

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Васильчук Джессика Юрьевна

**Фракционирование тяжелых металлов и металлоидов в снеге,
дорожной пыли, почвах и донных отложениях в бассейне реки
Сетунь (юго-запад Москвы)**

1.6.12 – физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель:

Касимов Николай Сергеевич
академик РАН, доктор
географических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Линник Виталий Григорьевич
доктор географических наук,
доцент, Институт геохимии и
аналитической химии им. В.И.
Вернадского РАН, главный научный
сотрудник

Замотаев Игорь Викторович
доктор географических наук,
доцент, Институт географии РАН,
ведущий научный сотрудник

**Константинова Елизавета
Юрьевна**
кандидат географических наук,
Южный Федеральный Университет,
старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1807.

E-mail: dissovetmsu016.9@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС «Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.9/2800>

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



М.А. Смирнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и изученность темы. Москва – один из крупнейших деловых и промышленных городов, а также главный транспортный узел в стране, представляющий собой центр интенсивного импактного загрязнения среды. По мере развития городской агломерации, структура землепользования меняется: площади городской застройки увеличиваются за счет сокращения доли сельскохозяйственных угодий и лесных массивов (Vasenev et al, 2019). Увеличение антропогенной нагрузки обуславливает необходимость новых геохимических исследований атмосферных осадков (Vlasov et al., 2023) и аэрозолей (Zappi et al., 2023; Serdyukova et al., 2023), снега (Vlasov et al., 2021, 2022), дорожной пыли (Касимов и др., 2021; Vlasov et al., 2021, 2023; Ermolin et al., 2022; Kolesnikova et al., 2023), почв (Nikiforova et al., 2022; Власов и др., 2022; Romzaykina et al., 2020; Гусева, Петров, 2023) поверхностных вод (Shinkareva et al., 2022) и донных отложений (Янин, 2018). С экологической точки зрения, тяжелые металлы и металлоиды (ТММ) – одни из наиболее опасных и токсичных загрязнителей, к ним относятся элементы с атомной массой больше 23 а.е.м. за исключением неметаллов, благородных газов и галогенов (Водяницкий, 2009). Интерес к мелкодисперсным взвешенным частицам или particulate matter (PM) возрос 1990-х годах при изучении атмосферных аэрозолей в США (Dockery, Pope, 1996). В дальнейшем была показана необходимость мониторинга тонких фракций и в России (Poroviceva et al., 2012; Ревич, 2018). Частицы PM₁₀ обогащены ТММ за счет большей удельной площади поверхности, сорбционной емкости, емкости катионного обмена, увеличения количества органического вещества и содержания глинистых минералов с одновременным снижением доли кварца в минералогическом составе по сравнению с более крупными частицами (Gunawardana et al., 2014; Gao et al., 2023). Тонкие фракции аэрозолей, а также пыли и почв проникают в ткани легких, альвеолы, бронхиолы и кровеносную систему, что провоцирует сердечно-сосудистые заболевания и заболевания дыхательной системы (Tager, 2005; Chen et al., 2017). Поэтому в настоящее время в геохимических исследованиях повышенное внимание уделяется химическому составу микрочастиц дорожной пыли и почв, соответствующих в классификации Н.А. Качинского (1958) размерностям физической глины (<10 мкм) и ила (<1 мкм) – PM₁₀ и PM₁. (Amato et al., 2016; Padoan et al., 2017; Lanzerstorfer, 2018; Alves et al., 2018, 2020; Zhang et al., 2019; Tian et al., 2019; Lanzerstorfer, Logiewa, 2019; Kasimov et al., 2020). Под термином «фракционирование» в настоящей

работе подразумевается распределение концентраций ТММ по гранулометрическим фракциям, рассмотрены наиболее опасные с экологической точки зрения частицы PM_{10} и PM_{1-10} . Основные задачи при исследовании окружающей среды в городах связаны с индикацией источников загрязнения и определением их вклада, для этого применяется технология «source apportionment», в рамках которой используются рецепторные модели (Lenschow et al., 2001; Thunis et al., 2020). Изучение фракционирования ТММ в депонирующих средах (снеговой и дорожной пыли, почв, донных отложений) позволяет оценить уровни экологической опасности микрочастиц и источники поступления в них загрязнителей. Более 50% Cr, Fe, Cu, Zr, Mo, Sn, Bi в частицах PM_{10} аэрозолей Москвы поступает из городской в том числе дорожной и строительной пыли (рис. 1), загрязненных почв и частиц минеральных грунтов (Serdyukova et al., 2023).

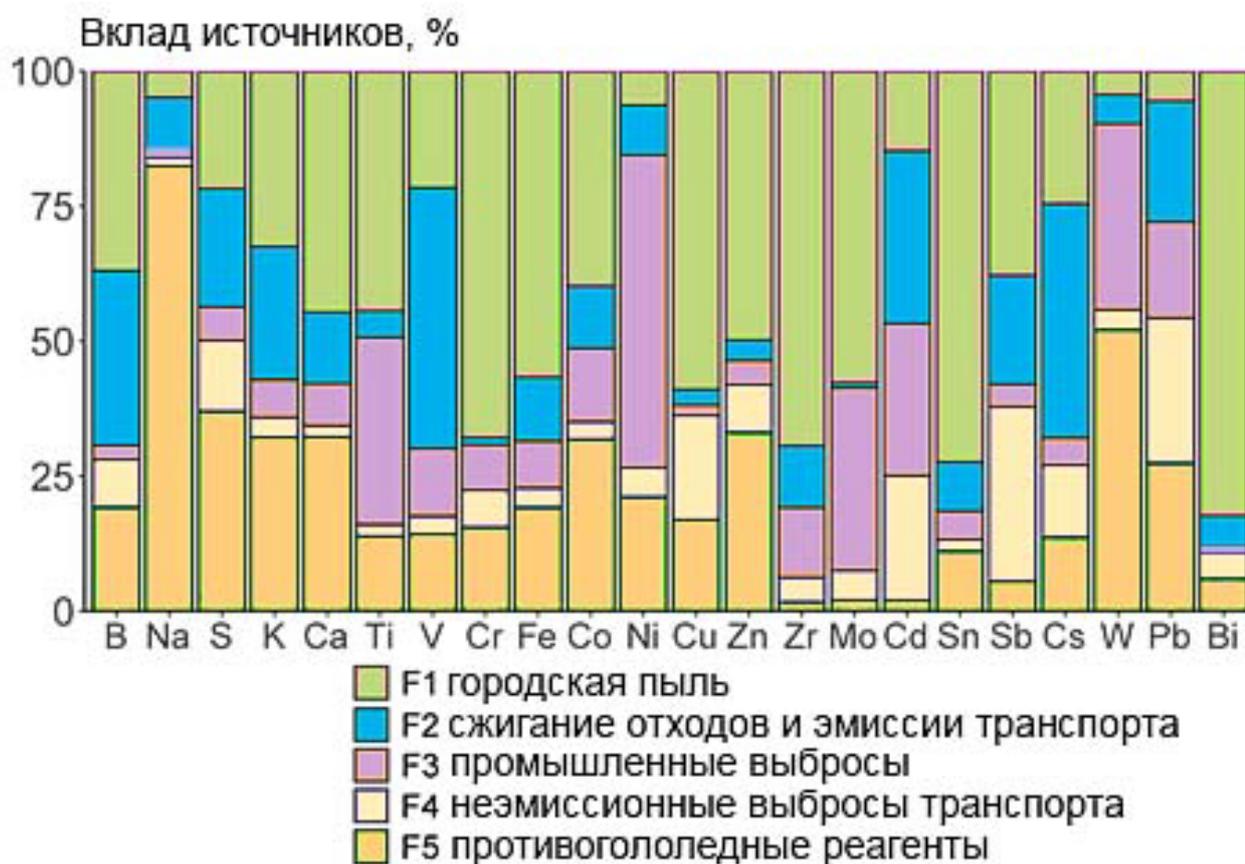


Рис. 1. Источники загрязнителей в частицах PM_{10} аэрозолей Москвы (по данным Serdyukova et al., 2023)

Дорожная пыль и почвы часто выделяются как единый источник, либо фактор поступления твердого вещества в атмосферу наряду с противогололедными реагентами, эмиссионными и неэмиссионными выбросами транспорта, выбросами промышленности

(Miller-Shulze et al., 2015; Alastuey 2016; Zappi et al., 2023; Ioannidou et al., 2023). Однако последние исследования показывают, что химический состав дорожной пыли и городских почв формируется под воздействием различных источников (Candeias et al., 2020; Deng et al., 2020; Vlasov et al., 2023), то есть эти две среды могут рассматриваться как отдельные источники элементов.

В Москве проведен ряд исследований поведения ТММ в депонирующих, то есть накапливающих продукты техногенеза средах (Геохимия..., 1990). В Москве в целом (Vlasov et al., 2021), а также в Восточном и Западном округах Москвы исследованы содержания тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в различных фракциях дорожной пыли и почв (Власов, 2015; Власов и др., 2015; Касимов и др., 2016; Kasimov et al., 2020; Vlasov et al., 2023; Рыжов и др., 2016; Набелкина, Кошелева 2018; Восток–запад Москвы..., 2016). Однако сопряженного анализа фракционирования элементов в микрочастицах снеговой и дорожной пыли, почв и донных отложений в пределах городского урбанизированного бассейна на территории западной части Москвы и Новой Москвы ранее не проводилось.

