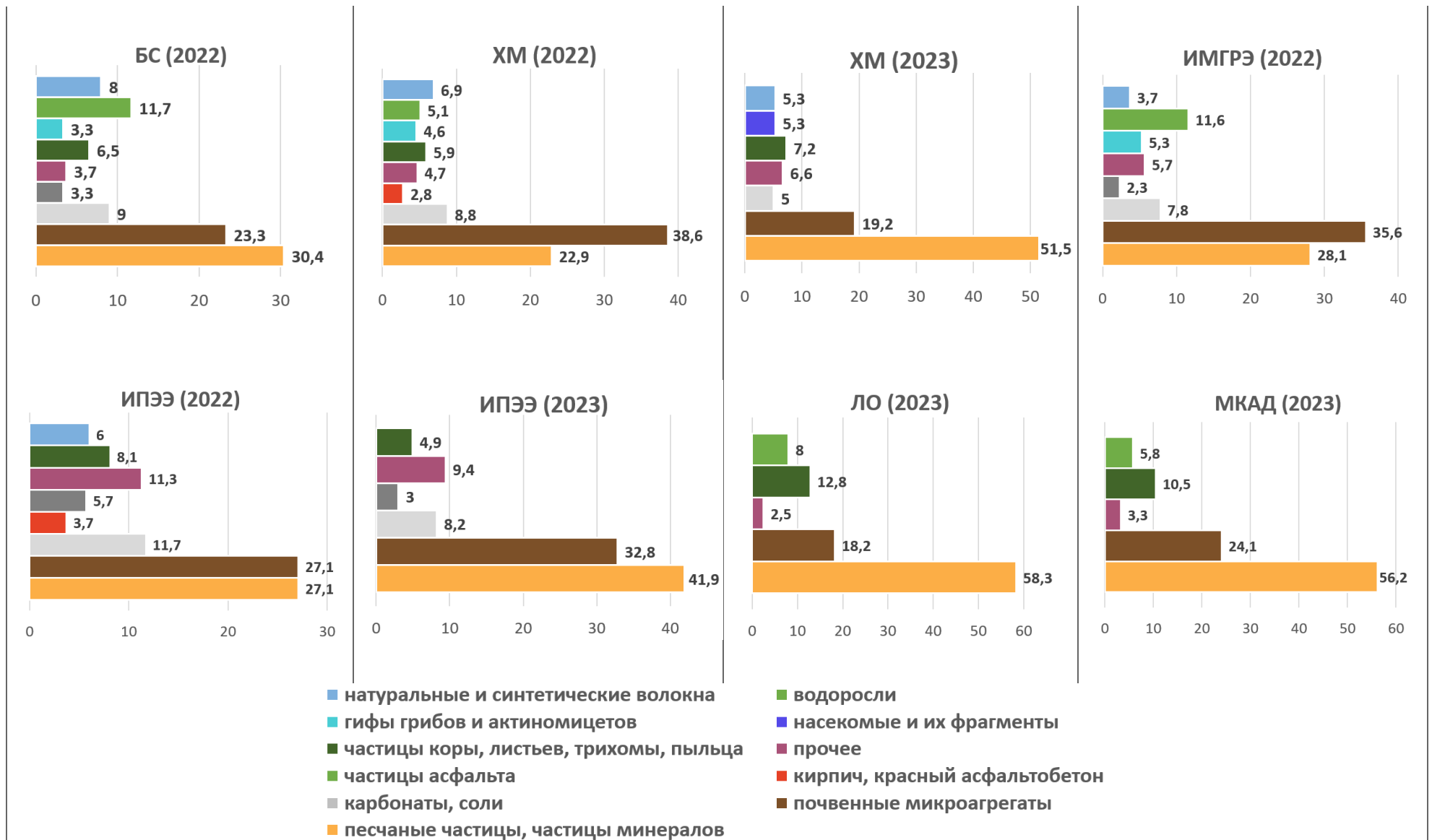


Рисунок 3. Минеральная и органическая составляющие ТАВ участков исследования, %

Показано, что для всех участков исследования наибольшую долю в пробе составляют частицы минеральных зерен, почвенные частицы разного размера, солевые частицы с преобладанием карбонатов. Количество антропогенных карбонатных частиц увеличивается для участков, расположенных в плотной застройке. В условиях высокой влажности на озелененных территориях увеличивается доля аэрофильных водорослей в пробе. Хотя городская среда сглаживает различия между функциональными зонами, геоморфологический фактор продолжает влиять на вещественный состав: к примеру, на участках на флювиогляциальной равнине (ЛО и МКАД) отсутствуют карбонаты.

