



На правах рукописи

Шевченко Андрей Викторович

**ИНДИКАТОРЫ СОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ МАЛЫХ ГОРОДОВ
СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ)**

1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Екатеринбург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН).

Научный руководитель: Селезнев Андриан Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института фундаментального образования ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», старший научный сотрудник лаборатории урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН.

Официальные оппоненты: Таловская Анна Валерьевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Дзюба Екатерина Алексеевна, кандидат географических наук, доцент, заведующая лабораторией экологии и охраны природы ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Ведущая организация: Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Защита состоится 24 сентября 2026 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета «24.2.358.04» при ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ) <http://www.psu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук,
доцент



Поморцева Анна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Значительная часть населения России проживает в малых и средних по численности городах, многие из которых являются моногородами. В результате интенсивного техногенного воздействия в городской среде формируется специфический круговорот веществ и, как следствие, геохимические аномалии (Касимов, 2013). Среди загрязнителей наибольшее внимание в исследованиях уделяется тяжелым металлам и металлоидам (ТММ), и мелкодисперсным частицам, представляющим потенциальную опасность для здоровья человека (Vlasov et al., 2020a; Müller et al., 2022; Kasimov et al., 2025).

Оценка экологического состояния городской среды в промышленных регионах – одна из актуальных задач настоящего времени, требующая поиска эффективных и экономически обоснованных подходов (Charlesworth et al., 2003; Seleznev et al., 2024; Ярмошенко и др., 2024б). Основной источник информации о состоянии окружающей среды – государственный экологический мониторинг, однако его эффективность ограничена высокой финансовой и кадровой затратностью, недостаточным пространственным охватом (Таборов, 2022). Охват такого мониторинга, а также различных эколого-геохимических исследований зачастую ограничен крупными городами, в то время как малые и средние по численности города, в том числе моногорода, зачастую остаются вне сети регулярных наблюдений, что приводит к дефициту информации о качестве среды обитания населения таких городов. В этих условиях актуальными становятся эколого-геохимические исследования, направленные на совершенствование подходов к получению информации о состоянии городской среды. Они позволяют оценивать последствия антропогенной трансформации ландшафтов на основе анализа индикационных свойств депонирующих сред. Помимо традиционных депонирующих сред (почва, донные отложения, снежный покров), исследуются современные седиментационные объекты: пылегрязевые отложения (Seleznev et al., 2020; Huang et al., 2022), снеогрязевая пульпа (СГП) (Seleznev et al., 2019, 2025), дорожная пыль (Du et al., 2013; Vlasov et al., 2022; Bezberdaya et al., 2024). Особенности формирования, накопления и миграции таких объектов позволяют получать интегральные оценки состояния городской среды (Селезнев и др., 2023; Ярмошенко и др., 2024).

Важный аспект оценки состояния городской среды – исследование процессов образования, накопления и переноса твердого осадочного материала в рамках седиментационного каскада городских ландшафтов (US EPA, 2008, 2009), который в условиях города отличается преобладанием техногенных источников, высокой скоростью процессов и строгой пространственной организацией (Fryirs, 2012; Wohl et al., 2018). Для малых и средних по численности городов количественные оценки

процессов образования и накопления пылегрязевых отложений ранее практически не проводились.

Цель исследования – обосновать использование свойств пылегрязевых отложений и объектов, участвующих в их формировании (СГП и ненарушенный снежный покров), в качестве индикаторов эколого-геохимического состояния жилых зон малых и средних по численности городов на примере Свердловской области.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести эколого-геохимические исследования в малых и средних по численности населения городах Свердловской области на основе опробования современных пылегрязевых отложений, СГП и снежного покрова в жилой зоне.

2. Оценить фоновые концентрации металлов и металлоидов в пылегрязевых отложениях жилых зон исследуемых городов.

3. На основе данных о химическом составе пылегрязевых отложений оценить степень загрязнения исследуемых городов с помощью расчета коэффициентов концентрации (K_c), суммарного показателя загрязнения (Z_c) интегральных индексов загрязнения Немерова (NPI и $INPI$).

4. Оценить общие и удельные запасы пылегрязевых отложений, пылевую нагрузку в жилой зоне исследуемых городов.

5. Разработать модель для оценки интенсивности образования пылегрязевых отложений в городской среде и провести оценку для исследуемых городов.

6. Сформировать перечень показателей для комплексной оценки современного экологического состояния городской среды на основе данных о минеральном, химическом и гранулометрическом составах пылегрязевых отложений, СГП и снежного покрова.

Объект исследования – жилые зоны малых и средних по численности населения городов Свердловской области, различающихся по промышленной специализации и уровню техногенной нагрузки при сходных климатических условиях: Верхняя Пышма, Качканар, Серов и Алапаевск.

Предмет исследования – геохимические свойства пылегрязевых отложений, СГП и ненарушенного снежного покрова в жилых кварталах городов.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые:

1. для малых и средних по численности населения городов Свердловской области оценено эколого-геохимическое состояние жилой зоны с использованием данных о составе пылегрязевых отложений, СГП и снежного покрова;

2. восстановлены начальные геохимические условия элементов в пылегрязевых отложениях жилых зон исследованных городов и оценена степень загрязнения городской среды;

3. проведены оценки пылевой нагрузки, интенсивности образования пылегрязевых отложений и их запасов в жилых зонах малых и средних по численности городов Свердловской области.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость исследования заключается:

- в развитии представлений о применимости современных седиментационных объектов в качестве эколого-геохимических индикаторов состояния городской среды;
- развитии методологических подходов к анализу и интерпретации данных о химическом, минеральном и гранулометрическом составе современных седиментационных объектов;
- доказательстве того, что физико-химические свойства пылегрязевых отложений характеризуют уровень техногенной нагрузки на городские территории.

Практическая значимость исследования:

- разработаны новые и усовершенствованы существующие методы и технологии экологического мониторинга территорий городов;
- используемый в исследовании набор индикаторов и апробированные методики могут использоваться органами местного самоуправления, экологическими службами предприятий и научными организациями для экспрессной оценки загрязнения, экологического зонирования городской территории и обоснования природоохранных мер;
- полученные данные об образовании и накоплении пылегрязевых отложений могут быть использованы для усовершенствования применяемых технологий при проведении мероприятий по благоустройству и озеленению городских территорий, а также при формировании планов комплексного развития территорий в части проектирования объектов коммунальной инфраструктуры управляющими организациями, коммунальными службами, девелоперами и администрациями городов;
- определение локальных начальных геохимических условий для городов на основе разработанного подхода позволит проводить эффективную оценку современного загрязнения городской среды;
- данные о вещественном составе пылегрязевых отложений и СГП позволят корректнее подбирать параметры систем водоотведения и фильтрации стока на полигонах, где размещается материал объектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснован новый комплекс показателей вещественного состава пылегрязевых отложений и снежного покрова малых и средних городов, отражающий промышленную специализацию города.

2. Анализ элементного состава пылегрязевых отложений на основе восстановленных начальных геохимических условий позволяет избежать завышенной оценки загрязнения городской территории в сравнении с применением кларков элементов.

3. Анализ взаимосвязей комплекса показателей вещественного состава пылегрязевых отложений, СГП и снежного покрова, а также их пространственное распределение позволяет оценить эколого-геохимическое состояние городской среды и выявить основные источники поступления загрязняющих веществ.

4. Адаптированная к городским условиям модель типа *RUSLE* позволяет оценивать интенсивность образования пылегрязевых отложений в урбанизированной среде.

Достоверность результатов и методов исследования обеспечена использованием ранее обоснованных геохимических и статистических подходов, современных высокочувствительных аналитических методов с выполнением анализов в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам.

Апробация работы, публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 7 в изданиях, индексируемых международными базами данных: Web of Science и Scopus, из которых 3 в журналах перечня ВАК РФ и 2 свидетельства регистрации базы данных. Материалы представлены на LVII Всероссийской конференции молодых ученых «Экология: факты, гипотезы, модели», II Международной конференции «Куражсковские чтения», X и XII Международной молодежной научной конференции «Физика. Инновации. Технологии – ФТИ-2023» и «ФТИ-2025», XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024» и «Ломоносов-2025», Всероссийской конференции с международным участием III Юдахинские чтения и 4th International Conference Smart and Sustainable Cities – SSC-2024.

Связь работы с научными программами. Материалы диссертации получены и обобщены автором в лаборатории урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН в рамках выполнения грантов Российского научного фонда № 24-17-20036 «Методология эколого-геохимического мониторинга селитебных территорий малых, средних и больших по численности городов» в качестве основного исполнителя и № 18-77-10024 «Исследование геохимической трансформации урбанизированных ландшафтов в контексте современных седиментационных процессов» в качестве исполнителя, а также темы плана НИР ИПЭ УрО РАН № FUMN-2024-0001 «Проблемы

экологической безопасности энергетики, промышленности и урбанизированной среды».