Цель работы – проанализировать распределение тяжелых металлов и металлоидов во фракциях снеговой и дорожной пыли, придорожных почв и донных отложений в бассейне р. Сетунь.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценить уровни накопления и источники растворенной и взвешенной форм ТММ в снеге и его фракции PM_{10} .
2. Провести эколого-геохимическую оценку накопления и источников ТММ в дорожной пыли и её фракциях PM_1 и PM_{1-10} .
3. Охарактеризовать фракционирование и источники ТММ в микрочастицах придорожных почв.
4. Изучить аккумуляцию ТММ во фракциях PM_1 и PM_{1-10} донных отложений.
5. Выполнить интегральную оценку загрязнения микрочастиц в компонентах ландшафтов городского бассейна.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являются снежный покров, дорожная пыль, почвы и донные отложения бассейна р. Сетунь, на юго-западе

Москвы (рис. 2). Работа основывается на данных, полученных автором в ходе полевых работ в бассейне р. Сетунь проведенных в 2019-2021 гг. Всего для оценки фракционирования ТММ было отобрано 60 образцов снега, 53 образца дорожной пыли 52 образца придорожных почв и 18 образцов донных отложений, а также 94 образца почв в пределах 8 почвенно-геохимических катен. Точки опробования соотнесены с функциональными зонами города и источниками антропогенного воздействия – промышленными предприятиями и автодорогами разного размера. Снег, донные отложения и почвы отбирались в различных функциональных зонах, а придорожные почвы и пыль в основном в транспортной зоне, у различных типов дорог. По уровню интенсивности движения все автодороги разделены на несколько типов в соответствии с шириной дорожного полотна и количеством полос (ГОСТ Р 52398-2005): МКАД и главные радиальные дороги (шоссе) с количеством полос движения в одну сторону больше четырёх; крупные дороги с тремя-четырьмя полосами, средние с двумя полосами и малые с одной полосой в одну сторону. В снеге изучены рН, электропроводность, ионный состав, содержание ТММ в растворенной и взвешенной форме и во фракции PM_{10} снеговой пыли. В дорожной пыли, придорожных почвах и донных отложениях измерены рН, электропроводность, содержание органического углерода, гранулометрический состав, концентрация ТММ во фракциях PM_{1000} , PM_{1-10} , PM_1 .

Выделение фракций PM_{10} в образцах снега осуществлялось методом размер-селективного осаждения – отмучивания (Вадюнина, Корчагина, 1986). Получение фракций PM_1 и PM_{1-10} дорожной пыли, почв, донных отложений осуществлялось с помощью центрифугирования (Fedotov et al., 2011; Ermolin, Fedotov, 2016; Padoan et al, 2017), диспергация производилась с помощью ультразвукового воздействия. Гранулометрический состав определялся на лазерном гранулометре «Analysette 22. Laser klasse 1» (Германия). Измерение рН проводилось потенциометрическим методом, измерение электропроводности – кондуктометрическим методом. Ионный состав фильтрата снега (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) определялся на жидкостном ионном хроматографе «Стайер» (Россия). Содержание ТММ определялось во ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) масс-спектральным (ICP/MS) и атомно-эмиссионным методами (ICP/AES) с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре «Elan-6100» и атомно-эмиссионном спектрометре «Optima-4300» («Perkin Elmer», США) соответственно.

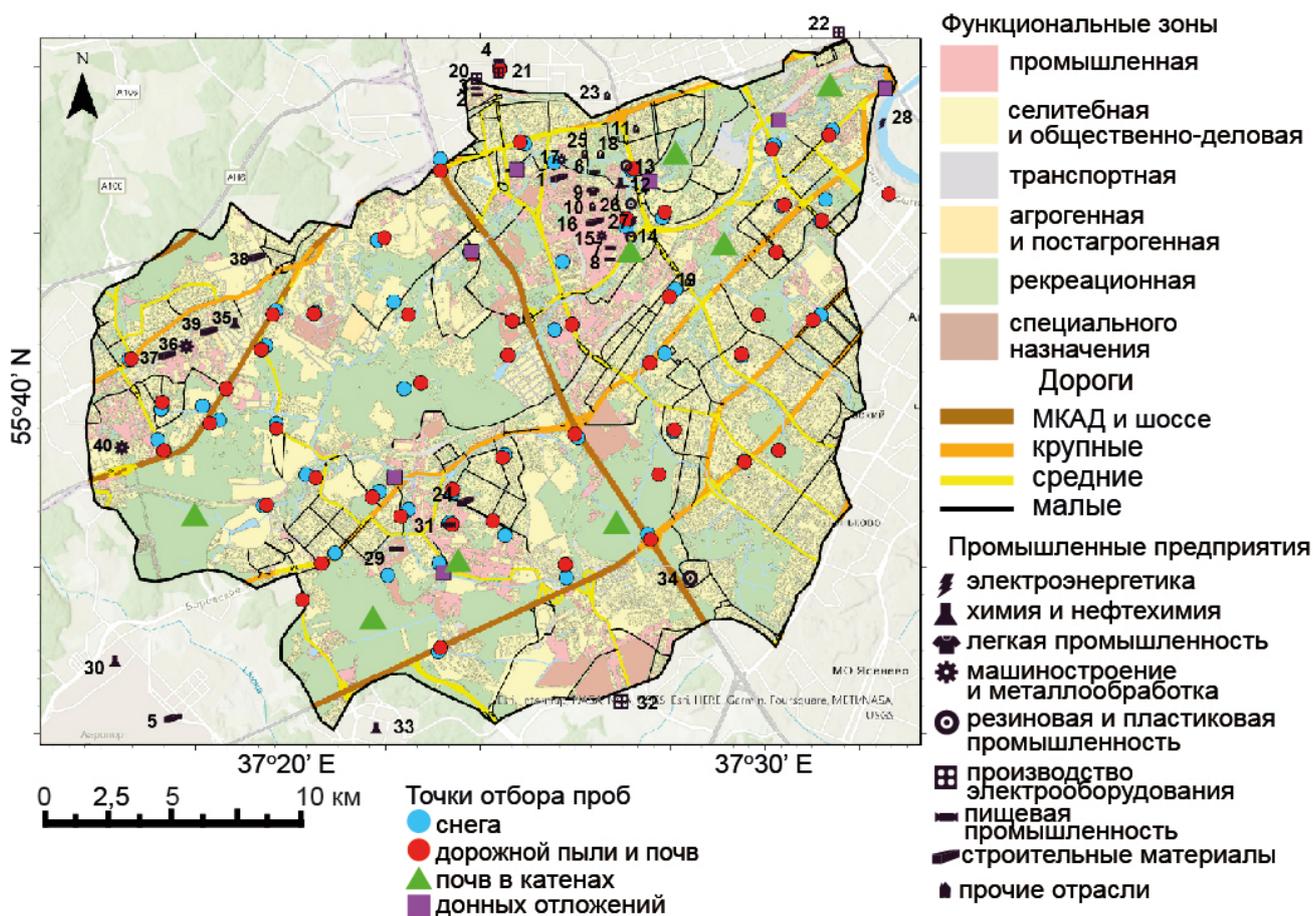


Рис. 2. Точки опробования и источники антропогенного воздействия на территории бассейна р.Сетунь, в г.Москва (составлено автором по данным Open Street Map)

Для оценки содержания ТММ во фракциях снеговой и дорожной пыли, почв и донных отложений применялись геохимические коэффициенты. Для почв рассчитан коэффициент концентрации $K_c = C_i / C_{\phi}$, где C_i – концентрация i -го элемента в пробе, C_{ϕ} – среднее содержание в фоновых объектах. Суммарный коэффициент загрязнения рассчитан по формуле: $Z_c = \sum K_c - (n-1)$, для $K_c > 1,5$, n – число элементов с $K_c > 1,5$. Для всех объектов рассчитан коэффициент обогащения $EF = (C_i / C_{\text{образец}}) / (C_i / C_{\text{земная кора}})$, где C_i – концентрация i -го элемента, C_{Ref} – концентрация нормирующего элемента в пробе и в верхней части континентальной земной коры (Rudnick, Gao, 2014). Нормирующий элемент – Al. Приняты градации EF для антропогенно-преобразованных почв <1 – нет обогащения; 1–3 – слабое; 3–5 среднее; 5–10 – выше среднего; 10–25 – сильное; 25–50 – очень сильное; >50 – чрезвычайно сильное обогащение (Chabukdhara et al., 2016). Также рассчитан суммарный коэффициент

обогащения $TEF = \sum EF - (n-1)$, для $EF > 1,5$, n – число элементов с $EF > 1,5$ Уровни интегральных показателей TEF и Z_c (табл. 1) определялись в соответствии с градациями экологической опасности по (Методические рекомендации..., 2006) с изменениями по (Касимов и др., 2012). В качестве фоновых значений для почв использованы содержания элементов в PM_{1000} почв Сатино (Самонова и др., 2011, 2018). Для снега использованы данные опробования в Можайском районе. Коэффициент D_x рассчитывался как соотношение концентрации ТММ во фракции к общей концентрации ТММ в валовом образце. Вклады источников поступления ТММ в депонирующие среды определялись методом главных компонент (PCA - Principal component analysis) с расчетом абсолютных значений главных компонент (Absolute Principal Component Scores - APCS) и дальнейшим применением множественных линейных регрессий – Multiple Linear Regressions (MLR) (Thurston, Spengler, 1985).