3.3. Микробиологический состав ТАВ

При анализе проб отчетливо заметны гифы грибов, споры различного размера. Для всех участков в доминантах выявлены меланинсодержащие темнокрашенные грибы (*Alternaria spp.*, *Cladosporium spp.*). Для участка **ТТК** – в доминантах почвенные сапротрофы (*Penicillium spp.*) и условно-патогенные виды (*Aspergillus spp.*), для остальных – виды, ассоциированные с живым и мертвым растительным материалом: *Acremonium spp.*, *Fusarium spp.*, (**ИПЭЭ**), *Mucoromycota* + *Mortierellomycota*, *Trichoderma spp.* (**ИМГРЭ**), *Acremonium spp.*, *Trichoderma spp.* (**Хм**). При этом наименьшее видовое разнообразие получено для участка **ТТК**.

На участке **ИМГРЭ** и **ИПЭЭ** выделено 7 видов дрожжей, на **ТТК** – 3 вида. Общая доля краснопигментированных дрожжей (*Cystofilobasidium capitatum* и *Rhodotorula babjevae*) в сообществе составила 37% для участка **ИМГРЭ**, 47% для участка **ИПЭЭ**, 97% для участка **ТТК**. Также были зафиксированы типичные эпифиты (*Filobasidium magnum*, *F. wieringae*, *Kwoniella endophytica*) и педобионтные дрожжи *Naganishia globosa*.

В пробах выявляются клетки аэрофильных водорослей (краснопигментированные), например, представители вида *Trentepohlia umbrina* (Kützing) Bornet, часто встречающиеся на коре лиственных и хвойных деревьев. Присутствуют панцири диатомовых водорослей.

Бактериальная компонента ТАВ представлена филумами *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* и *Firmicutes*, их доля в сообществах превышала 10%. Также обнаружены представители филумов *Chloroflexi*, *Acidobacteria*, *Cyanobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Patescibacteria* и *Gemmatimonadetes*. На участке **ТТК** обнаружено смещение видового разнообразия в сторону филумов *Actinobacteria* и *Firmicutes* по сравнению с участком **Хм**.

Таким образом, в исследованных образцах обнаружен целый ряд групп микроорганизмов. Значимую часть микроорганизмов составляют представители

почвенной биоты или типичные эпифиты, что позволяет говорить о ТАВ как о связующем агенте между данными компонентами городских экосистем.

3.4. Связь между ТАВ и микробоценозом почв

Для понимания механизмов взаимодействия в системе ТАВ–бактерии–почва, было проведено сопряженное исследование микробиоты ТАВ и почв на участках **Хм**, **ИМГРЭ**, **ТТК**, **ИПЭЭ**.

Выявлено, что общая численность прокариот в почвах до 3 раз выше, чем в ТАВ. Наибольшее обилие бактерий для ТАВ и почв установлено на территории **ИМГРЭ**. Наименьшая численность микроорганизмов в ТАВ выявлена на участке **Хм**, в поверхностном горизонте почв — на участке **ИПЭЭ**.

В ТАВ содержится в 2-10 раз больше культивируемых сапротрофных бактерий, чем в почвах. В ТАВ доминирующими являются рода *Micrococcus*. В почвах доминировали бактерии родов *Mucococcus*, *Cytophaga*, *Pseudomonas*, *Xantomonas*, *Erwinia*).

Для участков **Хм** и **ТТК** был проведен анализ таксономической структуры прокариот при помощи метагеномного анализа. За исключением ТАВ на участке **Хм**, доминантами в котором являются филумы *Actinobacteria* и *Firmicutes*, доминирующим во всех остальных пробах ТАВ и почв является филум *Proteobacteria*, как и для исследования в культурах. Наибольшим было содержание представителей классов *Alpha*- и *Gamma**proteobacteria*. Также в ТАВ и почвах присутствуют энтеробактерии – типичные представители класса *Gamma**proteobacteria*.

Таким образом, обнаружено, что ТАВ и почвы выбранных участков имеют сходство доминантных филумов бактерий – *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* и *Firmicutes*. Для почв в большей степени был представлен *Proteobacteria*, в порядках которого содержатся виды, обычно выделяющиеся из почвы и тесно связанные с высшими растениями (Daniel, 2005; Bulgarelli et al., 2015; Chaparro et al., 2015; Першина, Чернов, 2017), в ТАВ более представлен филум *Actinobacteria*, известный своей устойчивостью к воздействию УФ-лучей и высушиванию (Добровольская, 2002; Belov et al., 2019). И общая численность бактерий, и численность сапротрофных бактерий выше в почвах, чем в ТАВ.

При этом индексы разнообразия (табл. 4) показали бóльшие значения для почвы при анализе прокариотных сообществ в целом, но бóльшие для ТАВ при анализе культивируемых сапротрофных бактерий (участки **ТТК**, **ИМГРЭ**, **ИПЭЭ**) что, возможно, связано с большим привнесением в них аллохтонных микроорганизмов с автомагистралей.