Личный вклад автора. Автор принимал участие во всех этапах проведенного исследования: в постановке проблемы, определении цели и задач, получении материалов в ходе полевых работ, сборе, обработке и анализе данных, обсуждении и обобщении результатов, формулировке выводов.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю, к. г.-м. н. А. А. Селезневу за научное сопровождение, ценные советы и помощь в реализации диссертационной работы. Автор благодарен заведующему лаборатории урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН к. б. н. Г. П. Малиновскому и директору ИПЭ УрО РАН к. ф.-м. н. И. В. Ярмошенко за поддержку в написании работы, сборе материала и проведении аналитического этапа исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 199 страницах компьютерного текста, содержит 45 таблиц, 57 рисунков, 3 приложения и список литературы из 177 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Подходы к оценке эколого-геохимического состояния городской среды

В главе проводится обзор существующих методологических подходов к оценке экологического состояния городской среды. Урбанизированная среда рассматривается как сложная природно-техногенная система, в которой формируются интенсивные потоки загрязняющих веществ между источниками, транзитными и депонирующими средами. Особое внимание уделено специфике малых и средних городов, где при высокой техногенной нагрузке наблюдается недостаточная развитость систем экологического мониторинга. Обоснована целесообразность применения эколого-геохимического подхода, основанного на исследовании депонирующих сред как интегральных индикаторов загрязнения. Обоснована сложность выбора геохимического фона в условиях техногенной трансформации городов.

Описана концепция седиментационного каскада – системы последовательных процессов образования, переноса и накопления твердых частиц. В рамках каскада выделены четыре блока: источники, пути переноса (поверхностный сток, ветер), зоны аккумуляции (понижения микрорельефа) и вынос за пределы зоны. Показано, что в условиях урбанизации данные процессы протекают значительно интенсивнее, чем в природных ландшафтах, и определяются особенностями застройки, инфраструктурой и уровнем благоустройства территории. Существует недостаточность данных о процессах формирования и накопления пылегрязевых отложений, а также о роли СГП в миграции загрязняющих веществ.

Глава 2. Материалы и методы

В главе приводится описание объектов исследования, обосновывается выбор ключевых методов опробования и аналитических процедур, а также описываются методы интерпретации данных. Для исследования выбраны четыре малых и средних города Свердловской области: Алапаевск (условно фоновый город, без современного крупного производства); Верхняя Пышма (центр цветной металлургии); Качканар (горно-обогатительный комплекс); Серов (черная металлургия и производство ферросплавов).

Полевой этап (март и июнь 2024 г.) включал ландшафтное обследование и отбор проб в селитебных зонах. На территории каждого города была построена сеть из 40 пробных площадок. Половина площадок относилась к кварталам многоквартирных домов (МКД), другая – к индивидуальному жилому строительству (ИЖС). Площадка отбора проб представляла собой часть квартала – микрокомплекс, включающий внутريدворовую территорию и территорию снаружи квартала и состоящий из функциональных участков, представляющих типичный элементарный ландшафт жилого квартала (*EURL – Elementary Urban Residential Landscape*). В каждом городе было отобрано 40 проб пылегрязевых отложений и по 10 проб СГП и снежного покрова. Пробы пылегрязевых отложений и СГП отбирали на площадке в 3–5 локализациях (Seleznev et al., 2019; Seleznev et al., 2020). Местами отбора служили отложения вдоль дорог, в дренажных канавах, в локальных зонах понижения микрорельефа кварталов МКД и ИЖС; местами отбора СГП – проезды, тротуары, парковки и кучи, в которых складировался счищенный снег с территории площадки. Для отбора проб снежного покрова выбирали места с ненарушенным снежным покровом в отдалении от зон автотранспорта. Отбор снежного покрова выполняли в соответствии с РД 52.04.186-89. На каждой площадке отбора проб выполняли ландшафтное обследование, в рамках которого заполняли анкету, фиксирующую основные ландшафтные и эксплуатационные характеристики участка отбора проб и его локальной водосборной площади.

Гранулометрический анализ пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП выполняли методом сухого просеивания, в результате которого были получены размерные фракции < 0,1 мм, 0,1–1 мм и 1–3 мм. Элементный анализ проб пылегрязевых отложений, твердого вещества СГП и снежного покрова проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Минеральный анализ проб пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП проводили методами рентгенофазового и термического анализов.

Анализ данных вещественного состава отобранных компонентов окружающей среды проводили по следующему алгоритму:

1. Анализ данных вещественного состава объектов опробования:

- базовый статистический анализ распределения концентраций элементов и содержания минералов и гранулометрического состава в объектах опробования;
- построение диаграмм рассеяния и корреляционной матрицы концентраций в парах «элемент-минерал»;
- кластерный анализ элементного состава объектов опробования;
- выявление взаимосвязей вещественного состава объектов опробования на основе расчета отношений концентраций элементов в твердом веществе СГП и снежного покрова к концентрациям в пылегрязевых отложениях; сопоставление результатов с остальными показателями объектов (характеристики площадки отбора, содержание твердого вещества в снеговых пробах и т. д.).

2. Оценка степени загрязнения городской среды:

- восстановление начальных геохимических условий для содержания элементов в пылегрязевых отложениях с применением модифицированного подхода, предложенного в работе (Seleznev et al., 2018);
- расчет индексов K_c , Z_c , NPI и $INPI$ для оценки степени загрязнения городской среды относительно начальных геохимических условий, кларков элементов в верхней континентальной коре (Касимов, Власов, 2015) и средних концентраций элементов в городских почвах (Alekseenko, Alekseenko, 2014); определение количества загрязненных проб. Для проб СГП в качестве фоновой концентрации, в соответствии с подходом в работе (Селезнев и др., 2025), использовали концентрации элементов в снежном покрове на той же обследуемой площадке. Для снежного покрова в исследованных моногородах (Качканар, Серов, Верхняя Пышма) в качестве фоновых значений использованы значения атмосферных выпадений в Алапаевске;
- расчет пылевой нагрузки (кг/км^2 в сут.) и интенсивности аккумуляции загрязняющих веществ в снежном покрове в (мг/м^2 в сут.) в городах;
- построение карт пространственного распределения показателей загрязнения (значения индексов, интенсивности выпадений и т. д.) в QGIS и Surfer.

3. Оценка образования и накопления пылегрязевых отложений, выявление связи между полученными оценками и показателями вещественного состава, ландшафтными характеристиками:

- определение характеристик $EURL$ МКД и ИЖС, формирование модельных площадок на их основе;
- оценка интенсивности образования пылегрязевых отложений с помощью модели, оценка вклада в суммарное осадкообразование учтенных факторов (нарушенные участки покрытий, функциональные микрзоны, сезонность и т. д.);
- оценка площади жилой зоны города;

– оценка запасов пылегрязевых отложений в жилой зоне с применением подхода, предложенного в работе (Seleznev et al., 2019).

Глава 3. Геохимические характеристики объектов опробования в городах

Гранулометрический состав пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП различается. В пылегрязевых отложениях наибольший вклад вносит фракция 0,1–1 мм (63–73 %), доля пылевой фракции < 0,1 мм во всех городах 10–20 %. В твердом веществе СГП доля фракции < 0,1 мм в среднем варьирует от 22 до 31 %.

Минеральный состав пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП существенно трансформирован относительно естественного минерального фона (рис. 2). В Качканаре сохраняется относительное сходство состава объектов с природным фоном, а в Серове, Алапаевске и Верхней Пышме заметно привнесение нехарактерных материалов (строительных материалов, специфических индикаторов металлургического производства и т. д.).

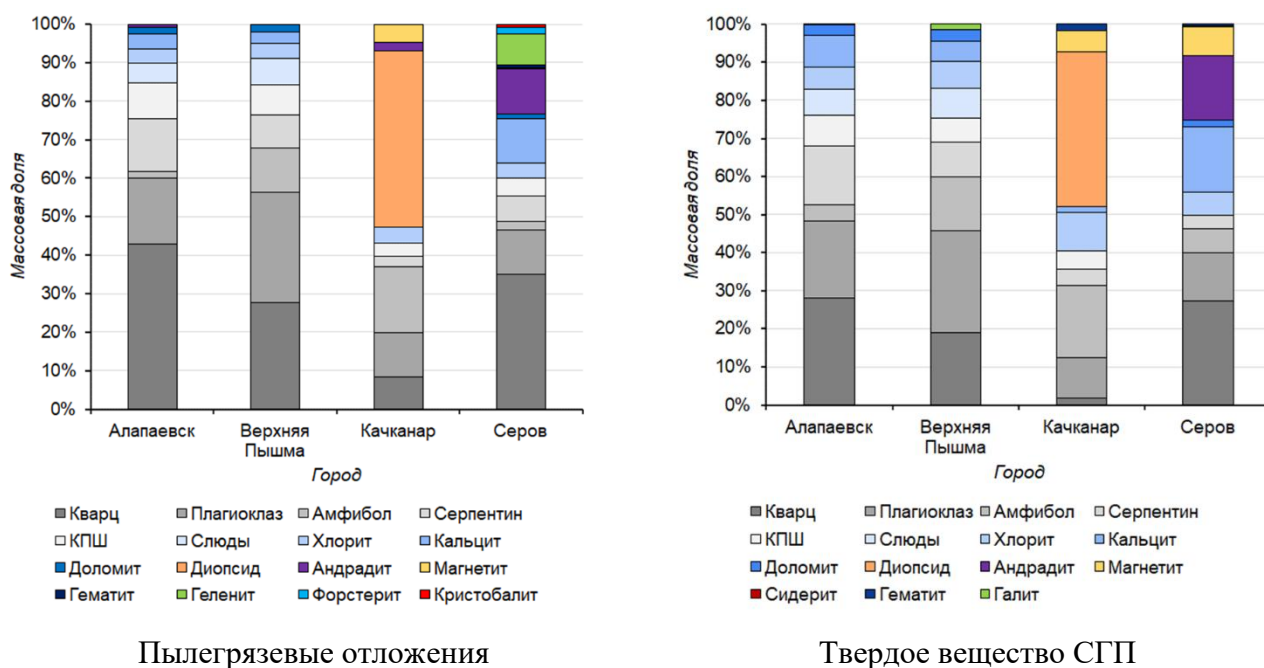


Рисунок 2 – Минеральный состав пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП в исследованных городах