Таблица 1. Уровни интегральных показателей и градации экологической опасности по (Методические рекомендации..., 2006) с изменениями по (Касимов и др., 2012)

Уровни интегральных показателей и экологической опасности	Обогащение дорожной и снеговой пыли ТММ (TEF)	Загрязнение ТММ (Z_c)	
		снег	почвы
Низкий, неопасный	<32	<32	<16
Средний, умеренно-опасный	32–64	32–64	16–32
Высокий, опасный	64–128	64–128	32–64
Очень высокий, очень опасный	128–256	128–256	64–128
Максимальный, чрезвычайно опасный	> 256	> 256	> 128

Научная новизна. В работе решена важная для геохимии ландшафтов задача – изучено содержание ТММ в микрочастицах снеговой и дорожной пыли, придорожных почв и донных отложений на территории урбанизированного водосборного бассейна р. Сетуни. Впервые проведены сопряженные исследования состава фракций PM_{10} снеговой пыли и PM_1 и PM_{1-10} дорожной пыли, почв и донных отложений. Для изученной территории впервые установлены факторы накопления ТММ в микрочастицах придорожных почв и дорожной пыли и рассчитаны вклады факторов в поступление поллютантов в депонирующие среды. Исследован широкий спектр тяжелых металлов и

металлоидов, в том числе слабоизученные в геохимическом плане Sb, As, Mo, Bi, W. Новым результатом является определение состава ТММ гранулометрических фракций донных отложений и снеговой пыли. Введен новый аддитивный коэффициент для оценки загрязнения ТММ фракций депонирующих сред.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты и сопряженного геохимического анализа гранулометрических фракций снеговой и дорожной пыли, почв и донных отложений применимы для решения теоретических и прикладных задач геохимии ландшафта. Исследования выполнялись в рамках проектов РНФ № 19–77–30004П «Технология оценки экологического состояния Московского мегаполиса на основе анализа химического состава микрочастиц в системе «атмосфера–снег–дорожная пыль–почвы–поверхностные воды» (Мегаполис)», мегагранта Министерства образования и науки РФ № 075–15–2021–574 «Мегаполис как остров загрязнения и тепла: междисциплинарный гидроклиматический, геохимический и экологический анализ» и гранта РГО «Москва-река от истоков до устья: гидролого-геохимическая оценка экологического состояния», в которых бассейн р. Сетунь рассматривался как модельная территория для эколого-геохимической оценки. Полученные результаты будут способствовать развитию научно-обоснованного контроля экологического состояния урбанизированных территорий и разработке мер, направленных на улучшение условий проживания городского населения. Результаты предлагаемой работы используются в научных отчетах по проектам и включены в ряд учебных курсов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Достоверность результатов работы обеспечена обширным фактическим материалом, полученным в аккредитованной лаборатории с использованием современного оборудования, детальным анализом полученных данных и литературы по теме исследования, а также апробацией основных результатов на научных конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. В снежном покрове бассейна р. Сетунь влияние автотранспорта приводит к увеличению минерализации снеговых вод, доли взвешенных форм ТММ и содержания твердых частиц

по сравнению с фоновой территорией. Фракция PM_{10} снеговой пыли обогащена Sb, Cu, Cd, Bi, Zn, Pb и W.

2. В дорожной пыли уровень загрязнения ТММ с уменьшением размера фракции от PM_{1000} до PM_1 увеличивается от среднего и высокого до очень высокого уровня. Обогащение фракций PM_1 и PM_{1-10} Sb, Bi, Zn, Cu и Sn связано с транспортными выбросами, а As с промышленными выбросами и поступлением из загрязненных почв.

3. В придорожных почвах и их фракциях PM_1 и PM_{1-10} суммарное загрязнение уменьшается по сравнению с дорожной пылью до среднего и высокого уровня. Cd, Sb и Zn поступают во фракцию PM_{1-10} почв преимущественно из дорожной пыли, а во фракцию PM_1 – с транспортными выбросами.

4. В бассейне р. Сетунь промышленное и транспортное воздействие привело к загрязнению фракций PM_1 и PM_{1-10} донных отложений рек Cd, Sb, Cu и Zn.

5. Во фракции PM_{10} снеговой и дорожной пыли, почв и донных отложений выявлена универсальная геохимическая ассоциация Cd-Sb-Zn, обусловленная транспортными и промышленными выбросами.

Личный вклад соискателя. В основе работы лежат исследования автора, проводимые с 2019 г. на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Выполнено полевое опробование и подготовка образцов почв, пыли, снега, в которых автором выделены фракции PM_1 , PM_{1-10} . Автором самостоятельно выполнены измерения содержания органического углерода, pH, электропроводности, гранулометрического состава, составлен иллюстративный и табличный материал, выполнен анализ литературных источников. Во время лабораторных работ уточнена и применена методика выделения из почв и пыли фракций PM_1 и PM_{1-10} . Автором выполнена статистическая обработка и обобщение полевых и лабораторных материалов и даны основанные на них эколого-геохимические оценки накопления и источников тяжелых металлов и металлоидов во фракциях депонирующих компонентов ландшафтов бассейна р. Сетунь.

Апробация работы, публикации. Материалы работы обсуждались на конференциях: XXVI Международная научная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2019", XIV Международный Симпозиум "Проблемы

экоинформатики" (1-3 декабря 2020), VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (27-30 мая 2021), «Инженерная экология – 2021» (1-3 декабря 2021). Материалы по макрокомпонентному составу снега опубликованы в журнале *Geography, Environment, Sustainability* (Eremina, Vasil'chuk, 2019), и в журнале Вестник Московского университета, серия география (Васильчук и др., 2021). Результаты анализа микроэлементов в снеге опубликованы в журнале *Atmosphere* (Vlasov et al., 2020), автор участвовала в обсуждении результатов, в написании текста статьи и создании иллюстративного и табличного материала Данные по фракционированию и определению источников ТММ в дорожной пыли опубликованы в журнале *Environmental Science and Pollution Research* (Vlasov et al., 2023). Во всех статьях, опубликованных в соавторстве вклад автора определяющий.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, изложенных на 147 страницах с 29 таблицами и 62 рисунками, списка литературы и 6 приложений. Список литературы состоит из 424 наименований, в том числе 267 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю академику РАН, проф. Н.С. Касимову за обучение геохимическому мышлению, ценные, конструктивные указания при написании работы и помощь в её планировании.

Автор благодарна проф. Н.Е. Кошелевой за консультации по статистическому анализу и проведению полевых работ, ст.н.с. Д.В. Власову за помощь в проведении полевых работ и консультации по расчетам геохимических показателей, доц. П.П. Кречетову за знания и навыки, полученные во время обучения в университете, проф. М.И. Герасимовой за ценные замечания при составлении легенды почвенной карты бассейна р. Сетунь, ст.н.с. О.В. Черницовой за помощь в сборе информации и составлении почвенной карты бассейна р. Сетунь, доц. М.Ю. Лычагину за консультации по анализу химического состава снега, н.с. Е.В. Терской и Л.В. Добрыдневой за помощь в выполнении ряда лабораторных работ, Л.А. Безбердой и П.Р. Енчилик за помощь в проведении методической работы по фракционированию пыли и почв и снеговой пыли, О.Н. Ериной и Д.И. Соколову, а также М.А. Тершиной. за помощь в отборе проб донных отложений и определении границ водосборного бассейна, Д.В. Котелевцу, Е.А. Рейнату, и А.П.

Гинзбургу за помощь в полевых работах по отбору проб почв, снега и дорожной пыли, коллективу кафедры геохимии ландшафтов и географии почв за поддержку работ и обсуждение результатов исследований.

Приношу искреннюю благодарность моим родителям проф. Ю.К. Васильчуку и д.г.н. А.К. Васильчук за многолетнюю и всестороннюю поддержку моей научной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, приведены защищаемые положения. В первой главе проведен обзор литературы, посвященной источникам поступления ТММ в депонирующие компоненты ландшафта: снежный покров, дорожную пыль, почвы, донные отложения. Рассмотрены работы, затрагивающие регион исследования. Обоснованы выбранные для исследования фракции PM_1 , PM_{1-10} . Вторая глава посвящена рассмотрению объектов и методов исследования. В третьей главе представлены результаты анализа химического состава снега. Рассмотрена пространственная вариация макрокомпонентного состава, дана характеристика загрязнения снега ТММ в растворенной и взвешенной формах и фракции PM_{10} снеговой пыли. Оценены возможные источники поступления поллютантов в снежный покров. В четвертой главе обсуждается фракционирование ТММ в дорожной пыли. Описаны физико-химические параметры пыли и её обогащение относительно кларка континентальной земной коры, проанализированы возможные источники поступления ТММ в дорожную пыль. В пятой главе описано фракционирование ТММ придорожных почвах и донных отложениях, также описаны возможные источники ТММ в почвах бассейна и их фракциях. В шестой главе проведено сравнение обогащения фракций ТММ снеговой и дорожной пыли, придорожных почв и донных отложений. Выявлены универсальные и частные индикаторы антропогенного воздействия. В заключении приведены основные выводы.

Первое защищаемое положение (основано на результатах главы 3). *В снежном покрове бассейна р. Сетунь влияние автотранспорта приводит к увеличению минерализации снеговых вод, доли взвешенных форм ТММ и содержания твердых частиц по сравнению*

с фоновой территорией. Фракция PM_{10} снеговой пыли обогащена *Sb, Cu, Cd, Bi, Zn, Pb* и *W*.