Таблица 4. Индексы биоразнообразия прокариот и культивируемых сапротрофных бактерий в образцах ТАВ и почв

Показатель		Хм		ИМГРЭ		ТТК		ИПЭЭ	
		ТАВ	почва	ТАВ	почва	ТАВ	почва	ТАВ	почва
Прокариотные сообщества	Индекс Чао	40,5	95,6	–	–	33,5	88,6	–	–
	Индекс Шеннона	3,23	5,31	–	–	3,41	5,82	–	–
	Индекс Симпсона	0,84	0,97	–	–	0,9	0,98	–	–
Культивируемые сапротроф б.б.	Индекс Шеннона	3,04	3,18	3,13	2,55	3,11	2,75	3,87	3,29
	Индекс Пиелу	0,64	0,67	0,66	0,54	0,65	0,58	0,82	0,69

“–”- не определялось

3.5. Содержание санитарно-показательных микроорганизмов

При проведении сопряженных исследований ТАВ – почва на участках **Хм**, **ИМГРЭ**, **ТТК**, **ИПЭЭ** выделены представители семейства *Enterobacteriaceae* и некоторые другие санитарно-показательные сапротрофные бактерии. Всего выделено 27 штаммов представителей родов *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Staphylococcus*, *Microbacterium*.

Высокое содержание потенциально патогенных микроорганизмов в почве коррелирует с их большой долей в ТАВ. Так, представители родов *Bacillus*, *Klebsiella*, *Rhodococcus* и *Staphylococcus*, *Escherichia* обнаружены как в ТАВ, так и в почвах. Иногда их содержание в ТАВ больше, например, для вида *Escherichia coli*.

На примере семейства *Enterobacteriaceae* летних и зимних образцов ТАВ показано, что больший уровень разнообразия получен для зимних образцов (**ТТК**). Однако в летних образцах **ТТК**, **Хм** и **БС** зафиксировано наибольшее относительное содержание вида *Escherichia coli*.

Максимальное присутствие *Enterobacteriaceae* – в образцах ТАВ в транспортной зоне зимой, когда почва находится под снегом в промерзшем состоянии, по-видимому, связано с ослаблением функции городских почв в качестве "бактериальных фильтров". Максимальное содержание *Escherichia coli* характерно для летних ТАВ на участках, расположенных вне зоны активного трафика, что может быть связано с наличием фекального загрязнения.

3.6. Токсический эффект ТАВ на компоненты экосистемы

Результаты фитотестирования ТАВ показали значимое влияние добавления смесей с участков **ИПЭЭ**, **ТТК** на длину корней кресс-салата и райграсса пастбищного. Для кресс-салата характерно куполообразное

распределение (рис. 4), для райграса – ступенчатое (рис. 5).

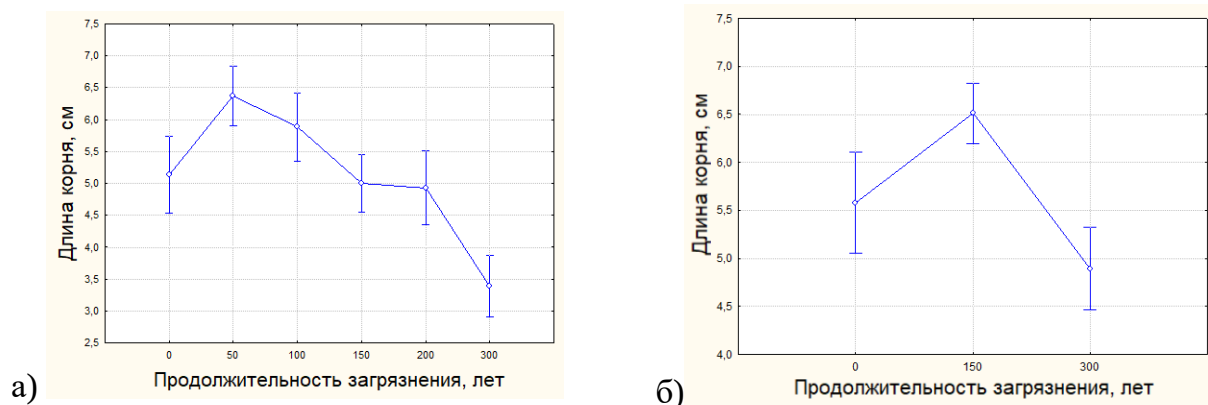


Рисунок 4. Длина корня кресс-салата в зависимости от концентрации пыли 1 (а) и пыли 2 (б) в образце дерново-подзолистой почвы. Среднее $\pm$ стандартное отклонение выборки.

Максимальный статистически значимый эффект ингибирования составил 34% (300 лет) и 37% (300 лет) соответственно.

Не обнаружено влияние ТАВ на всхожесть семян тест-культур, данный тест-параметр в рамках модельного опыта показал большой разброс значений.