Кластерный анализ химического состава объектов и соотношения средних концентраций элементов в осадке к концентрациям в твердом веществе СГП и взвешенном веществе снежного покрова показал, что в исследованных городах выделяются ассоциации элементов геогенного и техногенного происхождения, при этом их наборы в целом сходны, а различия проявляются преимущественно в степени выраженности отдельных источников. В Качканаре отчетливо выделяются ассоциации типоморфных элементов ($r > 0,9$): Fe–V (в отложениях), Fe–V–Ti (в СГП) и Mg–Mn–Ti–

Fe-Cr-Ni-V (в снежном покрове). В Серове выделяются ассоциации (с $r > 0,7$) комплексного загрязнения металлургических предприятий и автотранспорта: Cd-Zn (в отложениях), Fe-As-Cd-Sb-Pb-Zn-Sn-Cu (в снежном покрове), Cd и Zn имеют наибольшие концентрации во взвешенном веществе снежного покрова. В Верхней Пышме наиболее отчетливо выражены техногенные ассоциации (с $r > 0,7$): Sn-Cd и Sb-Bi-Cu (в отложениях) и Sn-As-Pb-Sb-Cu (в снежном покрове), отражающие совместное влияние автотранспорта и производственной деятельности предприятия цветной металлургии. Соотношения концентраций между объектами опробования показывают, что в Верхней Пышме Bi, Cu, As, Mo и Sb поступают в городскую среду с атмосферными выпадениями. В Алапаевске, как и во всех рассматриваемых городах, в разных вариациях выявлены ассоциации элементов Cu, Sb, Pb, Sn, Cd, Zn, связанных с выхлопным и невыхлопным загрязнением от автотранспорта. Для Cu и Sb фиксируется накопление в твердом веществе СГП во всех городах, что косвенно говорит о том, что эти элементы поступают в результате износа тормозных колодок (Grigoratos, Martini, 2014; Vlasov et al., 2022; Kosheleva et al., 2024). А W поступает в городскую среду в холодное время года в результате истирания наконечников шипов зимней шипованной резины (Peltola et al., 2006; Lindbom et al., 2007; Furberg et al., 2018).

Рассчитанные интенсивности атмосферных выпадений элементов в исследуемых городах позволили выделить элементы с атмосферным путем переноса и выявить для них характерные источники. В Верхней Пышме заметно выделяется интенсивность поступления Cu (в десятки раз выше) и Sb (в четыре раза), чем в других городах, что соотносится с промышленной специализацией города. В Качканаре зафиксированы значительные выпадения типоморфных элементов V, Ni, Mg, Fe, Ti, Mn, Sc и Co, что может говорить о поступлении пыли с открытых карьеров и их отвалов. В Серове наблюдаются значительные выбросы Cr (в 10 и более раз) по сравнению с другими городами и Fe (на порядок выше, чем в Алапаевске и Верхней Пышме), что соотносится с промышленной специализацией города и наличием отвалов ферросплавного завода.

Содержание твердого вещества в СГП исследуемых городов не различается, кроме Качканара (табл. 1). В кварталах МКД и ИЖС Качканара среднее содержание составляет 60 г/л, что на порядок выше, чем в остальных городах (также и по фракциям). Высокая концентрация во фракции > 3 мм указывает на интенсивное использование противогололедных минеральных смесей.

Таблица 1 – Содержание твердого вещества во фракциях СГП в исследованных городах, выраженное в г/л талой воды в пробах

Фракция	Алапаевск		Верхняя Пышма		Качканар		Серов	
	$\bar{x}$	C_v	$\bar{x}$	C_v	$\bar{x}$	C_v	$\bar{x}$	C_v
> 3 мм	0,43	1,6	0,54	0,77	26	1,2	1,2	1,6
1–3 мм	0,83	1,7	0,62	0,64	8,5	1,0	0,77	1,4
0,1–1 мм	3,4	1,3	3,4	0,81	18	0,65	1,4	0,65
< 0,1 мм	1,7	1,0	1,4	0,75	8,1	0,60	1,0	0,66
Взв. вещество	0,047	0,61	0,089	0,65	0,13	1,2	0,091	0,55
Общее	6,3	1,2	5,9	0,71	60	0,79	4,4	1,0

Глава 4. Оценка степени загрязнения жилой зоны исследуемых городов

Для пылегрязевых отложений исследованных городов были восстановлены начальные геохимические условия (табл. 2). Расчеты не проведены для литогенных элементов, которые по результатам кластерного анализа не входят в ассоциации с техногенными загрязнителями. Для сравнения приведены кларки химических элементов в верхней части континентальной коры (Касимов, Власов, 2015) и средние концентрации элементов в городских почвах (Alekseenko, Alekseenko, 2014). Различия в восстановленных концентрациях элементов между городами обусловлены специфическими геохимическими условиями исследуемых территорий. Для Ni были восстановлены начальные геохимические условия двумя способами: по типоморфному элементу (Al) и по минералу (диопсид в Качканаре и серпентин в остальных городах).

Таблица 2 – Восстановленные начальные геохимические условия (мг/кг) в пылегрязевых отложениях исследованных городов, кларки элементов (Касимов, Власов, 2015) и средние концентрации элементов в городских почвах (Alekseenko, Alekseenko, 2014)

Me	Алапаевск	Верхняя Пышма	Качканар	Серов	Кларк	Городские почвы
Bi	0,17	0,23	0,06	0,30	0,23	1,1
Cd	0,43	0,30	0,16	0,77	0,09	0,90
Co	34	27	44	31	15	14
Cu	75	116	47	242	27	39
Mo	1,9	2,0	1,4	4,5	1,1	2,4
Ni*	479 / 502	284 / 339	72 / 321	122 / 164	50	33
Pb	34	32	9,0	44	17	55
Sb	1,1	2,1	0,40	2,1	0,81	1,0
Sn	2,5	3,0	1,0	3,8	2,5	6,8
V	76	96	324	155	106	105
W	3,1	2,3	0,81	13	2,0	2,9
Zn	157	148	89	195	75	158

* Для Ni представлены восстановленные начальные геохимические условия по содержанию типоморфного элемента (первое значение) и минерала (второе значение).

Выбор минералов для восстановления начальных геохимических условий Ni обусловлен результатами анализа корреляционных связей химического и минерального составов пылегрязевых отложений и анализом распределения их концентраций. Содержание Ni в пылегрязевых отложениях сильно зависит от содержания диопсида в Качканаре – значение r -Пирсона 0,74 и серпентина в остальных городах: 0,89 – в Алапаевске, 0,82 – в Верхней Пышме и 0,67 – в Серове. Для остальных элементов, коррелирующих с минералами, восстановление начальных геохимических условий не привело к существенному изменению рассчитываемого значения ни в одном случае.

Как видно на рис. 3, несмотря на то, что рассчитанная фоновая концентрация Ni в Алапаевске наибольшая среди исследованных городов, она обусловлена присутствием серпентина (что согласуется с ультраосновными подстилающими породами). Восстановление начальных геохимических условий по Al дает основание отнести шесть проб к загрязненным. Проверка зависимостей в парах «элемент-минерал» необходима, чтобы избежать переоценки загрязненности при восстановлении начальных геохимических условий.

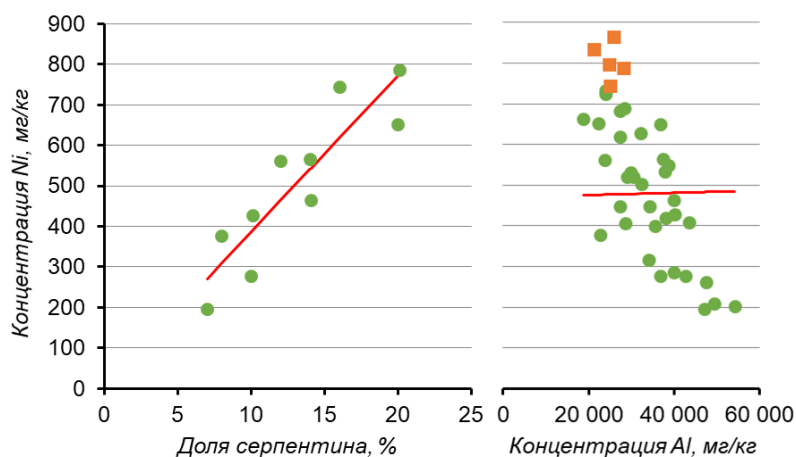


Рисунок 3 – Диаграммы рассеяния пар Ni-серпентин и Ni-Al в пробах пылегрязевых отложений в Алапаевске с визуализацией начальных геохимических условий Ni (красная линия), загрязненных (оранжевые точки) и незагрязненных (зеленые точки) проб

Полученные значения начальных геохимических условий были использованы в качестве условного фонового уровня для количественной оценки степени загрязнения пылегрязевых отложений и сравнены с кларками элементов в верхней континентальной коре и городских почвах.

