

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Сычева Дарья Геннадьевна**

**Тяжелые металлы и металлоиды в почвах и дорожной пыли  
городов Бурятии в зоне влияния угольных ТЭС:  
источники загрязнения, фракционирование и экологический  
риск**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

Москва – 2025

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

**Научный руководитель:**

**Кошелева Наталья Евгеньевна**  
доктор географических наук

**Официальные оппоненты:**

**Московченко Дмитрий Валерьевич**  
доктор географических наук, Тюменский  
научный центр Сибирского отделения РАН,  
Институт проблем освоения Севера,  
заведующий сектором геоэкологии

**Линник Виталий Григорьевич**  
доктор географических наук, доцент,  
Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского РАН, заведующий  
лабораторией эволюционной биогеохимии и  
геоэкологии

**Константинова Елизавета Юрьевна**  
кандидат географических наук, Южный  
федеральный университет, Академия  
биологии и биотехнологии им. Д.И.  
Ивановского, фронтальная лаборатория  
"Биоинженерия ризосферы", старший  
научный сотрудник

Защита диссертации состоится «15» мая 2025 г. в 17 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](mailto: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/3387>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат географических наук



М.А. Смирнова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Сжигание ископаемого топлива (угля, природного газа, нефти и продуктов нефтепереработки) при производстве электроэнергии, отопления, в промышленности и при эксплуатации транспортных средств представляет собой один из крупнейших источников загрязнения окружающей среды (Fan et al., 2020; Sicard et al., 2023; Li et al., 2023). Особое место среди промышленных источников занимают предприятия по добыче и сжиганию каменного и бурого угля, вызывающие серьезные экологические и социальные последствия в городах по всему миру (Savic et al., 2018; Karmaker et al., 2020).

Россия является одной из крупнейших стран мира по добыче и потреблению ископаемого топлива (Битюкова, Кравчик, 2023). При его сжигании на тепловых электростанциях (ТЭС) России в атмосферу выбрасывается около 4,3 млн тонн загрязняющих веществ, что составляет 33% общего объема выбросов от стационарных источников (Ежегодник ..., 2024). Наибольшая доля угля (около 84%) в структуре топлива ТЭС характерна для Сибири и Дальнего Востока, где условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере зачастую неблагоприятны. Средние концентрации взвешенных частиц, NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> в городах азиатской части России на 22-33% выше, чем в городах европейской части страны (Ежегодник ..., 2024).

Республика Бурятия отличается уникальными природными ландшафтами, среди которых озеро Байкал занимает центральное место. Байкал – самое глубокое озеро на планете, крупнейший природный резервуар пресной воды, входит в список всемирного наследия ЮНЕСКО. Около 80% площади Бурятии находится в бассейне оз. Байкал, что составляет 57,1% площади Байкальской природной территории. Главными источниками загрязнения в регионе являются крупные промышленные узлы, такие как Улан-Удэ, Закаменск, Гусиноозерск и Северобайкальск. В 2023 г. предприятия по производству тепло- и электроэнергии, работающие на угле, выбросили в атмосферу Бурятии 71,4 тыс. тонн загрязняющих веществ, что составляет 66% от общего объема выбросов в республике (Государственный доклад ..., 2024). Дополнительную опасность создают автономные источники теплоснабжения (котлы и печи в частном секторе), выбросы которых оказывают длительное воздействие на здоровье населения, провоцируя развитие общетоксических, канцерогенных и мутагенных эффектов (Seinfeld, Pandis, 2006; Wang, Liu, 2024).