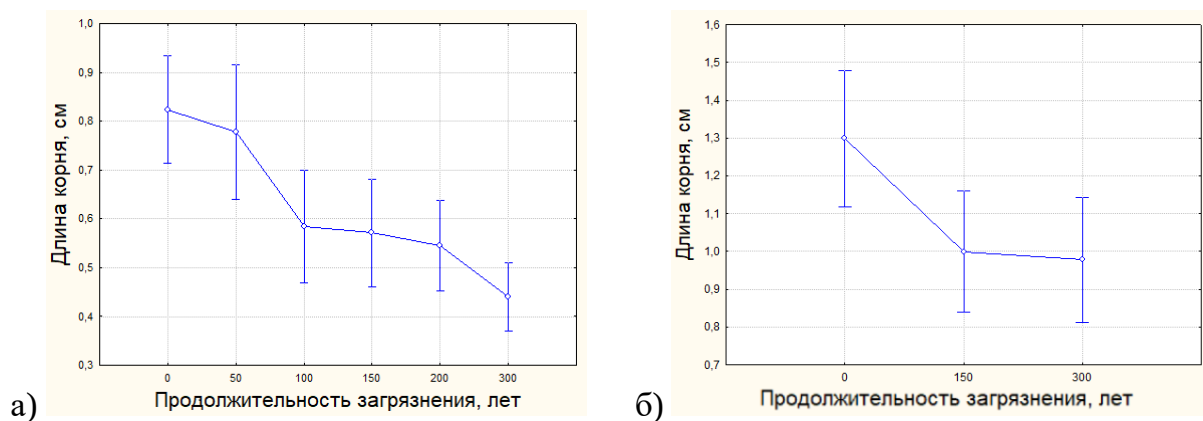


Рисунок 5. Длина корня райграса пастбищного в зависимости от концентрации пыли 1 (а) и пыли 2 (б) в образце дерново-подзолистой почвы. Среднее $\pm$ стандартное отклонение выборки.

При использовании максимальной пылевой нагрузки (по литературным данным) вместо среднегодовой появление значимых негативных эффектов может наступить в десятки раз быстрее, (от 3 до 15 лет), при использовании данных для участков **ИПЭЭ**, **ЛО**, **МКАД** появление значимых негативных эффектов наступит раньше в 4, 3 и 2 раза соответственно.

Проведенные фитотесты показали наличие значимого угнетающего действия ТАВ на растительные организмы.

3.7. Химические и физико-химические свойства верхних горизонтов почв и ТАВ участков исследования

Свойства описанных почв типичны для почв, г. Москвы (табл. 5). Максимальное содержание нефтепродуктов – на участке **ИПЭЭ**, в пробах ТАВ которого обнаружены органические пятна-пленки. Генезис подобных частиц может носить и природный характер.

Для участка **ТТК** зафиксировано минимальное количество нефтепродуктов, что объясняется недавними подсыпками чистых грунтов.

При сравнении содержания CaCO_3 обнаружено, что для всех участков содержание карбонатов в ТАВ было больше, чем в почве, что говорит о возможном обогащении почв карбонатами из ТАВ.

Таблица 5. Свойства верхних горизонтов почв на участках обследования

Участок	Почва	K_2O	P_2O_5	Орг. в-во	CaCO_3 по Козлов- скому	pH водн	Нефте- продукты
		(подвижная форма), мг\кг		%	%	-	мг\г
БС	Рекреазем	70,8	33,7	4,9	<1	8,4	0,71
БС	Урбостратозем рекультивиро- ванный	62,0	128,0	5,6	1,6	7,1	–
ТТК	Реплантозем	34,0	32,2	6,9	2,2	7,3	0,13
ИМГРЭ	Урбостратозем техногенный	57,0	35,5	1,8	2,6	7,7	0,36
Хм	Реплантозем	59,2	67,8	11,3	3,4	7,8	0,50
Хм	Урбостратозем на погребенном ржавоземе	–	–	2,9	2,2	6,6	–
ИПЭЭ	Урбостратозем техногенный	38,6	22,0	6,3	2,8	8,2	1,35
ЛО	Ржавозем	–	–	6,1	0	5,2	–
МКАД	Элювозем	–	–	6,9	0	5,0	–
Чашниково	Дерново- подзолистая	35,67	56,9	–	0	4,5	0,01

“–” - не определялось

Гранулометрический анализ ТАВ показал сходство соотношения гранулометрических фракций ТАВ как для разных сезонов, так и для разных

участков. Согласно классификации гранулометрического состава почв Н.А.Качинского, ТАВ участка **Хм** (зима) относится с легкосуглинистым, остальные – к супесчаным.

3.8. Валовое содержание элементов верхних горизонтов почв и ТАВ участков исследования

Во всех образцах ТАВ и почв доминируют такие элементы как Si, а также Al, Fe, Mg, K, Ca, что выявляет их родство. Высокое содержание Si свидетельствует о почвенно-породном происхождении основной массы ТАВ на исследуемых участках, что подтверждает предыдущие исследования (Прокофьева и др., 2015).