Одним из информативных объектов при выявлении техногенного загрязнения атмосферы является снежный покров. Изучение химического состава снега позволяет выявить зоны загрязнения и количественно рассчитать поставку ТММ в течение зимнего периода (Линник, 1985; Василенко и др., 1985; Лычагин, Исаченкова 1987; Viklander, 1996, 1999; Telmer et al., 2004; Таловская, 2022). Основными источниками загрязняющих веществ в снежном покрове городов служат выбросы автотранспорта, промышленности, топливно-энергетического комплекса и противогололедные реагенты (ПГР). Техногенное воздействие привело к значительному увеличению пылевой нагрузки (в 2-7 раз), содержания твердых частиц в снеге (в 2-6 раз), минерализации (в 1,4- 2,7 раз) в городском бассейне по сравнению со снегом фоновой территории, а также к смене ионного состава талой снеговой воды с гидрокарбонатно-кальциевого в фоновых условиях на хлоридно-кальциевый-натриевый в городе. Фоновые концентрации взвешенных и растворенных форм ТММ сопоставимы с полученными ранее для Можайского района, и понижены по сравнению с Одинцовским городским округом (Касимов и др., 2016; Vlasov et al., 2020). На фоновой территории также как и во всем бассейне выявлены повышенные относительно общего содержания концентрации ТММ в частицах PM_{10} , что проявляется в низких и средних значениях суммарного коэффициента загрязнения Z_c , Суммарный коэффициент обогащения ТЕФ, рассчитывающийся относительно кларковых содержаний, отражает различие между концентрациями ТММ в снеговой пыли и во фракции PM_{10} в бассейне р.Сетунь (рис. 3). С ростом антропогенной нагрузки доля взвешенных форм *Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba* в снеге увеличивается с 25-65% до 75-96%. Техногенные источники в бассейне р. Сетунь поставляют в окружающую среду химические элементы образующие специфические парагенетические ассоциации элементов в снеге: противогололедные реагенты и дорожная пыль поставляют (*W-Na⁺-Cl⁻-Ca²⁺-Al-U* в растворенной форме, *Na⁺-Sc-Mg-Al-Ti-Ca-Sr-V-Co-Fe* – во взвешенной и *Na⁺-Mg-Co-Sr-W-Ti-Fe-Mn* – в PM_{10} снеговой пыли), городские почвы (*K-Rb-Th-Cs-U* во взвешенной форме и *Li-Cs-Th-K-Nb-Al-Sc* в PM_{10} взвеси), транспортный фактор (*V-As* и *Zn-Cd* в растворенной форме, *Cr-Mo-Sn-Sb-Bi-Pb* во взвешенной форме и *P-S-Cd-Pb-Bi* и *Cu-Zn* – в PM_{10} взвеси), промышленность и сжигание отходов (*Ni-Cu-Zn-Cd-As* во взвешенной форме).

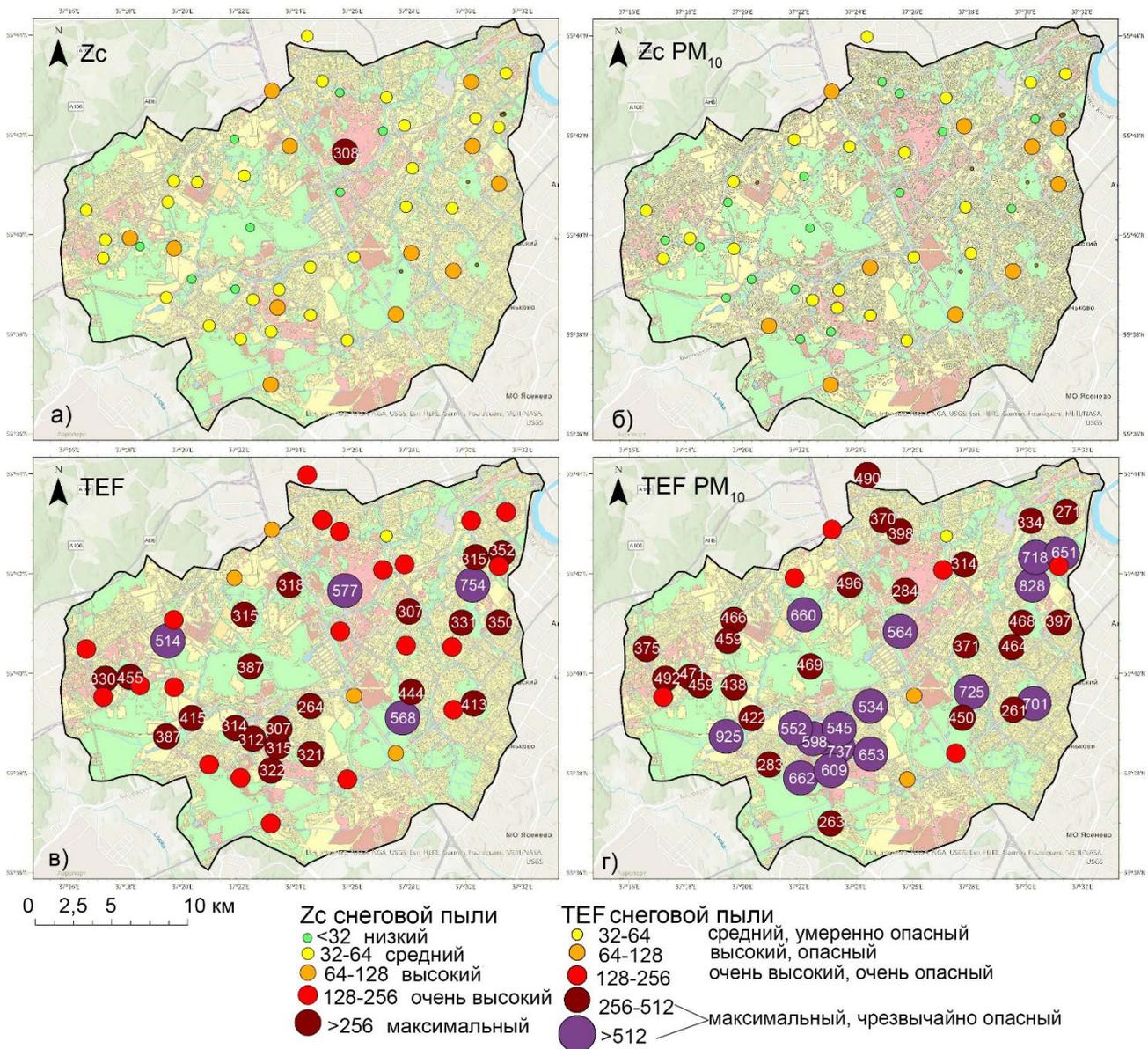


Рис. 3. Суммарное загрязнение Z_c а) снеговой пыли, б) фракции PM_{10} снеговой пыли и суммарное обогащение TEF в) снеговой пыли, г) её фракции PM_{10}

Второе защищаемое положение (основано на результатах главы 4). В дорожной пыли уровень загрязнения TMM с уменьшением размера фракции от PM_{1000} до PM_1 увеличивается от среднего и высокого до очень высокого уровня. Обогащение фракций PM_1 и PM_{1-10} Sb, Bi, Zn, Cu и Sn связано с транспортными выбросами, а As с промышленными выбросами и поступлением из загрязненных почв.

В отсутствие снежного покрова информативным индикатором загрязнения атмосферы служит дорожная пыль. Помимо атмосферных выпадений, источниками

поступления тяжелых металлов в дорожную пыль являются частицы придорожных почв, грунтов, продукты абразии дорожного покрытия и разметки, истирания шин и тормозных колодок автотранспорта, коррозии металлических частей автотранспорта, остатки противогололедных смесей и измельченного мусора (Fergusson et al., 1980; Adachi, Tainosho 2004; Iijima et al., 2007; Murakami et al., 2007; Irvine et al., 2009; Пляскина, Ладонин 2009; Limbeck, Puls, 2011; Nazzal et al., 2013). В бассейне р. Сетунь выявлено подщелачивание пыли крупных дорог со значениями pH до 9,6, которое связано с остатками противогололедных смесей, абразией бордюрного камня, попаданием на дорожное полотно строительной пыли и уборкой дорог щелочными моющими средствами.

Во фракции PM₁₀₀₀ дорожной пыли особенно на дорогах с высокой интенсивностью движения накапливается Sb (рис. 4), являющаяся индикатором износа тормозных колодок (Sanders et al., 2003; Grigoratos, Martini, 2015) и истирания шин (Thorpe, Harrison, 2008; Areygei et al., 2011).