Столица Бурятии – крупный промышленный город Улан-Удэ относится к наиболее проблемным территориям республики и занимает первое место по уровню комплексной техногенной нагрузки на среду обитания и общей заболеваемости населения (Государственный доклад ..., 2024). В городе функционирует более 40 предприятий различных отраслей, чья деятельность в сочетании с выбросами ТЭС усиливает негативное воздействие на окружающую

среду. Вблизи Гусиноозерска, где функционирует крупнейшая в регионе Гусиноозерская ГРЭС, находятся месторождения бурого угля, что повлекло за собой сосредоточение в окрестностях города нерекультивируемых отвалов вскрышных пород, оказывающих отрицательное влияние на почвенный покров, поверхностные и подземные воды (Убугунов, Убугунов, 2013). В Северобайкальске, важном транспортном узле Байкало-Амурской магистрали (БАМ), формируется зона комплексного техногенного воздействия за счет выбросов загрязняющих веществ от Центральной угольной ТЭЦ и железнодорожного сектора.

Почвенный покров является основной депонирующей средой для техногенных выбросов, что делает его ключевым индикатором многолетнего загрязнения городских территорий (Касимов и др., 2016; Manisalidis et al., 2020; Zhao et al., 2021; Sicard et al., 2023). Для индикации современного загрязнения городов служит дорожная пыль, состоящая из твердых частиц антропогенного и природного происхождения, включая выдуваемые тонкие фракции придорожных почв и частицы, образующиеся при износе корпуса, шин и тормозных колодок автомобилей и при истирании разметки и дорожного полотна (Li, Liao, 2018; Seleznev et al., 2020; Kabir et al., 2022; Vlasov et al., 2022; Vlasov et al., 2023б). Особое внимание в настоящее время уделяется изучению наиболее опасных твердых частиц диаметром менее 10 мкм – фракции физической глины (PM<sub>10</sub>), обладающей высокой сорбционной емкостью по отношению к загрязняющим веществам. Необходимость изучения химического состава почв, дорожной пыли и их отдельных гранулометрических фракций, в первую очередь, микрочастиц PM<sub>10</sub>, связана с их обогащением токсичными соединениями (Sonone et al., 2020; Alengebawy et al., 2021), в том числе тяжелыми металлами и металлоидами (ТММ). Потенциальные риски, связанные с вдыханием, проглатыванием и кожным контактом с ТММ, представляют большую угрозу здоровью городского населения. Большинство ТММ токсичны, часто являются канцерогенными (Willers et al., 2005) и способны вызывать заболевания органов кровообращения, нервной, эндокринной систем (Huang et al., 2017).

Исследования влияния выбросов угольных ТЭС на загрязнение почв ТММ проводились во многих странах, включая Монголию (Сорокина, 2013), Сербию (Savic et al., 2018), Боснию и Герцеговину (Antunovic et al., 2023), Турцию (Turhan et al., 2020), Китай (You et al., 2015), Индию (Singh et al., 2010) и др. Несмотря на актуальность проблемы, последствия техногенной нагрузки на городские ландшафты Бурятии изучены недостаточно. Наиболее детально исследован химический состав почвенного покрова г. Улан-Удэ, где проводились исследования почв в центральной части города (Белоголовов, 1989), садово-огородной (Убугунов, Кашин, 2004) и промышленной (Перязева, 2002) зонах. Отдельно изучены почвы на 30 ключевых участках, приуроченных к стационарным и передвижным источникам загрязнения (Валова, 2003), получены данные о содержании Pb в верхних горизонтах почв и его влиянии на онкозаболеваемость

населения, определено накопление ТММ в почвах на территории несанкционированных свалок (Вологжина, 2011). В 2014 г. впервые опробован почвенный покров на всей территории города (Корляков и др., 2019). В Гусиноозерске анализ содержания ТММ в городских почвах ранее не проводился. Отсутствуют данные о содержании загрязняющих веществ во фракции  $PM_{10}$  почв и дорожной пыли городов Бурятии.