Зафиксировано большее содержание Cu, Pb, Zn в ТАВ по сравнению с почвами и со средними содержаниями данных элементов в почвах, что говорит об их антропогенном привносе. Ранее показано, что данные элементы связаны с транспортными выбросами (Васильчук, 2023; Касимов и др., 2016). Получены схожие тенденции для Mn и Cd. Можно сказать, что летние и зимние ТАВ имеют схожее распределение элементов, однако отмечены повышенные значения Cu в летних ТАВ.

За исключением участков **ЛО** и **МКАД**, постоянно наличие в ТАВ карбонатов Ca и Mg, повышенная концентрация которых обусловлена наличием микрофрагментов облицовки зданий, частиц строительных растворов.

3.9. Твердые антропогенные включения в городских почвах

Анализ микроструктуры образцов городских почв показал, что скелет поверхностных урбиковых горизонтов представлен в основном окатанными и плохо сортированными зернами минералов. Отчетливо заметны признаки разрушения скелетного материала. Скелет верхних горизонтов естественных почв в большей степени представлен окатанными зернами первичных минералов без признаков разрушения.

Показано, (рис. 6) что почвенные горизонты разного генезиса имеют идентичный набор техногенных микровключений (частицы покрышек, кирпича, асфальта, строительных растворов и побелки). Более того, все микровключения, найденные в горизонтах городских почв, имели следы коррозии и были окатанными, что может говорить об их поступлении в почву в составе ТАВ. Зафиксированные признаки разрушения и перекристаллизации микроартефактов указывают на их возможность влиять на почвенные свойства: облегчать гранулометрический состав, повышать щелочность, увеличивать содержание фосфора.

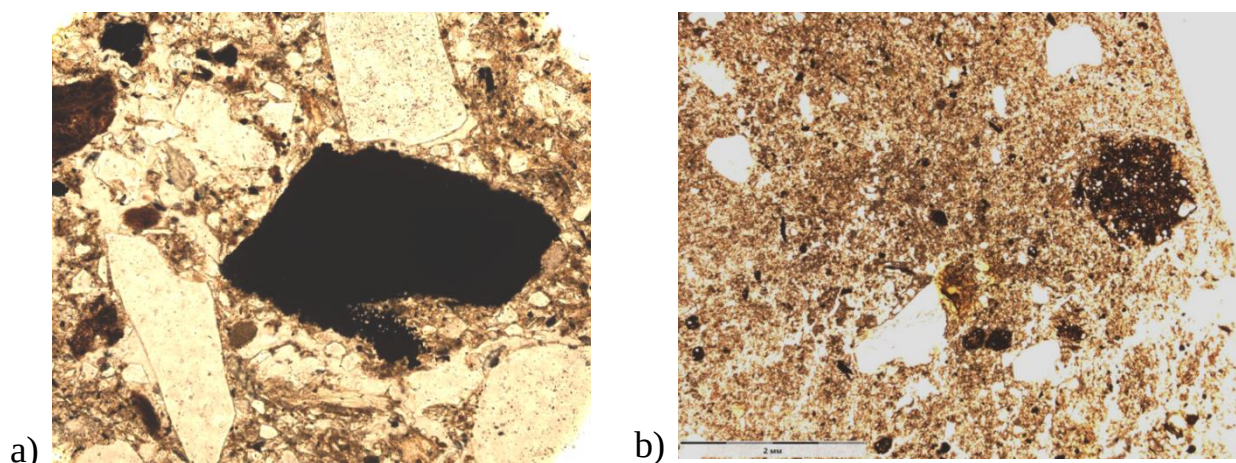


Рисунок 6. Микровключения резиновых покрышек (а) и асфальта (б) в образцах городских почв

3.10. ТАВ и гидратационные свойства почвы

Для моделирования техногенной нагрузки в эксперименте использовали придорожные сметы, отобранные в разные сезоны (**ТТК.Зима**, **ИПЭЭ.Лето**, **ИПЭЭ.Зима**). В качестве модельной почвы – образец гумусово-аккумулятивного горизонта дерново-подзолистой почвы (УОПЭЦ “Чашниково”). Опираясь на среднегодовую аэральную нагрузку в г. Москве (Ачкасов и др., 2006), рассчитывались объемы пыли, эквивалентные 10 - 100, 150 и 200-летнему загрязнению.

Показано (рис. 7), что привнос ТАВ в почву увеличивает ее гидрофобность. Образцы ТАВ, собранные в разные сезоны в разных локациях, имеют разные свойства. Чем менее гидрофобен образец ТАВ, тем более плавно происходит увеличение значений WDPT-теста. Выход на плато был достигнут только для сильно-гидрофобной ТАВ (**ТТК.Зима**) (рис. 7а). Для других образцов (рис. 7б, 7в) наблюдался рост значений вплоть до максимального моделируемого срока аэрального загрязнения почвы.