На рис. 4 представлены карты с рассчитанными значениями Z_c относительно трех условных фоновых уровней. При использовании начальных геохимических условий все исследованные города в основном характеризуются низким, допустимым уровнем загрязнения, тогда как использование кларковых значений или концентраций элементов в городских почвах в качестве условных фонов смещает оценку в сторону более высоких уровней загрязнения.

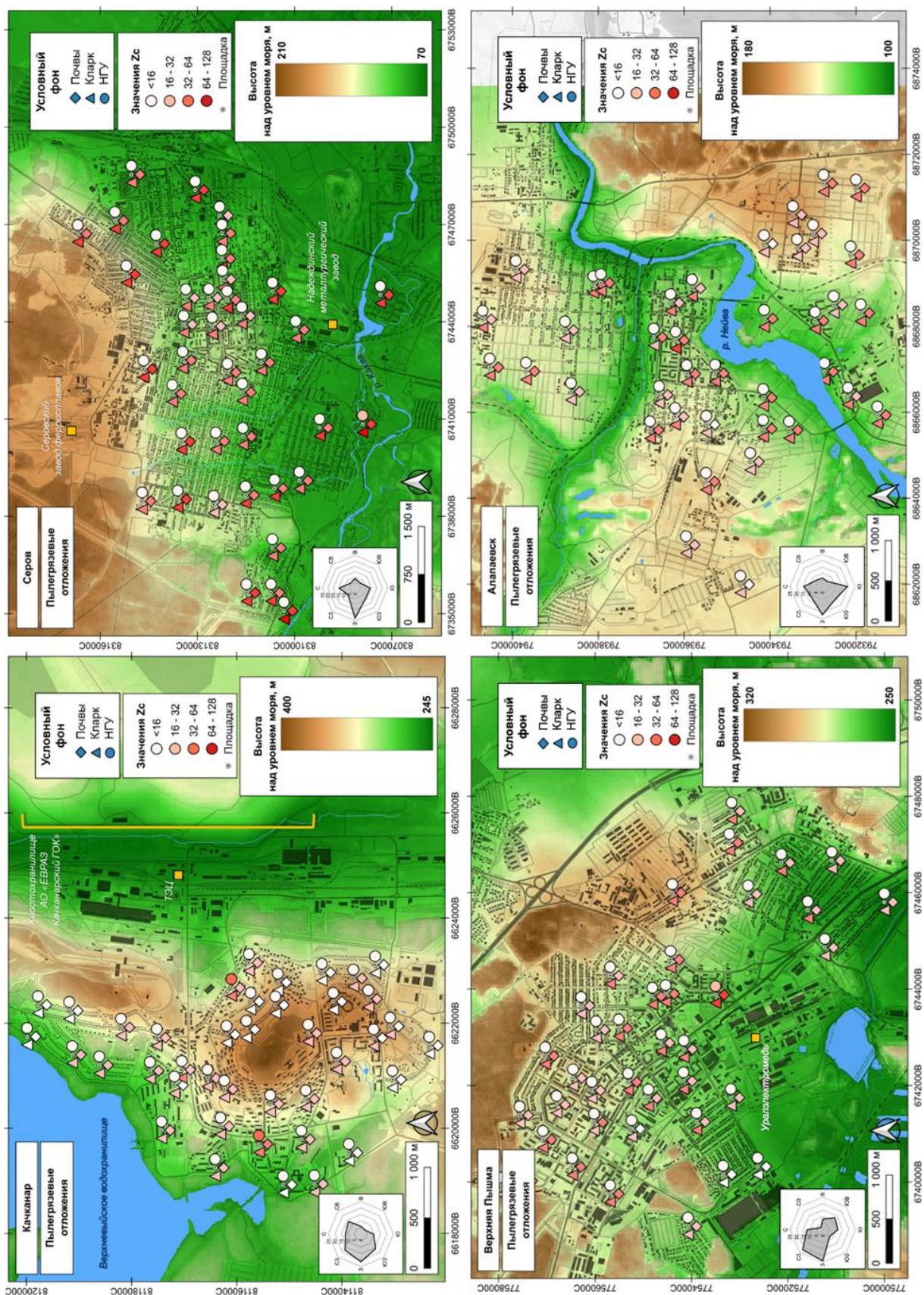


Рисунок 4 – Распределение Z_c для пылегазовых отложений в исследованных городах

При рассмотрении карт распределения значений Z_c для СГП не наблюдается связи загрязнения с рельефом города и преобладающими ветрами, что может говорить о диффузном источнике поступления загрязнения в СГП. Z_c для СГП в исследованных городах: ($\bar{x} \pm \sigma$: Качканар – 39 ± 32 , Серов – 13 ± 18 , Алапаевск – 17 ± 13 , Верхняя Пышма – 9 ± 7).

Сравнение концентраций металлов в пылегрязевых отложениях исследованных городов с почвами фонового участка в п. Мариинск (на основе K_c) показало существенную трансформацию геохимических условий городской среды по сравнению с природным фоном. Наиболее высокие уровни накопления выявлены для Ni в Алапаевске (в 16 раз выше фона) и Верхней Пышме (в 10 раз), а также для Cd в Серове (почти в 10 раз). В Алапаевске и Серове отмечается значительное накопление Mn (в 4–6 раз), в Качканаре и Серове – Fe (в 2,4–2,5 раза). Для всех исследованных городов, хотя и в меньшей степени для Качканара, характерно повышенное содержание Cu, Zn, Cd и Pb. По степени трансформации геохимических условий города образуют следующий ряд – Алапаевск > Серов > Верхняя Пышма > Качканар.

В Качканаре наблюдается прямая связь между потенциальным источником и уровнем загрязнения среды. Площадки с наибольшими значениями Z_c (рис. 5) и концентрации твердого вещества находятся на склоне, обращенном к территории отвалов комбината. Несмотря на то, что северо-восточные ветра не преобладающие, их повторяемости оказывается достаточно для переноса значительного объема пыли в городскую среду. Площадки, находящиеся за возвышенностью, имеют наименьшие концентрации пыли. Распределение значений атмосферных выпадений Fe и V в пробах снежного покрова схоже с паттерном распределения Z_c на рис. 5. Высокий вклад в Z_c снежного покрова Качканара вносят элементы Co, Fe, Ti и V. В Качканаре наблюдается наибольшая пылевая нагрузка – около 182 мг/м^2 в сут., в то время как в Серове – 59, в Верхней Пышме – 33, а в Алапаевске – 19 мг/м^2 в сут. Основной загрязняющий фактор в Качканаре – пыль с хвостохранилища на востоке города.

На фоне остальных исследуемых городов в Серове выделяется значительное атмосферное поступление Cr и Mg (K_c для снежного покрова – 37). Наибольшие значения атмосферных выпадений Cr и Mg наблюдаются на северо-западе города, вблизи Серовского завода ферросплавов (СЗФ) и отвалов шлака (рис. 7а). Для этих же точек наблюдаются наибольшие значения Z_c для снежного покрова (рис. 6).