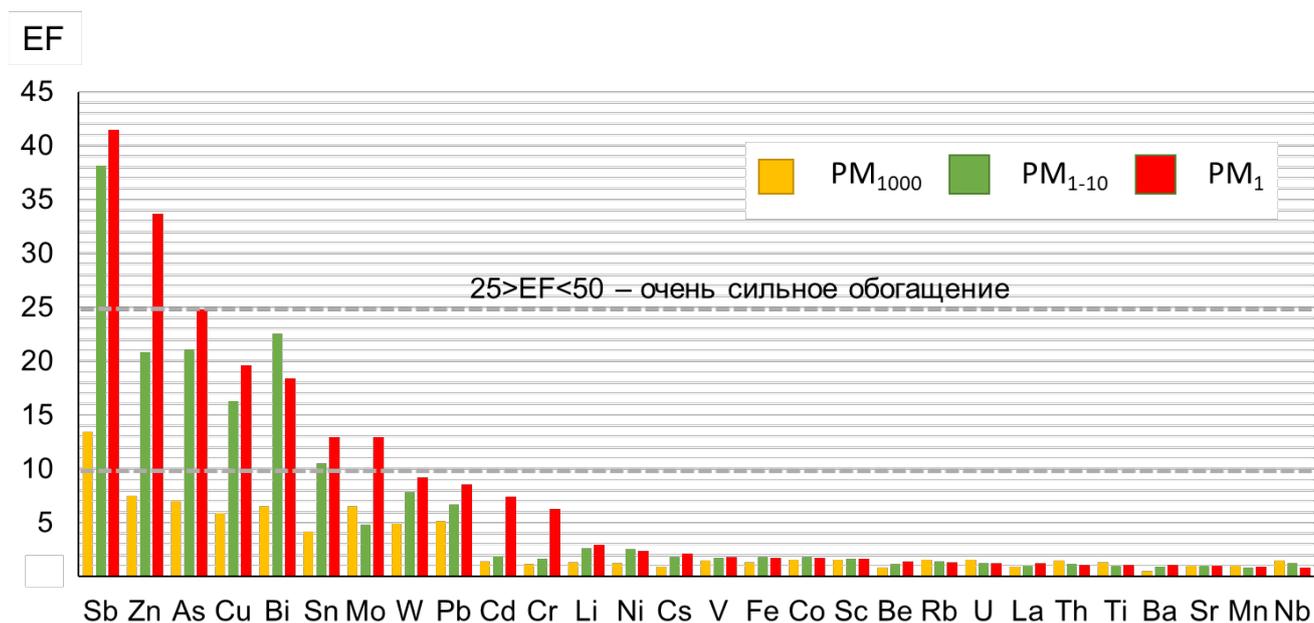


Рис. 4. Коэффициент обогащения фракций PM₁, PM₁₋₁₀ и PM₁₀₀₀ дорожной пыли ТММ

Тем не менее, согласно результатам PCA/APCS-MLR для фракции PM₁₀₀₀, роль транспортного фактора слабо выражена, вклад в накопление Sb составляет <20%, вклад промышленного фактора в накоплении V, Cr, Co, Ni, Sn и ряда других поллютантов максимален, Zn, As, Sr накапливаются в результате строительных работ и производств,

Cu и в результате выбросов связанных со сжиганием отходов, при этом большое количество литофильных элементов попадают в дорожную пыль с частицами минеральных грунтов (Rb, Be, Li, Al, Cs, Ba, La, Nb, Th, U). (рис. 5).

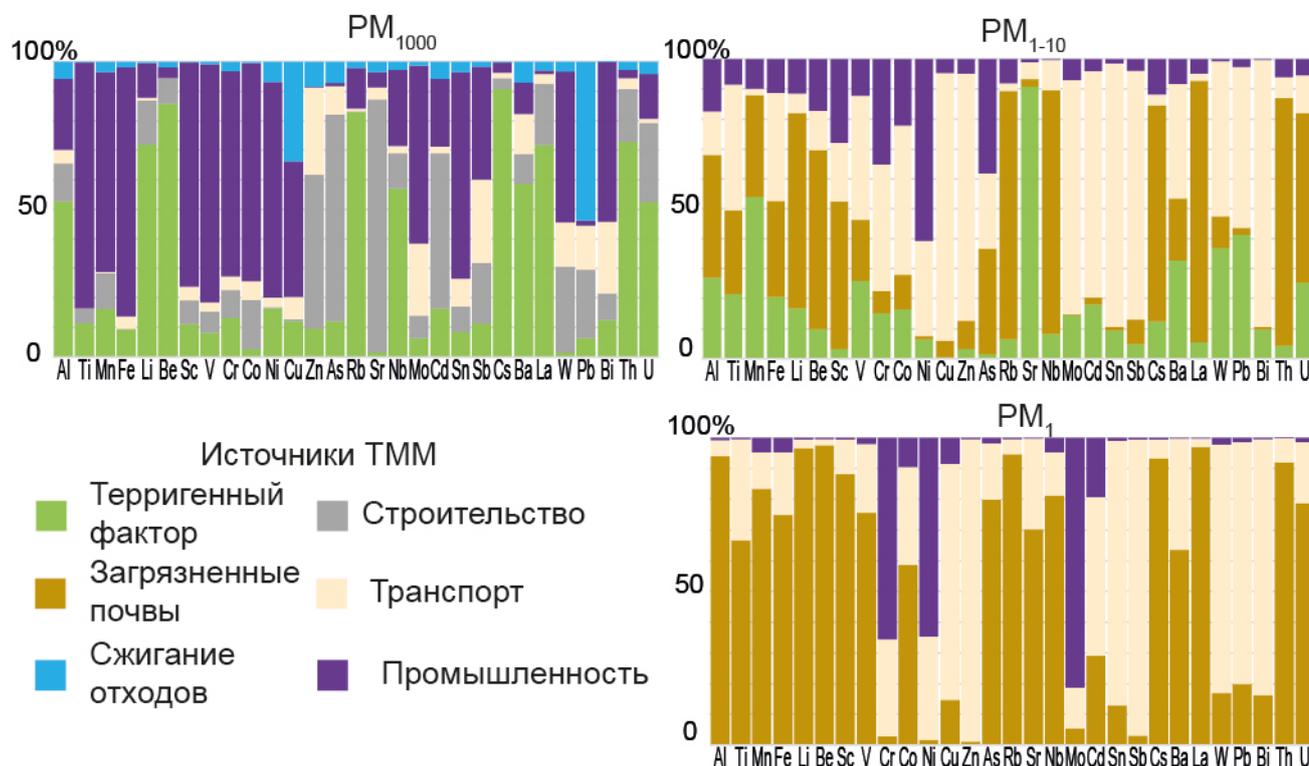


Рис. 5. Вклады источников поступления ТММ во фракции дорожной пыли, выявленные методом PCA/APCS-MLR

Во фракции PM_{1-10} наиболее интенсивно по сравнению с другими фракциями накапливается Bi, часто связываемый с эмиссиями моторного масла (Cal-Prieto et al., 2001) и износом тормозных колодок и металлических частей автомобилей (Vlasov et al., 2020, 2021). В этой фракции ведущая роль в накоплении элементов связана с транспортными выбросами (Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, Bi), поступление литофильных элементов связано с выдуванием частиц загрязненных почв (Al, Ti, Mn, Sr) и минеральной пыли (La, Li, Be, Rb, Nb), промышленный фактор составляет значимый вклад в накопление Ni и As.

Во фракции PM_1 накопление Sb, Zn, As, Cu, Sn, Mo, W, Pb, Cd, Cr заметно интенсивнее, чем в других фракциях, эти элементы могут поступать в пыль при истирании шин и дорожного покрытия, а также при износе тормозных колодок (Limbeck, Puls, 2011). Максимальный вклад в содержание ТММ во фракции PM_1 связан с загрязненными почвами (V, Co, Th, U, Sr, As) и транспортным воздействием (W, Pb, Bi,

Sb, Sn, Zn, Cu), промышленный фактор имеет значительный вклад в накопление Cr, Ni, Mo.

С уменьшением размера частиц (PM_{10} , PM_{1-10}) суммарный коэффициент обогащения ТЕФ значительно возрастает во всех частях бассейна до очень высокого, чрезвычайно опасного уровня 266-1606. Наиболее интенсивное суммарное обогащение характерно для тонких фракций пыли малых дорог и дворов. Малые дороги характеризуются средними значениями ТЕФ (PM_{10}) выше 256, а дворы выше 210. Для МКАД, крупных, малых дорог характерно обогащение фракций PM_{10} по сравнению с фракцией PM_{1-10} , а для шоссе, средних дорог, парков и дворов – наоборот наиболее обогащенной оказалась фракция PM_{1-10} , при истирании тормозных колодок автомобилей образуются преимущественно частицы такого размера (Iijima et al., 2007).

Третье защищаемое положение (основано на результатах главы 5). *В придорожных почвах и их фракциях PM_{10} и PM_{1-10} суммарное загрязнение уменьшается по сравнению с дорожной пылью до среднего и высокого уровня. Cd, Sb и Zn поступают во фракцию PM_{1-10} почв преимущественно из дорожной пыли, а во фракцию PM_{10} – с транспортными выбросами*

Почвы, благодаря своим биогеохимическим свойствам и большой активной поверхности тонкодисперсной части, являются важнейшей депонирующей средой для поллютантов (Stroganova et al., 1997). Состав ТММ в придорожных почвах обусловлен выхлопными газами автомобилей, эмиссией моторного масла, износом тормозных колодок, истиранием шин, абразией бордюрного камня и дорожного покрытия (Власов, 2015; Селезнёв, Климшин, 2020; Власов и др., 2022; Безбердая, 2022), реже – промышленными выбросами (Demetriades, Birke, 2015). Техногенными носителями ТММ в аэральном загрязнённых почвах могут служить такие соединения, как магнетит, сульфиды, фосфаты (Водяницкий, 2014).

В бассейне р. Сетунь во фракция PM_{1000} почв выявлены низкие и средние уровни обогащения (ТЕФ). Обогащение фракций PM_{10} и PM_{1-10} сопоставимо. Основные поллютанты фракций придорожных почв, выделенные на основании двух подходов – расчета коэффициентов загрязнения (K_c) и обогащения (EF) – Sb, Zn, и Sn. Соотношение ТЕФ фракций придорожных почв и дорожной пыли (рис. 6) показывает значительное обогащение пыли по сравнению с почвами. Такой эффект встречается не часто поскольку

почвы подвержены длительному экспонированию загрязнению, а пыль, периодически смываясь дождевыми осадками и городскими службами во время уборки, индицирует кратковременное техногенное. воздействие. В промышленных районах, например на востоке Москвы Вi, Cd, Zn, Pb, Mo в почвах накапливались интенсивнее чем в дорожной пыли (Власов, 2015), в Севастополе почвы также были сильнее загрязнены Pb, Zn, Cd, Sb, чем дорожная пыль (Безбердая, 2022).