Результаты применения WDPT-теста на образцах реальных почв (рис. 8), показали, что почвы участков, длительно находящиеся в селитебных и транспортных зонах, ожидаемо имеют наибольшую степень гидрофобности (участки **ИМГРЭ** и **ИПЭЭ**).

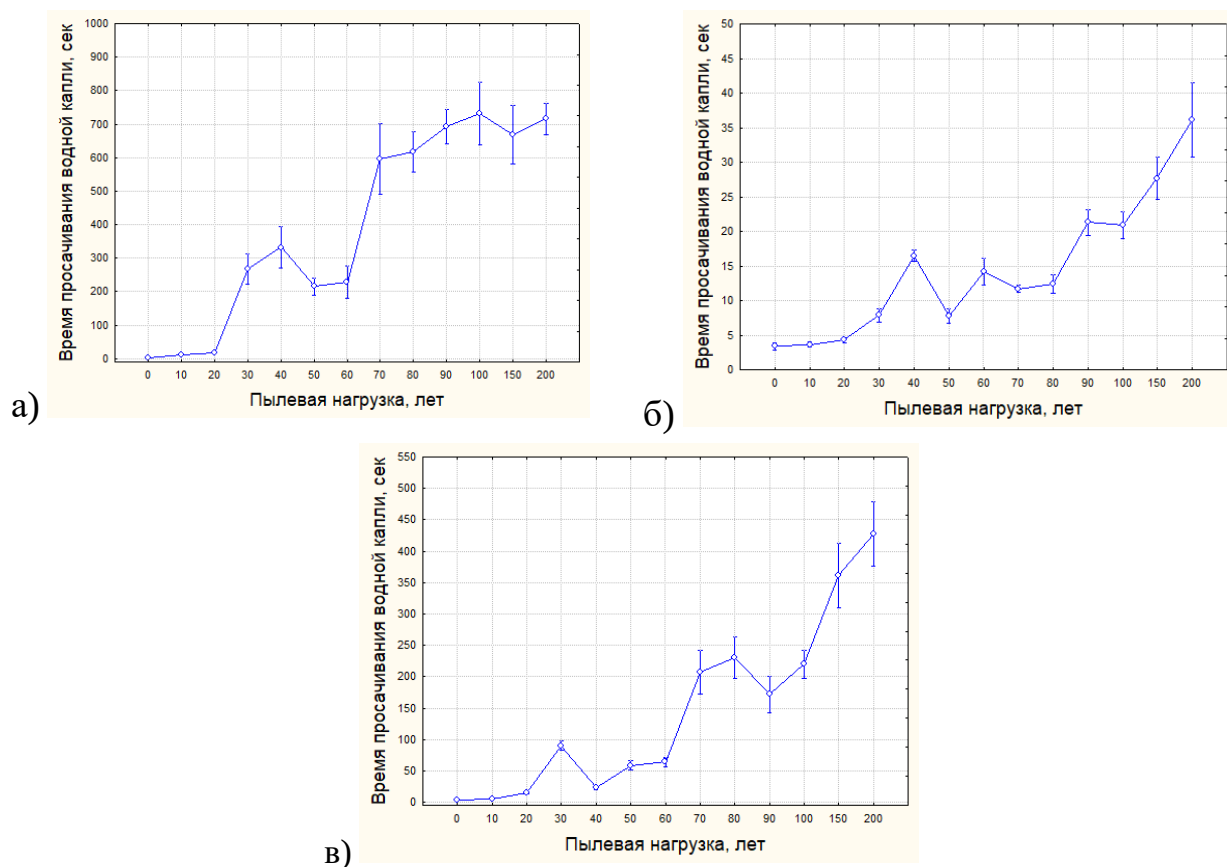


Рисунок 7. Скорость просачивания водной капли в зависимости от концентрации пыли ТТК.Зима (а), ИПЭЭ.Лето (б), или ИПЭЭ.Зима (в) в фоновом образце дерново-подзолистой почвы. Среднее $\pm$ стандартное отклонение выборки.

Также наибольшие значения WDPT-теста наблюдаются в почвах с нейтральными и слабощелочными значениями pH. Причина низких значений на участке БС может быть связана с неоднократными подсыпками материала при ремонте придорожных конструкций и реставрации газонов. Естественные лесные почвы как за пределами города, так и вне его имеют малые значения гидрофобности.

Соответствие уровней гидрофобности, степени антропогенной нагрузки и времени пребывания участков в городской среде в модельном опыте и в образцах реальных городских почв свидетельствует о том, что ТАВ накапливаются в поверхностных горизонтах, становятся составляющей гумусово-аккумулятивных горизонтов городских почв и оказывают существенное влияние на их гидратационные свойства.