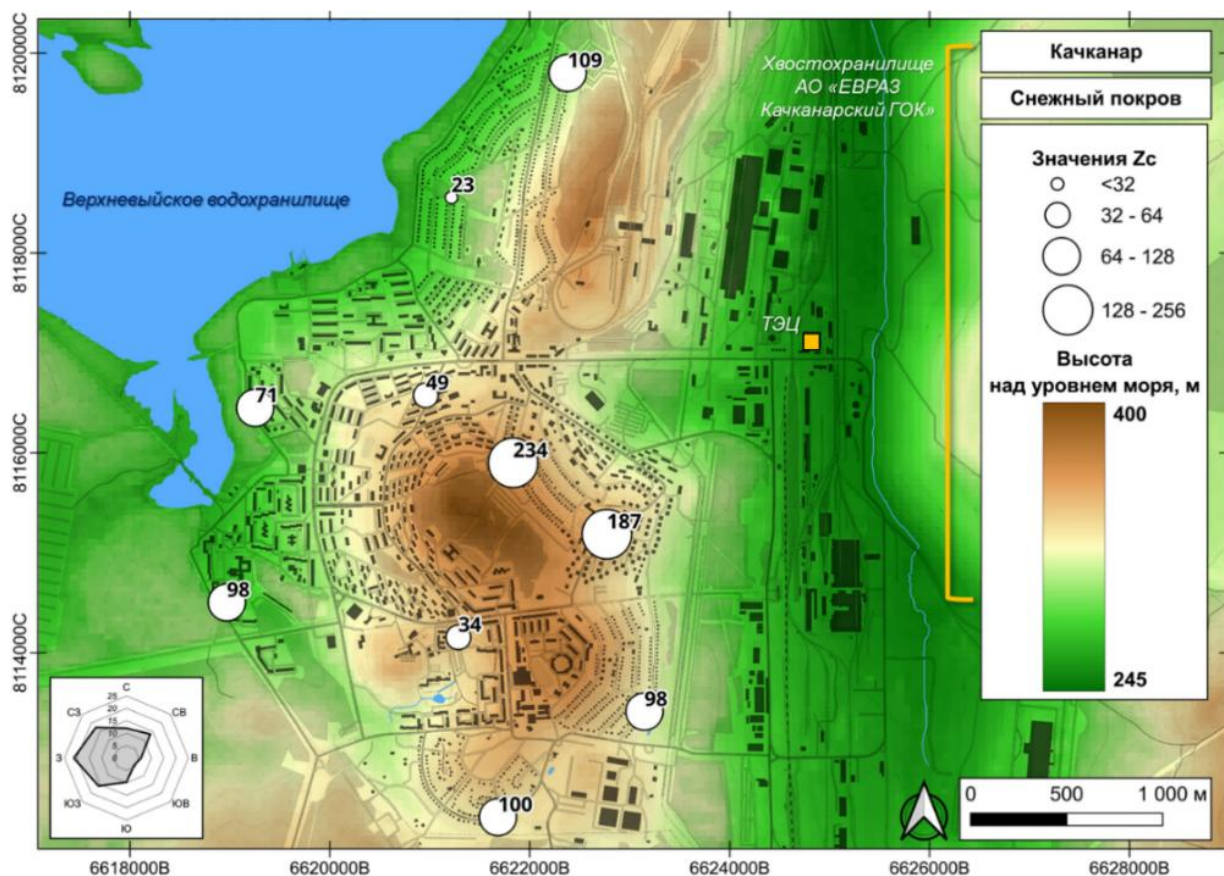


Рисунок 5 – Распределение показателей Z_c для снежного покрова в Качканаре

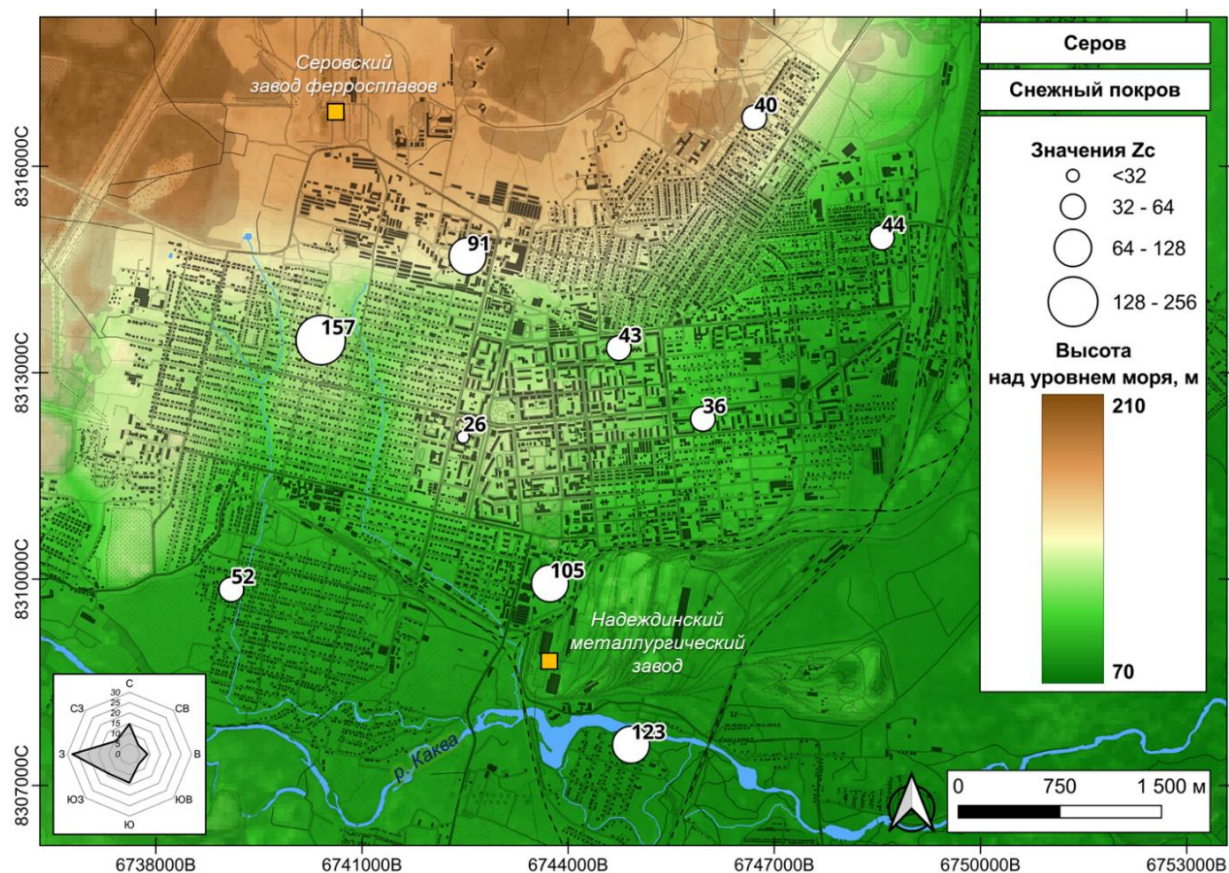


Рисунок 6 – Распределение показателя Z_c для снежного покрова в Серове

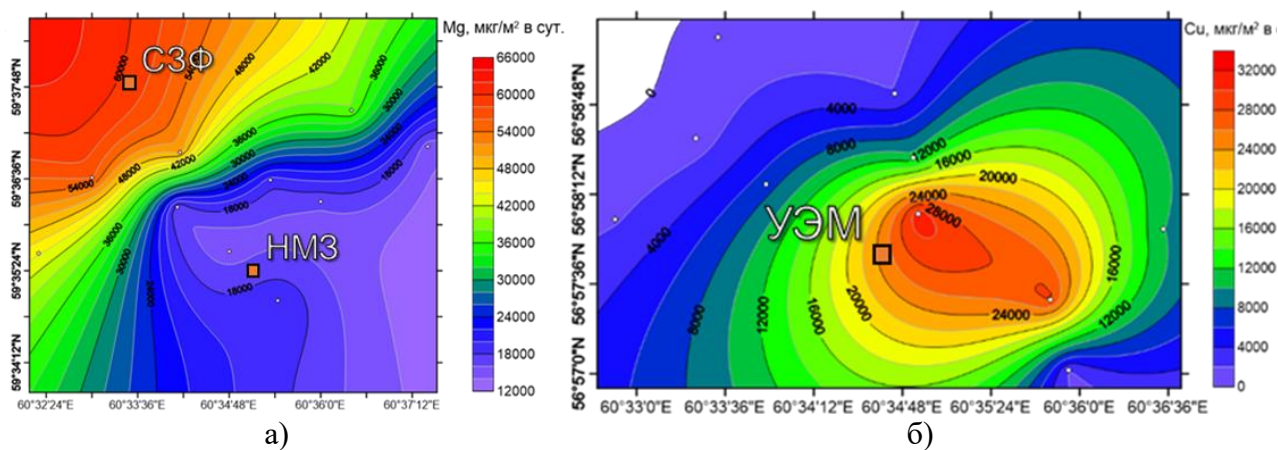


Рисунок 7 – Распределение значений атмосферных выпадений а) Mg в снежном покрове Серова и б) Cu в снежном покрове Верхней Пышмы

В Верхней Пышме наиболее загрязненные точки по Z_c снежного покрова расположены вблизи предприятия цветной металлургии (рис. 8). Наиболее загрязненные точки находятся восточнее производственной площадки. Наибольший вклад в Z_c снежного покрова вносят As, Cu, Mo и Sb. Особенно выражено загрязнение Cu (в 25 раз выше принятого условного фона). Ассоциация элементов Cu-Sb-As имеет общий паттерн распределения и связана с переносом загрязнения с производственной площадки АО «Уралэлектромедь» (УЭМ) (рис. 7б).