Повышенное загрязнение дорожной пыли по сравнению с почвами связано как с очень значительным транспортным воздействием (Pagotto et al., 2001; Adewumi, 2022; Adewumi, 2022) приводящим к сильному загрязнению пыли, так и с регулярной рекультивацией почв, которая снижает их загрязнение. Во фракции PM₁₀₀₀ дорожной пыли все элементы за исключением Cd интенсивнее накапливались, чем в той же фракции почв. Это частично объясняется тем, что придорожные почвы отбирались в основном на плоских, автономных позициях с преимущественно атмосферным поступлением вещества. В таких почвах ТММ могут выноситься с нисходящими токами влаги (Восток-Запад..., 2016), но щелочная и нейтральная реакция среды, а также легкосуглинистый гранулометрический состав характерны для придорожных почв бассейна р. Сетунь больше способствует закреплению ТММ (Zn, Cu, Pb, Cd, Cr), чем их выносу (Перельман, Касимов, 1999; Водяницкий, 2009).

Подсыпание нового материала, либо создание нового горизонта РАТ в нарушенных при строительстве почвах приводит к снижению уровня загрязнения, такие рекультивационные мероприятия проводятся в Москве регулярно (Постановление N 743-ПП), в почвах парков в этом случае формируются более устойчивые ореолы загрязнения (Тишкина и др., 2010). Ранее для ЗАО Москвы было показано влияние рекультивации на снижение загрязнения почв (Кошелева и др., 2018). В бассейне р. Сетунь эффект рекультивации закономерно проявляется не только в почвах в целом, но и в её гранулометрических фракциях, поэтому ТЕФ элементов для почв в бассейне р. Сетунь значительно ниже, чем для дорожной пыли.

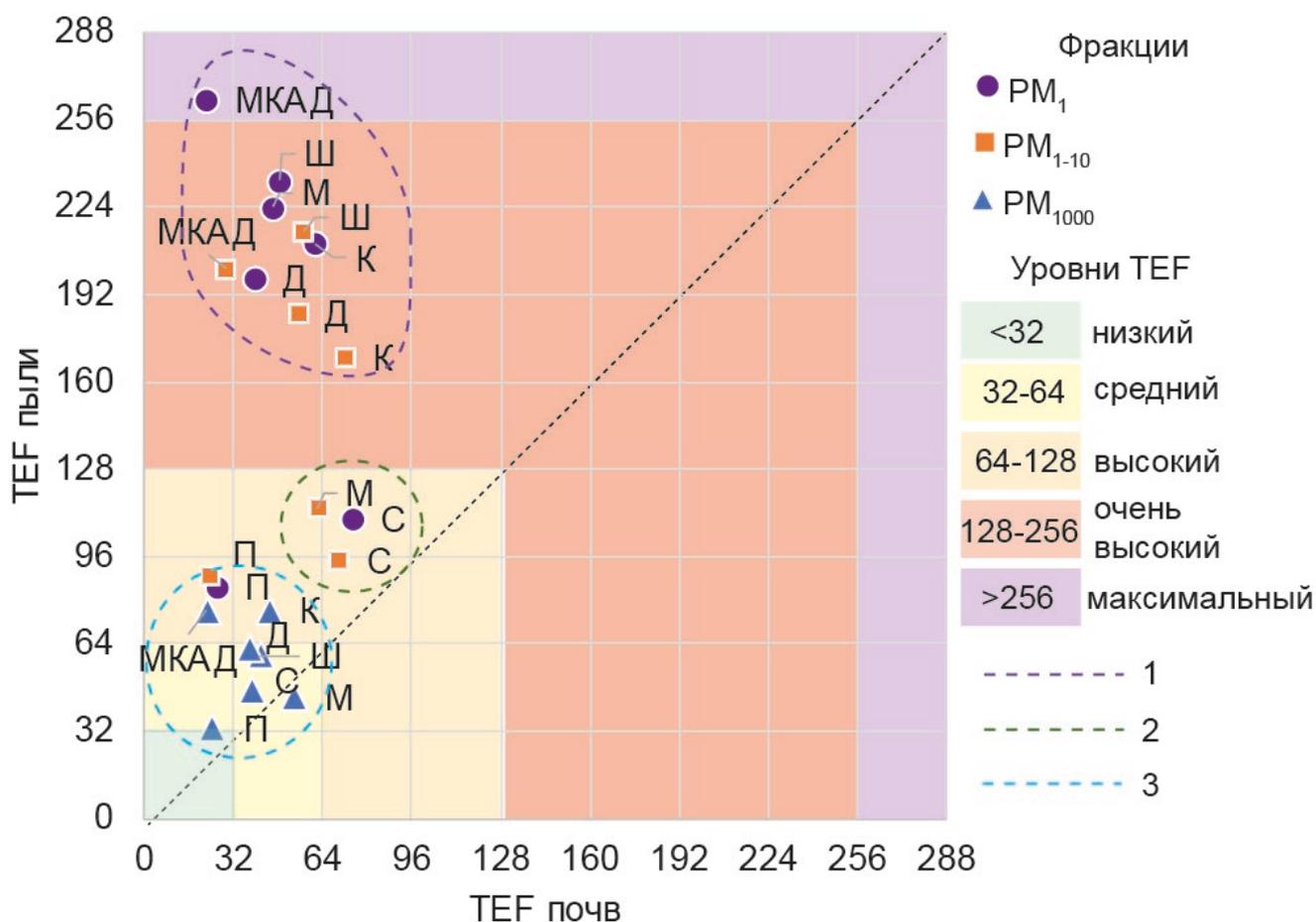


Рис. 6. Соотношение значений TEQ в разных фракциях почв и пыли. Области значений TEQ: 1 – фракций PM_1 и PM_{1-10} пыли и почв наиболее крупных дорог и дворов; 2 – фракций PM_1 и PM_{1-10} пыли и почв средних и малых дорог; 3 – фракции PM_{1000} пыли и почв и всех фракций пыли и почв парков. МКАД – Московская кольцевая автодорога, Ш – шоссе, К – крупные дороги, С – средние дороги, М – Малые дороги, Д – дворы, П – Парки

Согласно данным моделирования PCA/APCS-MLR, наибольший вклад в формирование химического состава фракции PM_{1000} почв (рис. 7) вносит терригенный фактор (Al, Ti, Mn, Li, Sc, V, Rb, Nb), промышленные (Co, U, Mo, Co, Ni) и транспортные выбросы (Sn, Pb, Cd, Bi, Cr и Cu), дорожная пыль, загрязненная ПГР вносит до 35% Sr и по 10% W, Sb, Ca и 5% Na. Во фракции PM_{1-10} дорожная пыль доминирует как фактор накопления элементов (Cu, Zn, W, Mo, Na, Ca). В PM_1 Pb, Bi, Mn, Fe накапливаются вследствие влияния промышленного фактора, в то же время остальные элементы в том числе и приоритетные загрязнители Cd, Sb, Zn связаны преимущественно с транспортным воздействием.

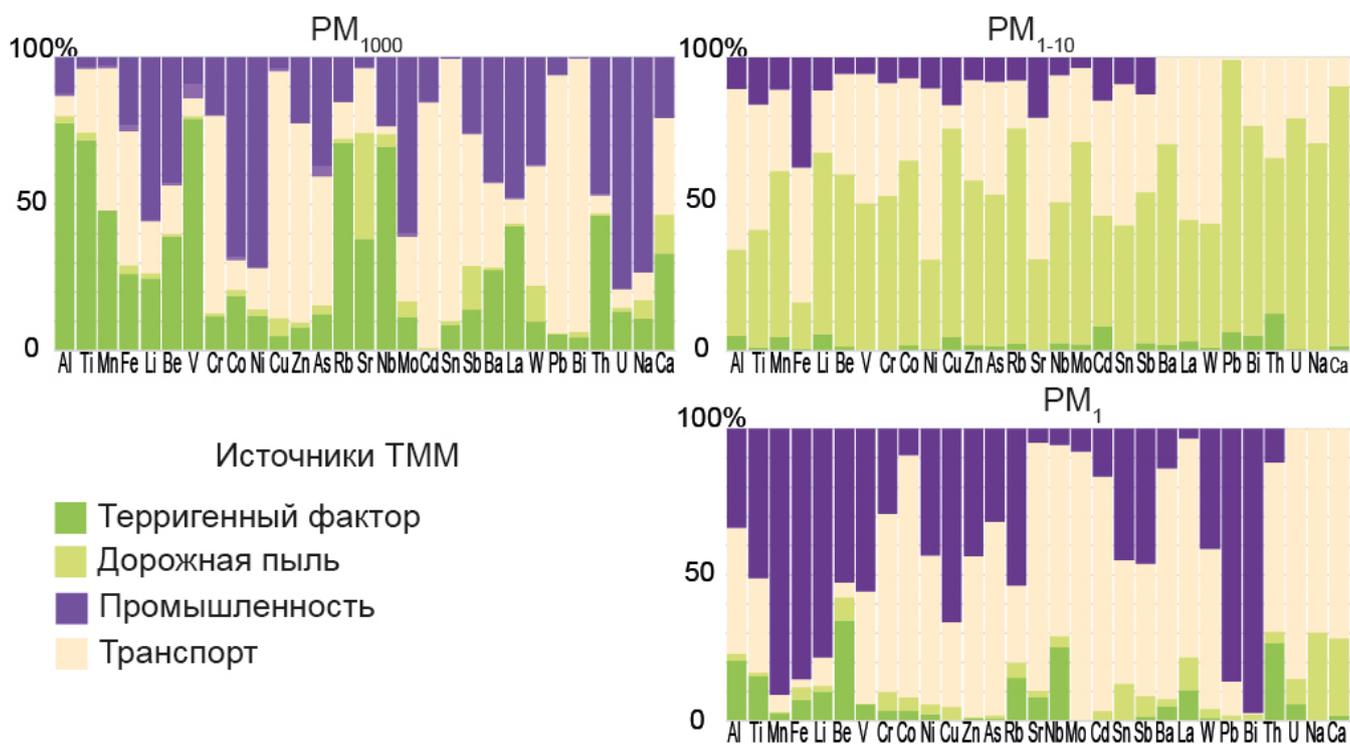


Рис. 7. Вклады источников поступления ТММ во фракции придорожных почв

Четвёртое защищаемое положение (основано на результатах главы 5). В бассейне р. Сетунь промышленное и транспортное воздействие привело к загрязнению фракций PM_{10} и PM_{1-10} донных отложений рек Cd , Sb , Cu и Zn .