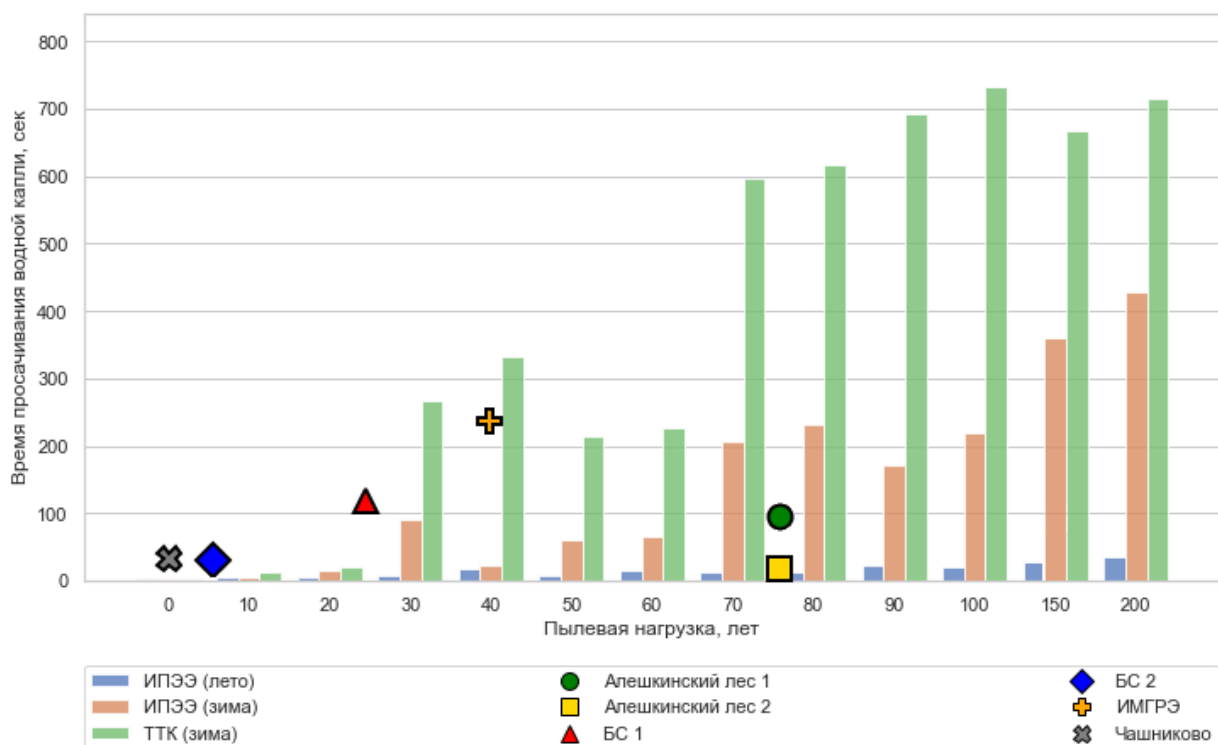


Рис. 8. Рост гидрофобности в зависимости от концентрации разных типов пыли в фоновом образце дерново-подзолистой почвы в сравнении с гидрофобностью почв на участках исследования

3.10. Роль ТАВ в жизни почв и живых организмов

В условиях урбозкосистем ТАВ выступает одним из факторов изменения физико-химических и морфологических свойств верхних горизонтов почв, что выражается в привносе антропогенных частиц, сдвиге рН почв в щелочную сторону, загрязнении тяжелыми металлами и нефтепродуктами, увеличении гидрофобности.

Элементный состав летних и зимних ТАВ исследуемых участков близок, однако зафиксировано большее количество Си летом. Несмотря на схожий элементный состав, при высокой пылевой нагрузке именно зимние ТАВ приводят к большей гидрофобизации поверхностного горизонта, возможно за счет большего содержания нефтепродуктов.

ТАВ выступают в роли субстрата для формирования биоаэрозолей, обеспечивая атмосферный перенос бактерий и грибов. В процессе переноса микроорганизмы подвергаются воздействию неблагоприятных факторов среды, что приводит к их селективному отбору. Зимой в ТАВ возрастает доля санитарно-показательных микроорганизмов, что может говорить об ослаблении зимой роли почв как “бактериального фильтра”. Кроме того, при высокой пылевой нагрузке ТАВ оказывают угнетающее действие на растения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование расширяет представление о ТАВ как о сложной поликомпонентной системе, оказывающей многовекторное воздействие на городские экосистемы. По результатам работы сделаны следующие **выводы**:

1. Большинство участков исследования являются незагрязненными или имеют слабую аэральную нагрузку. Наибольшая пылевая нагрузка – вблизи автомагистралей (ТТК, ИПЭЭ) и на участках с активным пылением поверхности (Хм (2023), ЛО), в том числе в результате антропогенной активности. Меньшая нагрузка – на участках с более низкой интенсивностью автомобильного трафика и близостью участков зеленых насаждений (Хм (2022), БС, ИМГРЭ).
2. Для всех исследуемых участков летние ТАВ состоят из почвенных частиц и зерен минералов в среднем на 65% от объема пробы, и техногенных примесей примерно одинакового состава на всех участках. При этом для ряда объектов обнаружены частицы, которые могут иметь индикаторное значение: пленки нефтепродуктов и частицы асфальта около магистралей, микрофрагменты строительных материалов, характерных для застройки данного района, фрагменты и зачатки растений, обитающих на данной территории.
3. Согласно исследованию вещественного состава, содержание органической компоненты летних ТАВ составляет в среднем 22% от общего объема пробы. ТАВ являются носителем целого ряда организмов (водорослей, дрожжей, грибов, бактерий), что говорит о ТАВ как о важном связующем звене между компонентами экосистем и переносчике биологических организмов и их зачатков, которые могут увеличивать биологическое разнообразие экосистем внутри города.
4. Определение химического валового состава ТАВ и почв участков исследования показали сопоставимые значения. Показано, что ТАВ имеют преимущественно почвенно-породное происхождение, однако служат источником поступления в почву тяжелых металлов, связанных с антропогенными выбросами, а также солей, прежде всего карбонатов кальция. Данный вывод подтверждается микроанализом ТАВ и наличием микровключений в поверхностных горизонтах почв на участках исследования.
5. Микробиологический анализ ТАВ показал, что состав исследованных групп микроорганизмов в пыли и почвах города близок. Среди

культивируемых санитарно-показательных организмов 74% видов встречаются как в ТАВ, так и в почвах. Анализ филогенетического разнообразия показал, что 4 из 10 обнаруженных филумов являются общими для ТАВ и почв, при этом именно общие филумы являются доминирующими (содержание в пробе от 76 до 100%), что указывает на тесную экологическую связь ТАВ и почвы.

6. Проведенные эксперименты по фитотестированию показали наличие значимого негативного влияния ТАВ на растения при высоких уровнях пылевой нагрузки. Скорость роста корней, в зависимости от выбранной тест-культуры и образца ТАВ ингибируется на 12—34%. При этом характер распределения негативного эффекта меняется в зависимости от свойств пыли.

7. Анализ гидрофобности показал связь пылевой нагрузки и водоотталкивающих свойств почвы. Максимальная гидрофобность почв, загрязненных ТАВ, доходила до 84% от исходной гидрофобности городской пыли. При этом скорость увеличения водоотталкивающей способности отличается в зависимости от сочетания свойств образца пыли. Соответствие уровней гидрофобности, степени антропогенной нагрузки и времени пребывания участков в городской среде и в модельном опыте свидетельствует о том, что ТАВ являются составляющей гумусово-аккумулятивных горизонтов городских почв и оказывают существенное влияние на их водоотталкивающие свойства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. Лысак Л.В., Шоба С.А., Прокофьева Т.В., Глушакова А.М., **Гончаров Н.В.**, Белов А.А. Обилие и разнообразие прокариотных сообществ пылеаэрозоля и городских почв на территории Москвы // Почвоведение. – 2023. – № 5. – С. 654–664. – EDN: IFETYW. Импакт-фактор 2,040 (РИНЦ). 1,06 п. л.
[Lysak L. V., Shoba S. A., Prokof'eva T. V., Glushakova A.M., **Goncharov N.V.**, Belov A. A. Abundance and Diversity of Prokaryotic Communities of Dust Aerosol and Urban Soils in the Territory of Moscow // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, No. 5. – P. 663-671. – EDN EWPMOE. Импакт-фактор 0,496 (SJR)]
2. **Гончаров Н.В.**, Прокофьева Т.В., Потапов Д.И., Федотов Г.Н. Твердые атмосферные выпадения как источник гидрофобности городских почв и

материал для их образования // Почвоведение. – 2024. – № 8. – С. 1133–1144. – EDN: KMKFQM. Импакт-фактор 2,040 (РИНЦ). 1,12 п. л.

[**Goncharov N.V.**, Prokof'eva T.V., Potapov D.I., Fedotov G.N. / Atmospheric Solid Fallouts as a Source of Hydrophobicity of Urban Soils and Material for Their Formation // Eurasian Soil Science. – 2024. – Vol. 57, No. 8. – P. 1398–1407. – EDN ISZGPO. Импакт-фактор 0.496 (SJR)]

3. **Гончаров Н.В.**, Прокофьева Т.В. Влияние твердых атмосферных выпадений на развитие растений по результатам фитотестирования // Экологические системы и приборы. – 2024. – № 7. – С. 3–14. EDN: – QNAMEL. Импакт-фактор 0,332 (РИНЦ). 1,00 п. л.

Прочие публикации:

1. Glushakova A., Prokofeva, T.V., Lysak L.V., **Goncharov N.V.**, Belov A.A. Antibiotic-resistant strains of escherichia coli in urban atmospheric dust aerosols of moscow city – the potential human health risks // International Conference of Atmospheric Dust – DUST 2021 (Hybrid Meeting). – 2021. – Vol. 8. – P. 11–20. DOI: 10.14644/dust2021.002. 0,62 п. л.