**Цель и задачи работы.** *Цель работы* – оценить эколого-геохимическое состояние городов Бурятии с развитым топливно-энергетическим комплексом – Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска по данным о содержании ТММ в почвенном покрове, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$ . Поставлены следующие задачи:

1. Определить ассоциации ТММ-приоритетных загрязнителей и пространственные закономерности их распределения в почвах и их фракции  $PM_{10}$  в функциональных зонах трех городов и дорожной пыли Улан-Удэ на разных типах дорог.
2. Выявить ведущие факторы аккумуляции ТММ в городских почвах.
3. Исследовать фракционирование ТММ в почвах и дорожной пыли.
4. Идентифицировать и количественно охарактеризовать вклад источников ТММ, включая угли и золу ТЭС, в почвах и их фракции  $PM_{10}$  трех городов с использованием рецепторной модели Positive Matrix Factorization (PMF).
5. Оценить уровни неканцерогенной и канцерогенной опасности накопления ТММ в городских почвах для здоровья детей и взрослых.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования являются почвы и их фракция  $PM_{10}$  в гг. Улан-Удэ, Гусиноозерске, Северобайкальске, дорожная пыль и их частицы  $PM_{10}$  в Улан-Удэ (рис. 1).

Смешанные пробы почв отбирались из верхнего (0-10 см) слоя по регулярной сетке с шагом 500-600 м в Гусиноозерске, Северобайкальске, центральной части Улан-Удэ и с шагом 700-1000 м на окраинных частях Улан-Удэ в соответствии с функциональным зонированием городов, а также на фоне, вне городских территорий. Всего отобрано: в Улан-Удэ – 232, Гусиноозерск – 79, Северобайкальск – 57 проб почв. Для Гусиноозерска и Северобайкальска характерно значительное преобладание в территориальном зонировании доли частного сектора с грунтовыми дорогами, что ограничивает изучение дорожной пыли. В Улан-Удэ дороги с твердым покрытием занимают большую площадь, что позволяет использовать дорожную пыль в качестве дополнительного объекта эколого-геохимической оценки промышленного города. В Улан-Удэ на автодорогах с различной интенсивностью движения отобрано 60 смешанных проб дорожной пыли. Все дороги разделены на 3 категории: крупные с 3-4 полосами движения в одну сторону; средние с 2 полосами; малые с 1 полосой в одну сторону. Администрацией ТЭЦ-1,2 Улан-Удэ, Гусиноозерской ГРЭС и Центральной ТЭЦ Северобайкальска были предоставлены 10 проб угля, золы и золошлаков.