Донные отложения городских рек отражают воздействие различных источников загрязнения, в том числе и снос материала с водораздельных поверхностей (Янин, 2018; Ahilan et al., 2018; Arnous, Hassan 2006; Chen et al., 2021). Среди источников поступления загрязнителей в донные отложения рек помимо промышленных и коммунально-бытовых сбросов отмечают атмосферные выпадения на водную поверхность, снегосплав, поверхностный, внутрипочвенный и грунтовый стоки (Lee et al 2003; Zeng et al 2019). Наиболее разнообразный геохимический спектр показывает фракция PM_{1-10} донных отложений р. Сетунь, что связано с её протяженностью и большим разнообразием источников поступления материала (в нижнем индексе приведен кларк концентрации КК): Cd_{12} , Sb_9 , Zn_7 , Sn_6 , As_5 , W_5 , Bi_5 , Cu_4 , Pb_3 , Mn_2 , Fe_2 , Li_2 , V_2 , Cr_2 , Rb_2 , Mo_2 . Наиболее высокое превышение кларка литосферы показывает фракция PM_1 донных отложений р. Навершка, что связано с поступлением материала из промышленной зоны: Sb_{54} , Cd_{19} , Cu_{10} , Sn_7 , Zn_6 , Pb_4 , As_3 , Mn_2 , V_2 , W_2 , Bi_2 . Для р. Навершки выявлены кратковременные превышения таких параметров воды, как минерализация, мутность, рН и концентрации

растворенных Al, Cd, Rb, V и Li по сравнению с р. Сетунь и её притоками, что связывается с залповыми сбросами сточных вод (Tereshina et al., 2021). Коэффициент ТЕФ фракций PM₁ и PM₁₋₁₀ донных отложений р. Навершка наиболее высокий во всем бассейне (табл. 2), он сопоставим с ТЕФ фракций дорожной пыли. ТЕФ частиц PM₁ дорожной пыли малых дорог составляет 224, а PM₁₋₁₀ – 114.

Таблица 2. Коэффициенты EF и ТЕФ во фракциях донных отложений бассейна р. Сетунь, цветами обозначены градации ТЕФ

Объект	Фракция	EF			ТЕФ
		>10	5-10	3-5	
Сетунь (14)	PM ₁₀₀₀		Mo ₇ Cd ₇	Sb ₄ Zn ₄ Bi ₃	28
	PM ₁₋₁₀	Cd ₁₃ Sb ₁₀	Zn ₈ Sn ₇ W ₅ As ₅ Bi ₅ Cu ₅	Pb ₄	60
	PM ₁	Cd ₁₇	Sb ₉ Zn ₉ Sn ₆ Bi ₆ As ₅ Cu ₅	W ₄ Pb ₄	62
Сетунька (2)	PM ₁₀₀₀			Sb ₄ Cd ₄	14
	PM ₁₋₁₀	W ₁₁	Sb ₇ Cd ₇ Zn ₅ Sn ₅	Bi ₄ Pb ₃ As ₃	39
	PM ₁		Cd ₅	Sb ₄ Zn ₃	18
Навершка (2)	PM ₁₀₀₀	Cd ₁₂	Sb ₉ Mo ₆ Zn ₅ Sn ₅ Cu ₅	Pb ₃ As ₃ W ₃ Bi ₃	48
	PM ₁₋₁₀	Sb ₂₈ Cd ₂₆ Cu ₁₉ Sn ₁₅ Zn ₁₀	Pb ₈ V ₆ Mn ₅ W ₅	As ₄ Ti ₄ Ni ₃	129
	PM ₁	Sb ₁₀₇ Cd ₃₈ Cu ₂₀ Sn ₁₄ Zn ₁₂	Pb ₇ As ₆ W ₅	Mn ₄ Bi ₃ V ₃	216
Донные отложения в среднем (18)	PM ₁₀₀₀		Cd ₇ Mo ₅ Sb ₅ W ₅	Zn ₄ Bi ₃ Sn ₃ As ₃	30
	PM ₁₋₁₀	Cd ₁₄ Sb ₁₂	Zn ₈ Sn ₈ Cu ₆ W ₆ As ₅ Bi ₅	Pb ₄ V ₃	65
	PM ₁	Sb ₂₀ Cd ₁₈	Zn ₈ Sn ₇ Cu ₆ , Bi ₆ As ₅	Pb ₄ W ₄	74

Коэффициенты ТЕФ фракций донных отложений р. Сетунька в рекреационной зоне, показывают наиболее низкие уровни загрязнения. Приоритетными загрязнителями тонких фракций донных отложений являются Sb, Cd, Cu, Sn, Zn, при этом поступление Sb значительно более интенсивно, чем в дорожной пыли. Эти элементы поступают в донные отложения и в дорожную пыль с транспортными выбросами – истиранием шин, износом тормозных колодок и металлических частей автомобилей (Limbeck, Puls, 2011; Goddard et al., 2019; Morera-Gómez et al., 2020). Поступление Cd-Sb-Zn также связано с

воздействием предприятий металлообрабатывающей промышленности (Okuda et al., 2007; Demetriades, Birke, 2015), которые представлена в бассейне р. Сетунь более чем 160 объектами.

Пятое защищаемое положение (основано на результатах главы 6). *Во фракции PM_{10} снеговой и дорожной пыли, почв и донных отложений выявлена универсальная геохимическая ассоциация Cd-Sb-Zn, обусловленная транспортными и промышленными выбросами.*

Повышенным содержание ТММ одновременно в нескольких компонентах показывает генетическую близость накопления и наличие единого источника поступления и идентифицирует геохимические парагенезисы (Власов, Касимов, 2016; Касимов et al., 2020). Для системы «снег-дорожная пыль-почвы-донные отложения» характерен общий парагенезис Cd-Sb (рис. 8), связанный с преимущественно с транспортными выбросами. Zn-W – специальные индикаторы истирания дорожного покрытия и шин, характерные для снега и дорожной пыли.

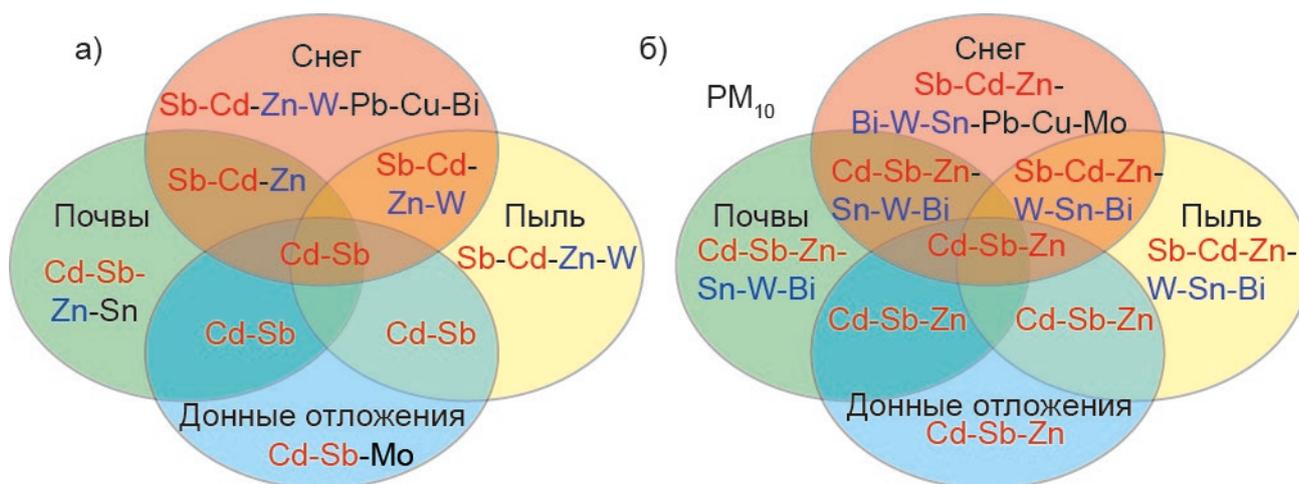


Рис. 8. Парагенезисы ТММ в а) компонентах городских ландшафтов бассейна р.Сетунь и б) в их фракциях PM_{10}

Cd-Sb-Zn – универсальные индикаторы техногенного воздействия для частиц PM_{10} депонирующих компонентов ландшафтов бассейна р. Сетунь, эти элементы поступают с истиранием шин, в результате износа тормозных колодок и других металлических частей автомобилей, а также с выбросами металлургии и промышленности, связанной с металлообработкой. Sn-W-Bi – специальные индикаторы для снега, почв и пыли связанные с абразией дорожного покрытия, шин, металлических частей автомобилей. По

уровням ТЕФ депонирующие среды бассейна и их фракции ранжируются следующим образом: PM_{10} снеговой пыли > общая снеговая пыль > PM_1 пыли > PM_{1-10} пыли > PM_{1-10} почв > PM_{1-10} донных отложений > PM_1 донных отложений > PM_1 почв > PM_{1000} пыли > PM_{1000} почв > PM_{1000} донных отложений. (рис. 9). Во всех случаях наиболее загрязнены ТММ тонкие фракции, что связано как с источниками поступления поллютантов неэмиссионные транспортные выбросы, для которых характерна размерность частиц до 10 мкм, так и со свойствами тонких частиц, в частности, повышенной сорбционной способностью. Значительно более сильное суммарное обогащение снега, по сравнению с другими компонентами вероятно объясняется большим пылевым загрязнением атмосферных аэрозолей в зимний период (Shevchenko et al., 2003; Qi et al., 2016; Liu et al., 2017; Chen et al., 2023), что связывается с дополнительными источниками загрязнения (сжиганием угля и биомассы и выбросами, спровоцированными домовым отоплением). Фракция PM_{10} снеговой пыли, общая снеговая пыль и фракции PM_1 и PM_{1-10} дорожной пыли в бассейне р.Сетуни представляют наибольшую экологическую опасность, поэтому эти компоненты ландшафта необходимо исследовать в рамках мониторинга.