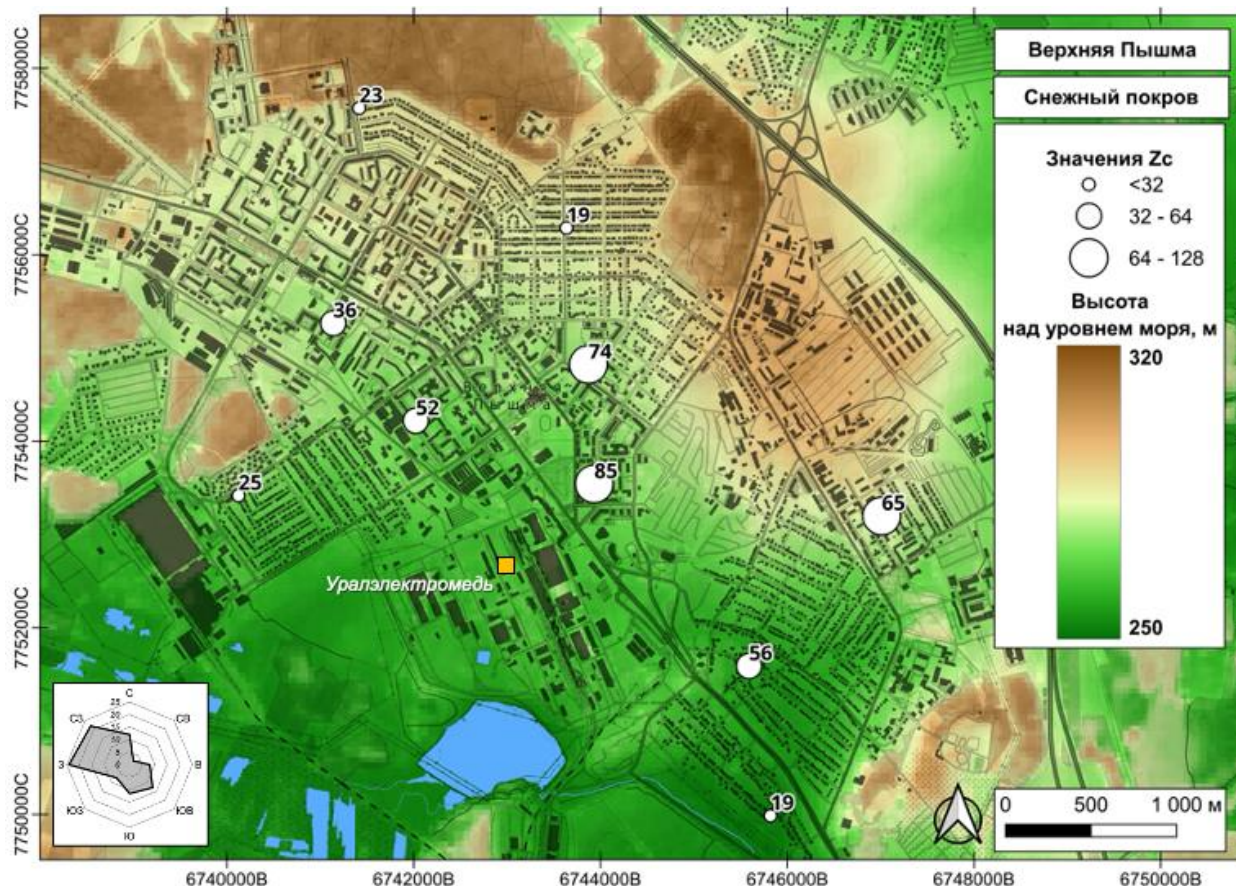


Рисунок 8 – Распределение показателя Z_c для снежного покрова в Верхней Пышме

Исходя из представленных результатов, можно отметить особенность Верхней Пышмы – выраженная аномалия Cu , связанная с деятельностью АО «Уралэлектромедь». Преобладающие ветра формируют постоянный перенос загрязнения с промышленной зоны на жилые кварталы.

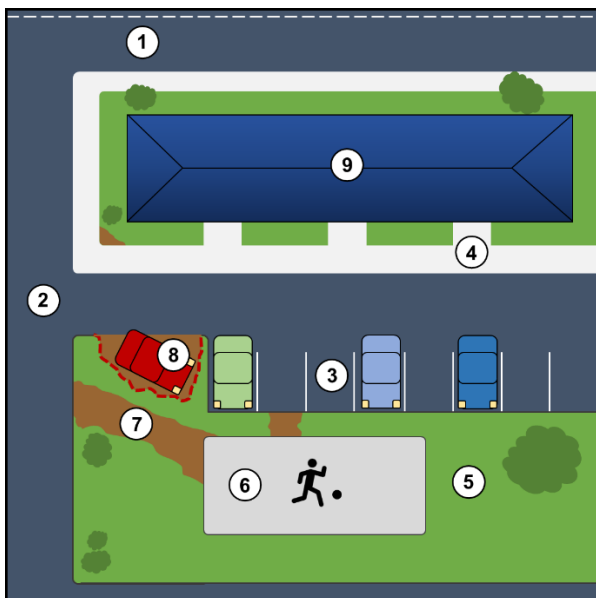
Алапаевск характеризуется наименьшей степенью техногенного воздействия среди исследованных городов, а наблюдаемые ассоциации элементов преимущественно связаны с диффузными источниками (в первую очередь автотранспортом), характерными для любого города, поэтому возможно сравнение современного поступления загрязнения в промышленных городах с поступлением в Алапаевске. Подробно данные по Алапаевску представлены в разделе 4.2.4 Диссертации.

Глава 5. Оценка образования и накопления пылегрязевых отложений в жилой зоне городской среды

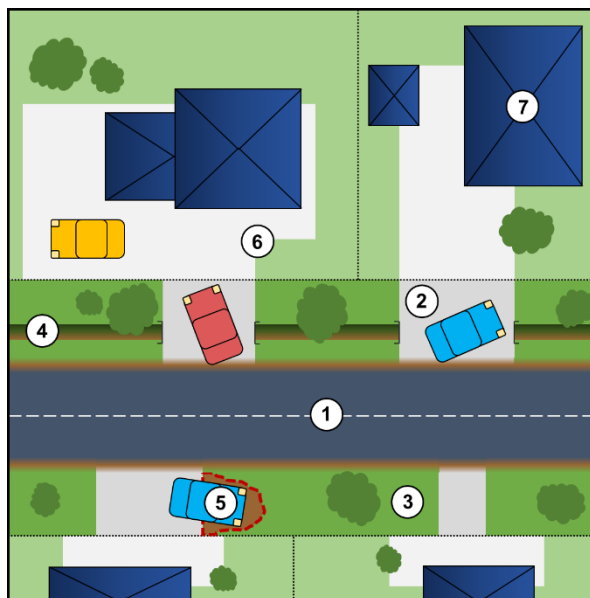
Для моделирования интенсивности образования пылегрязевого осадка в городской среде были разработаны модельные площадки – элементарные ячейки ландшафта жилых кварталов (*EURL* МКД и *EURL* ИЖС). Структура, перечень функциональных зон и их характеристики приняты в соответствии с результатами ландшафтного обследования, а также спутниковыми снимками сервиса Google Earth Pro. На рис. 9 представлены схемы устройства *EURL* МКД и ИЖС (их характеристики представлены в табл. 5.3 текста Диссертации).

Для оценки интенсивности образования пылегрязевого осадка в городской среде были применены модифицированные эрозионные модели. В качестве основы для оценки интенсивности образования пылегрязевых отложений в городской среде от жидких атмосферных осадков и стока талой воды использовалась модель *RUSLE*, предназначенная в основном для сельскохозяйственных земель (Renard et al., 1991). Модель *RUSLE* была модифицирована для городских условий с помощью подбора *C*-фактора (коэффициент землепользования), который позволил учитывать стойкость к выносу материала различных типов покрытий. Подбор *C*-фактора выполнен с помощью *RUSLE* на основе сравнения модельной оценки интенсивности эрозии покрытий водосборной площади водоема и оценки накопленных донных отложений с учетом данных о периоде их накопления на основе анализа содержания ^{137}Cs (Селезнев и др., 2022).

Для *C*-фактора использовано два варианта значений, отражающих состояние поверхности: ненарушенная и нарушенная. Примеры нарушенных участков – выбоины на дорогах и других твердых поверхностях, вытопанные или незаросшие газоны, несанкционированные парковки и т. д.



а) EURL МКД



б) EURL ИЖС

Рисунок 9 – Схемы: а) EURL МКД с функциональными микрозонами: 1 – дорога; 2 – проезд; 3 – парковка; 4 – тротуар; 5 – зеленая зона; 6 – детская площадка; 7 – нарушенные участки; 8 – несанкционированная парковка; 9 – строения и б) EURL ИЖС: 1 – дорога; 2 – проезд; 3 – зеленая зона; 4 – канава; 5 – несанкционированная парковка; 6 – внутренний частный двор; 7 – частные строения

Для оценки интенсивности образования пылегрязевого осадка в период снеготаяния была применена модель *RUSLE*, модифицированная в работе Ларионова (1993). Так же как и в модели *RUSLE*, при расчете были приняты подобранные значения *C*-фактора.

Для оценки интенсивности образования пылегрязевого осадка в городской среде от взаимодействия нешипованных шин движущегося автомобиля с дорожным покрытием был разработан подход к расчету коэффициента, аналогичного коэффициенту эрозии от воздействия атмосферных осадков (*R*-фактор) в модели *RUSLE*. Для определения количества продуктов истирания дорожного полотна шинами транспортного средства использовали принцип *R*-фактора, где вместо энергии осадков использовали оценку количества энергии, передаваемой от транспортного средства на поверхность (Shevchenko et al., 2023). Для этого учитывались три силы: тяга, сопротивление качению и трение. В качестве модельного автомобиля принят стандартный седан В-класса, распространенный в российских регионах. В результате были получены значения, отражающие износ на единицу энергии, переданной дорожному покрытию, рассчитанные на основе данных об уменьшении толщины дорожного покрытия в результате износа и энергии, передаваемой дорожному покрытию транспортным средством во время движения в тех же единицах, что и оригинальный *R*-фактор.