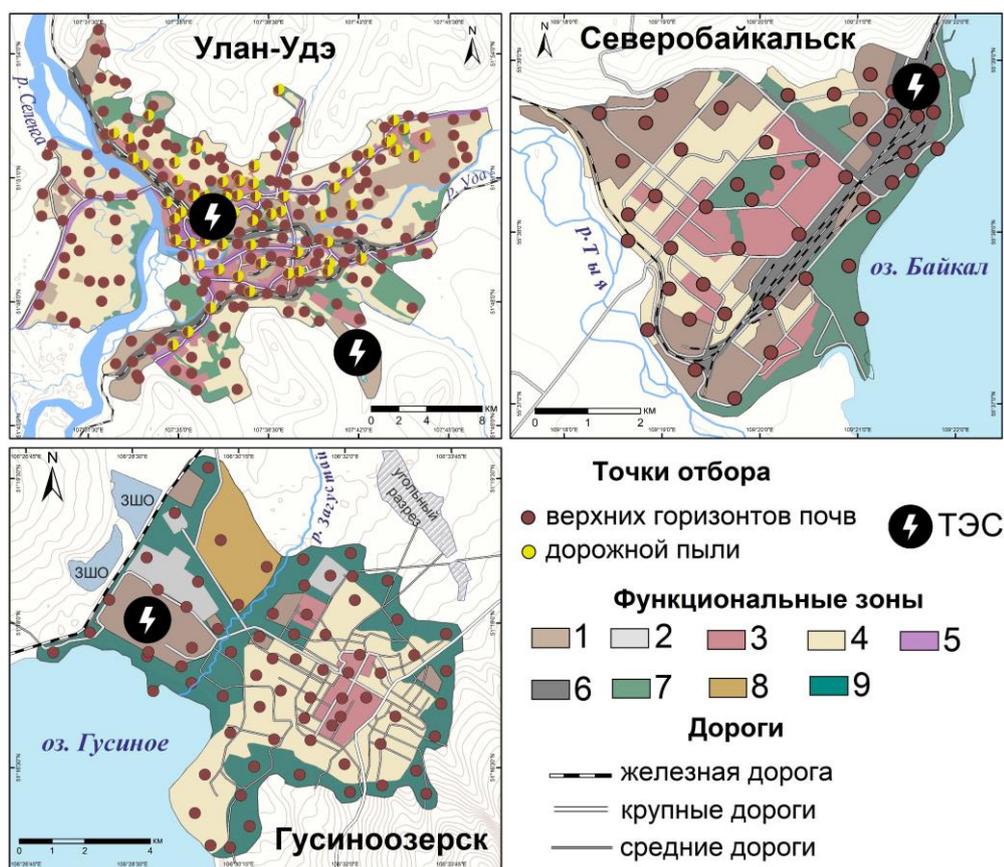


Рисунок 1. Функциональное зонирование и точки отбора проб в Улан-Удэ, Гусиноозерске и Северобайкальске. *Функциональные зоны*: 1 – промышленная действующая; 2 – промышленная недействующая; 3 – селитебная многоэтажная; 4 – селитебная одноэтажная; 5 – автотранспортная; 6 – железнодорожная; 7 – рекреационная; 8 – постагрогенная; 9 – пустыри.

В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ во всех образцах почв и дорожной пыли измерены величина рН и удельная электропроводность, содержание органического углерода, гранулометрический состав и выделена гранулометрическая фракция  $PM_{10}$  методом центрифугирования (Безбердая и др., 2023; Енчилик и др., 2023). Валовые содержания 14 ТММ – Zn, As, Cd, Pb (I класс опасности), Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo (II класс), V (III класс), W, Sr, Bi в почвах, дорожной пыли, их фракции  $PM_{10}$ , угле, золе и золошлаках определялись в лаборатории ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского по аттестованным методикам (НСАМ № 499 АЭС/МС 2015 г.) с использованием масс-спектрометра «iCAP Qc» (Thermo Fisher Scientific) и атомно-эмиссионного спектрометра «Optima-4300 DV» (Perkin Elmer).

Обработка полученных данных включала расчет следующих показателей: коэффициента концентрации  $CF = C_i/C_b$ , где  $C_i$ ,  $C_b$  – общее содержание ТММ в городских и фоновых почвах или во фракции  $PM_{10}$  (Сагет и др., 1990); кларка концентрации  $CC = C_i/K$ , где  $C_i$  – содержание ТММ в дорожной пыли и ее фракции  $PM_{10}$ , мг/кг,  $K$  – кларк элемента в верхней части земной коры, мг/кг (Rudnick, Gao, 2014); кларка концентрации угля и золы  $CC_{coal(ash)} = C_{i_{coal(ash)}}/K_{coal(ash)}$ , где  $C_{i_{coal}}$ ,  $C_{i_{ash}}$  – содержание элемента в углях и золе, мг/кг,  $K_{coal}$ ,  $K_{ash}$  – мировые кларки углей и

золы, мг/кг (Юдович, Кетрис, 2005); отношение содержания элемента во фракции  $PM_{10}$  почв или дорожной пыли к общему содержанию  $Dx = C_{iPM_{10}}/C_{iпочва(дорожная\ пыль)}$ , где  $C_{iPM_{10}}$  – содержание ТММ во фракции  $PM_{10}$ , мг/кг,  $C_{iпочва(дорожная\ пыль)}$  – общее содержание ТММ в почвах или дорожной пыли, мг/кг; суммарного показателя загрязнения  $Zc = \sum CF(CC)-(n-1)$  для почв (дорожной пыли) и их фракции  $PM_{10}$ , где  $n$  – число химических элементов с  $CF$  или  $CC > 1,0$  (Саэт и др., 1990); коэффициента экологической опасности  $Ko = C_i/ПДК_i$ , где  $ПДК_i$  – предельно допустимая (или ориентировочно допустимая, ОДК) концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/кг (СанПиН 1.2.3685-21).