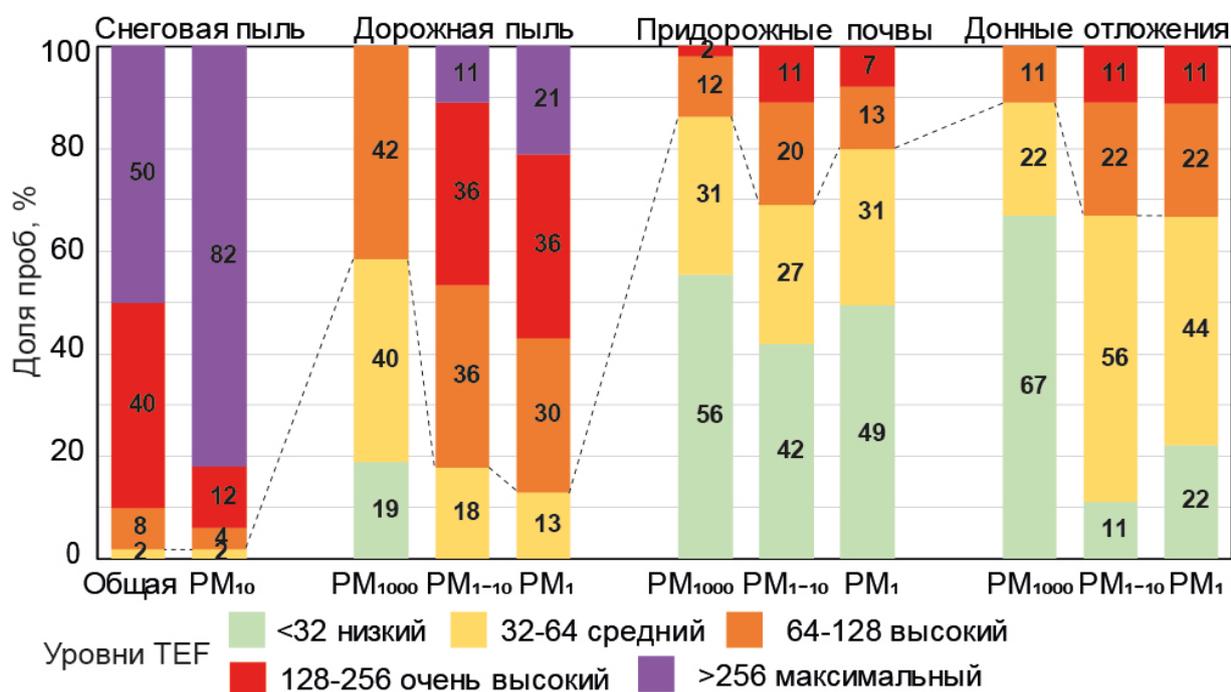


Рис. 9. Уровни экологической опасности фракций снеговой и дорожной пыли, придорожных почв и донных отложений. Пунктирная линия разделяет средний и высокий уровни загрязнения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Транспортное воздействие привело к значительному увеличению пылевой нагрузки, минерализации, содержания твердых частиц и доли взвешенных форм тяжелых металлов и металлоидов в снеге городского бассейна по сравнению с фоновой территорией. Частицы PM_{10} снеговой пыли обогащаются Sb, Cu, Cd, Bi, Zn, Pb в результате транспортного воздействия, а W в результате попадания в снег частиц дорожной пыли.
2. В дорожной пыли бассейна р. Сетунь интенсивность загрязнения увеличивается с уменьшением размера частиц, геохимические ассоциации различаются в гранулометрических фракциях. Поступление Sb, Bi, Zn, Cu, Sn во фракцию PM_{1-10} связано с транспортными выбросами, а As – с промышленными выбросами. Во фракцию PM_1 Sb, Zn и Sn поступают с выбросами транспорта, Mo и Cu в связи с промышленными выбросами, а As из загрязненных почв.
3. Придорожные почвы за счет периодического подсыпания нового материала, накапливают тяжелые металлы и металлоиды менее интенсивно, чем дорожная пыль, которая становится основным источником Cd, Sb, Zn в микрочастицах почв.
4. Накопление тяжелых металлов и металлоидов донными отложениями зависит от положения относительно источников загрязнения. Наиболее подвержены техногенному воздействию донные отложения р. Навершка в промышленной зоне, микрочастицы PM_1 и PM_{1-10} загрязнены Cd, Sb, Cu и Zn.
5. Для микрочастиц системы «снег-дорожная пыль-почвы-донные отложения» характерен универсальный парагенезис Cd-Sb-Zn связанный с транспортными и промышленными выбросами, при этом наиболее загрязнены снеговая и дорожная пыль. Доля максимального и очень высокого уровня экологической опасности среди исследованных проб в PM_{10} снеговой пыли составляет 94%, в частицах PM_1 дорожной пыли – 57%, микрочастицы почв и донных отложений показывают в среднем наиболее низкие уровни опасности, доля очень высоких значений TEF почв составляет 7% для фракции PM_1 , а в донных отложениях – 11%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI:

1. Vlasov D.V., **Vasil'chuk J.Yu.**, Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Contamination levels and source apportionment of potentially toxic elements in size-fractionated road dust of Moscow // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Res. 30. – P. 38099–38120. – DOI: 10.1007/s11356-022-24934-1 (JIF = 5,4)
2. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., **Васильчук Дж Ю.**, Ерёмина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и содержание водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы в 2014-2016 гг // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. – 2021. – № 2. – С. 35–43. (SJR = 0,11)
3. Vlasov D.V., **Vasil'chuk J.Yu.**, Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – Is. 9. – P. 907. DOI: 10.3390/atmos11090907 (JIF =2,90)
4. Eremina I.D., **Vasil'chuk J.Yu.** Temporal Variations in Chemical Composition of Snow Cover in Moscow // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2019. – Vol. 12. – Is. 4. – P. 148–158. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-79 (SJR= 0,31)

Иные публикации автора по теме диссертации

1. Безбердая Л. А., Енчилик П. Р., Кошелева Н. Е., **Васильчук Дж Ю.**, Семенков И. Н., Власов Д. В., Касимов Н. С. Методика выделения гранулометрических фракций почв и пыли методом центрифугирования // *Доклады Международного симпозиума Инженерная экология, РНТОРЭС им. А.С. Попова*. – Москва. – 2023. – С. 178–182.
2. Черницова О. В., Кошелева Н. Е., **Васильчук Дж. Ю.**, Герасимова М. И., Пискарева В. М., Ежелев З. С., Гасина А. И. Картографирование почвенного покрова на урбанизированном водосборе для моделирования водного, твердого и химического стока // *Доклады Международного симпозиума Инженерная экология РНТОРЭС им. А.С. Попова*. – Москва. – 2023. – С. 84–88.
3. Енчилик, П. Р. Семенков И. Н., Безбердая Л. А., **Васильчук Дж. Ю.**, Касимов Н. С. Влияние параметров ультразвукового диспергирования при гранулометрическом фракционировании на содержание элементов в микрочастицах почв и дорожной пыли // *Доклады Международного симпозиума Инженерная экология РНТОРЭС им. А.С. Попова*. – Москва. – 2023. – С. 206–211.

4. Власов Д. В., **Васильчук Дж. Ю.**, Кошелева Н. Е., Касимов Н. С. Фракционный состав дорожной пыли в западной транспортной и восточной промышленной частях Москвы // Доклады Международного симпозиума Инженерная экология РНТОРЭС им. А.С. Попова. – Москва. – 2021. – С. 28–32.
5. Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I., Shinkareva G.L., **Vasil'chuk J.Yu.** Longitudinal patterns of different pollutant concentrations in the Setun River // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 834. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/834/1/012051. (SJR = 0,18)
6. Erina O.N., Sokolov D.I., Tereshina M.A., **Vasil'chuk J.Yu.**, Kasimov N.S. Seasonal dynamics of nutrients and organic matter in urban stream // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 163. – P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016303004.
7. Черницова О. В., Кошелева Н. Е., Поповичева О. Б., Ерина О. Н., **Васильчук Дж. Ю.**, Власов Д. В., Енчилик П. Р. Информационные технологии в оценке эколого-геохимического состояния урбанизированных территорий // Доклады Международного симпозиума Инженерная экология РНТОРЭС им. А.С. Попова. – Москва. – 2020. – С. 21–27.

Полный список работ доступен на странице автора в АИС "ИСТИНА"
http://istina.msu.ru/profile/jessica_vasilchuk/