Для оценки интенсивности образования пылегрязевого осадка в городской среде от взаимодействия шипованных шин движущегося автомобиля с дорожным покрытием был использован *SPS* индекс (Carlsson et al., 1995). Доля автомобилей в транспортном потоке с шипованными шинами принята в соответствии с (Автостат Омнибус, 2020) – 77 %. Индекс *SPS* указывает на фактический износ полотна в результате определенного объема движения шипованных шин в течение периода измерения (обычно одного холодного сезона).

Получены следующие итоговые оценки интенсивности образования пылегрязевых отложений (рис. 10): в Верхней Пышме наблюдается наименьший уровень образования осадка – 0,31 кг/м² в год, а в Качканаре – наибольший – 0,76 кг/м² в год. В Серове и Алапаевске значения 0,38 и 0,34 кг/м² в год соответственно. Основная доля образованных пылегрязевых отложений приходится на холодный период – около 80 % во всех городах.

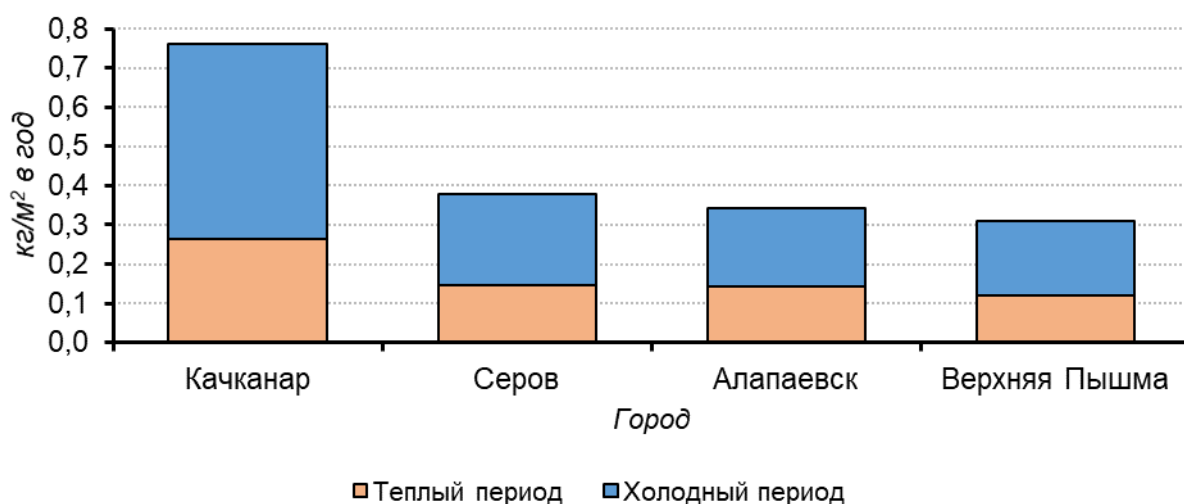


Рисунок 10 – Интенсивность образования пылегрязевых отложений в городах

В табл. 3 представлен вклад каждой функциональной микрзоны в осадкообразование в рамках *EURL* МКД и ИЖС. Во всех городах, кроме Верхней Пышмы, наибольший вклад вносит внутридворовая зеленая зона. Дорога вне двора также вносит сопоставимый вклад в кварталах МКД в Алапаевске, Серове и Верхней Пышме. В кварталах ИЖС во всех городах наибольший вклад вносит дорога.

Распределение функциональных зон по вкладу в осадкообразование связано с тем, что зеленые зоны в кварталах МКД и дороги в кварталах ИЖС имеют наибольшую площадь. На рис. 11 представлены значения интенсивности образования пылегрязевых отложений на каждой функциональной микрзоне *EURL* МКД и ИЖС. Во всех городах, кроме Качканара, наибольшая интенсивность осадкообразования наблюдается для зоны дорог. Зеленые зоны в этих городах имеют как минимум в половину меньшую интенсивность осадкообразования по сравнению с дорогами.

В Качканаре зеленые зоны, нелегальные парковки и дороги имеют близкие значения интенсивности осадкообразования.

Таблица 3 – Вклад каждой функциональной микрзоны в осадкообразование в рамках *EURL* МКД и ИЖС

Функциональная микрзоны	Алапаевск	Качканар	Серов	В. Пышма
<i>EURL</i> МКД				
Зеленая зона внутридворовая	40 %	52 %	44 %	41 %
Нелегальная парковка	1 %	3 %	2 %	1 %
Непроницаемые покрытия	5 %	6 %	3 %	3 %
Зеленая зона УДС	15 %	19 %	17 %	14 %
Дорога УДС	39 %	20 %	34 %	41 %
<i>EURL</i> ИЖС				
Зеленая зона	23 %	36 %	25 %	19 %
Подъездная зона	3 %	5 %	4 %	3 %
Дорога	74 %	59 %	72 %	78 %

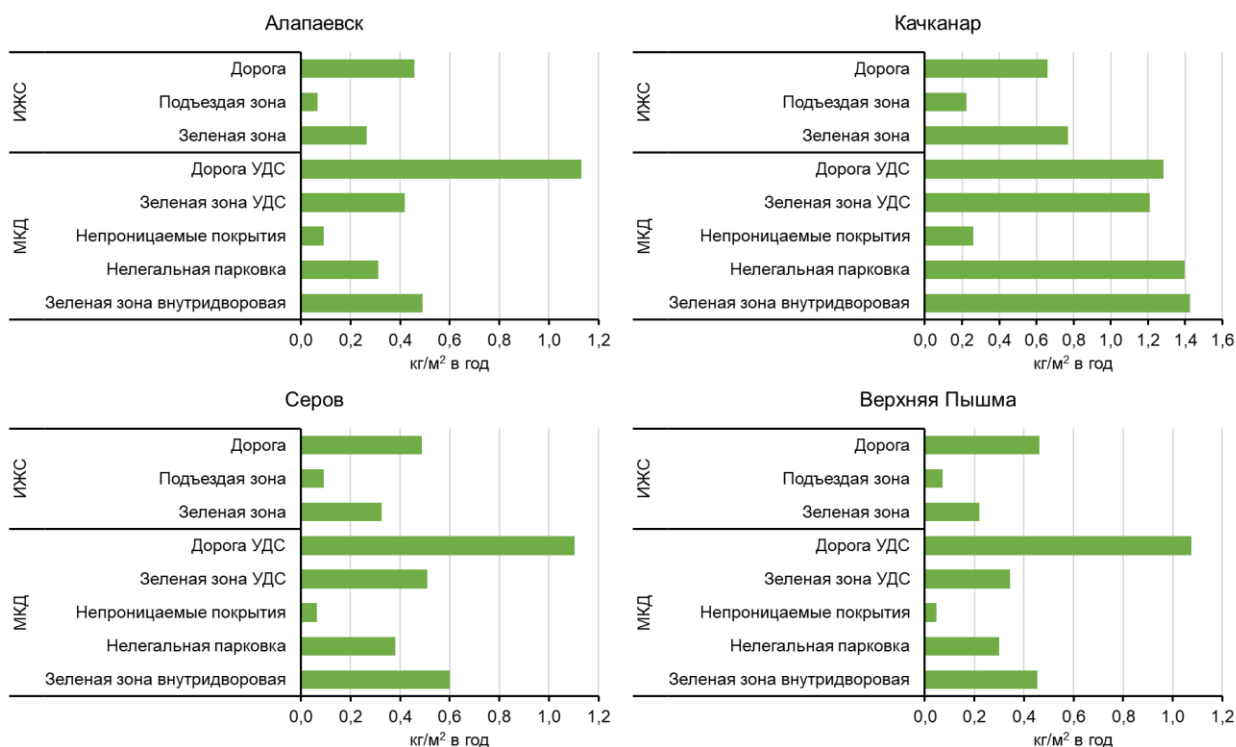


Рисунок 11 – Интенсивность образования пылегрязевых отложений для каждой функциональной микрзоны *EURL* МКД и ИЖС

На рис. 12 представлены вклады нарушенных и ненарушенных участков в суммарное осадкообразование в рамках *EURL* МКД и ИЖС. Нарушенные участки вносят от 54 до 78 % в общую оценку. Преобладание нарушенных участков покрытий в балансе подчеркивает, что локальные дефекты (выбоины, разуплотнение газонов, несанкционированные парковки) – это ключевые источники седиментационного материала.

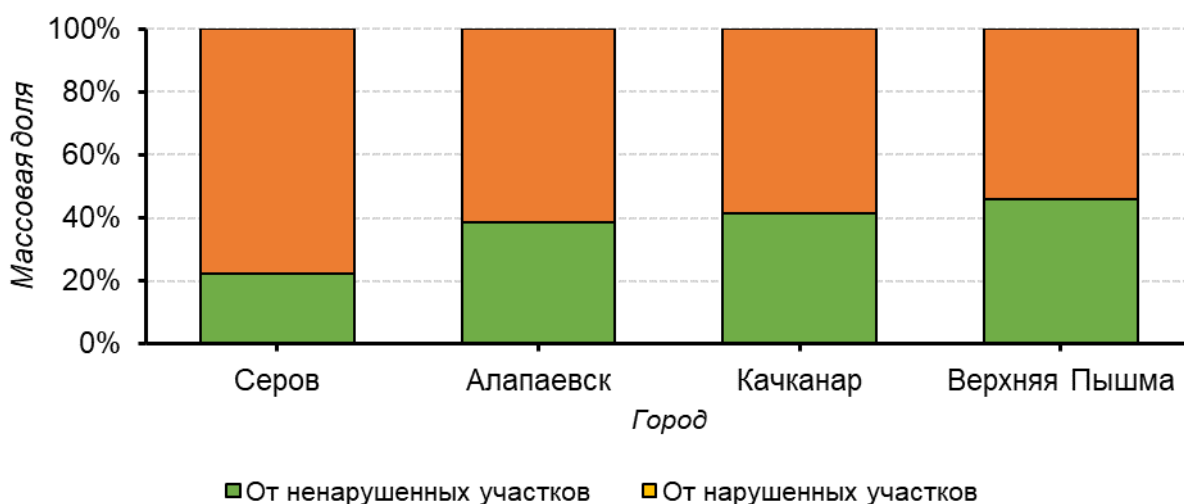


Рисунок 12 – Вклад нарушенных и ненарушенных участков в общее осадкообразование в рамках *EURL*

При разработке модели учтены условия, характерные для малых и средних городов Свердловской области. Так как большая часть населения таких городов проживает в многоквартирных многоэтажных и частных домах, а жилые массивы подобных городов устроены похоже, применение модели не ограничено исследованной территорией. Предполагается, что для территорий жилых кварталов города расчеты по одному элементу ландшафта (*EURL*) репрезентативны для оценки образования осадка на всей площади жилой зоны.

Основные источники образования осадка – это дороги и газоны внутри и снаружи двора. Эти зоны имеют наибольшую площадь, а наличие дополнительного фактора осадкообразования в виде нарушенных участков усилит эрозионные процессы на этих зонах. Отсутствие нарушенных участков на зеленых зонах может снизить интенсивность образования пылегрязевого осадка в исследованных городах до медианного значения мировых оценок (Russel et al., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и протестирован перечень показателей для комплексной оценки эколого-геохимического состояния городской среды на основе исследования пылегрязевых отложений, СГП и снежного покрова обеспечивает интегральную оценку процессов загрязнения, накопления и перераспределения вещества в городской среде и может быть использован в целях мониторинга, сравнительного анализа урбанизированных территорий и принятия природоохранных решений.

2. Усовершенствованный метод восстановления начальных геохимических условий повышает корректность оценки загрязнения за счет учета природной геохимической неоднородности территории и региональных особенностей состава пород в сравнении с использованием универсальных кларковых значений.

3. Вещественный состав пылегрязевых отложений и интенсивность поступления химических элементов в городскую среду определяются сочетанием региональных природных особенностей и промышленной специализации городов. Состав пылегрязевых отложений существенно трансформирован под воздействием антропогенной деятельности относительно природного геохимического фона.

4. Минеральный состав пылегрязевых отложений и твердого вещества СГП в исследованных городах существенно трансформирован относительно естественного минерального фона территорий. Выраженность трансформации напрямую зависит от характера антропогенной нагрузки: в Качканаре специфика местного производства сохраняет относительное сходство составов объектов с природным фоном, а в Серове, Алапаевске и Верхней Пышме значителен привнос нехарактерных материалов (строительных смесей, антигололедных смесей, специфических индикаторов металлургического производства).

5. Автотранспорт – универсальный источник поступления загрязняющих веществ во всех исследованных городах. Связанные с транспортной деятельностью элементы формируют устойчивые геохимические ассоциации, наиболее отчетливо проявляющиеся в пылегрязевых отложениях и СГП.

6. Выявлено общее сходство геохимических спектров в исследованных городах, отражающее единство региональной геологической основы, при одновременном проявлении локальных аномалий, обусловленных спецификой промышленного развития и интенсивностью техногенного воздействия.

7. В исследованных городах выявлены специфические геохимические маркеры цветной и черной металлургии, горнодобывающей промышленности, отражающие особенности формирования вещественного состава городских отложений.

8. Эколого-геохимическое состояние жилой зоны Верхней Пышмы определяется преимущественно воздействием предприятия цветной металлургии, формирующего наиболее интенсивную техногенную нагрузку; Серова – предприятиями черной металлургии и наличием отвалов металлургических шлаков; Качканара – деятельностью ГОКа и пылением его отвалов. В Алапаевске отсутствуют маркеры современного промышленного загрязнения.

9. Уровень пылевой нагрузки в исследованных городах тесно связан с интенсивностью и типом промышленности. Наиболее высокие значения характерны для городов с открытой горнодобывающей промышленностью (Качканар) и черной металлургией (Серов).

10. Количественная оценка запасов пылегрязевых отложений в жилых зонах исследованных городов показала, что даже для таких сравнительно небольших по площади городов накопление осадочного материала может достигать значительных

величин, сопоставимых или превышающих значения, характерные для крупных городов.

11. Разработанная модель осадкообразования позволила количественно оценить роль природных и антропогенных факторов в формировании пылегрязевых отложений городской среды и установить, что ключевое значение в интенсивности накопления осадочного материала имеет состояние городских покрытий. Полученные результаты подтверждают возможность использования модели для повышения эффективности мероприятий по управлению городской средой.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, индексируемых базой данных Scopus, Web of Science и ВАК

1. Обоснование экологической геоиндикаторной роли современных поверхностных пылегрязевых отложений городской среды / А. А. Селезнев, И. В. Ярмошенко, **А. В. Шевченко**, Г. П. Малиновский // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 5. – С. 107–122. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122. – EDN TKBTBK.

(Переводная версия: Rationale for the ecological geoindicator role of contemporary surface sediments of dust and dirt in urban environment / A.A. Seleznev, I.V. Yarmoshenko, **A.V. Shevchenko**, G.P. Malinovsky // Russian Meteorology and Hydrology. – 2023. – Vol. 48(5). – P. 467–478. – DOI: 10.3103/s1068373923050102.

2. Modeling Sediment Production in Urban Environments: Case of Russian Cities / **A. V. Shevchenko**, A. A. Seleznev, G. P. Malinovsky, I. V. Yarmoshenko // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. Vol. 16, N 4. – P. 144–155. – DOI: 10.24057/2071-9388-2023-3022.

3. Пылегрязевые отложения как индикатор эколого-геохимического состояния территории арктического города / И. В. Ярмошенко, **А. В. Шевченко**, В. С. Глухов [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 449–461. – DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-449-461.

4. Assessment of the Total Amount of Surface Deposited Sediments in Small Towns / A. Seleznev, **A. Shevchenko**, G. Malinovsky, V. Glukhov // Urban Science. – 2024. – Vol. 8, N 4. – P. 178. – DOI: 10.3390/urbansci8040178.

5. Оценка экологического состояния селитебной территории малого города на основе данных о составе снеогрязевой пульпы / А. Селезнев, Н. Иванчукова, **А. Шевченко**, В. Глухов // Трансформация экосистем. – 2025. – № 8(3(30)). – С. 118–137. – DOI: 10.23859/estr-241123.

6. Snow cover pollution by potentially toxic elements in small and medium-sized industrial cities: case of Sverdlovsk region, Russia / **A. V. Shevchenko**, A. A. Seleznev, V. S. Glukhov [et al.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol. 18(4). – P. 6–18. – DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3746.

7. Assessment of the Intensity of Sediment Production in Cities in Different Climatic Zones of Russia / **A. Shevchenko**, G. Malinovsky, A. Seleznev, I. Yarmoshenko // In: Korneykova M., et al. Green Infrastructure and Climate Resilience. Springer Geography. Springer, Cham. – 2025. – DOI: 10.1007/978-3-031-95796-3_4.

Публикации в других рецензируемых журналах:

1. Оценка поступления рыхлых наносов с водосбора в водоем на урбанизированной территории / А. А. Селезнев, **А. В. Шевченко**, В. С. Глухов, Г. П. Малиновский // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 4(4). – С. 13–29. – DOI: 10.56564/27825264_2022_4_13.

2. Исследование поверхностного пылегрязевого осадка городской среды – эффективный инструмент экологического мониторинга / И. В. Яρμοшенко, **А. В. Шевченко**, Г. П. Малиновский, А. А. Селезнев // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2024. – № 4(12). – С. 76–94. DOI: 10.56564/27825264_2024_4_76.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623552 Российская Федерация. База данных «Результаты ландшафтного описания элементов селитебной территории урбанизированной среды, выполненного ИПЭ УрО РАН» : № 2024623162 : заявл. 22.07.2024 : опубл. 14.08.2024 / **А. В. Шевченко**, Г. П. Малиновский, И. В. Яρμοшенко, В. С. Глухов, А. А. Селезнев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. – EDN HNCJCU.

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623573 Российская Федерация. База данных Химический состав городских поверхностных пылегрязевых отложений : № 2024623160 : заявл. 22.07.2024 : опубл. 14.08.2024 / В. С. Глухов, Г. П. Малиновский, И. В. Яρμοшенко, **А. В. Шевченко**, А. А. Селезнев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. – EDN AIPXCJ.