Идентификация и количественная оценка источников ТММ в почвах выполнена с помощью технологии Source Apportionment, а именно, рецепторной модели PMF, которая считается одной из наиболее эффективных (Thurston et al., 2011; Bhuyan et al. 2018; Popovicheva et al., 2024). Метод PMF позволяет разделить матрицу концентраций ТММ на профили источников и определить их вклад в общую дисперсию. Риск для здоровья взрослых и детей при воздействии ТММ, поступающих с почвенными частицами ингаляционным, пероральным путем и при попадании на кожу, оценивался с помощью модели, разработанной на базе совместных исследований федерального центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, Федерального центра экологической политики России и агентства по охране окружающей среды США (US EPA, 1989; US EPA, 2002; P 2.1.10.3968-23).

**Научная новизна.** Определены уровни общего содержания широкого спектра ТММ и в микрочастицах городских почв и дорожной пыли ряда городов Байкальского региона с развитым топливно-энергетическим комплексом. Впервые изучен микроэлементный состав фракции  $PM_{10}$  верхних горизонтов почв и дорожной пыли городов Улан-Удэ, Гусинозерска и Северобайкальска, а также химический состав каменных и бурых углей, золы и золошлакоотвалов (ЗШО) ТЭС в этих городах. Выявлены пространственные закономерности и факторы накопления ТММ, впервые определены источники поллютантов и рассчитаны их вклады в накопление ТММ в верхних горизонтах почв, дана оценка уровней неканцерогенной и канцерогенной опасности аккумуляции ТММ в городских почвах. Впервые проведен комплексный сравнительный анализ загрязнения ТММ почвенного покрова и его тонкой фракции  $PM_{10}$  в различных функциональных зонах Гусинозерска, Северобайкальска, Улан-Удэ под воздействием выбросов угольных электростанций.

#### **Защищаемые положения.**

1. Геохимический профиль почв и дорожной пыли Улан-Удэ определяется Cd, Pb, Zn, Cu, Sb, поступающих с эмиссиями топливно-энергетического комплекса, промышленности и транспорта. В Гусинозерске и Северобайкальске влияние угольной энергетики и транспорта проявляется в формировании в почвах локальных аномалий Sr, Mo, Zn, Cd, Pb.

2. Ключевым фактором аккумуляции ТММ в почвах Улан-Удэ и Северобайкальска является содержание органического углерода (Co, Sr, Sb, Zn, Cd,

Cu, Mo), в Гусиноозерске – оксидов железа (Co, Ni, V, Cr, W, Sb). Функциональная принадлежность территории более значима в Гусиноозерске и Северобайкальске по сравнению с Улан-Удэ, для которого характерно наложение ореолов загрязнения от источников из разных функциональных зон.

3. В почвах и дорожной пыли Улан-Удэ большинство ТММ накапливается в мелкодисперсной фракции  $PM_{10}$ . Доля ТММ в частицах  $PM_{10}$  дорожной пыли выше, чем в почвах. Равномерное распределение ТММ между фракциями почв в Гусиноозерске и Северобайкальске связано с меньшим уровнем антропогенной нагрузки.

4. В почвах и их фракции  $PM_{10}$  Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска общими источниками ТММ являются сжигание угля, автомобильный транспорт и бытовые отходы, которые объясняют 67-83% общей дисперсии содержания ТММ. Вклад других источников связан с влиянием железнодорожного транспорта и особенностями промышленного производства в каждом городе.

5. Развитие неканцерогенных и канцерогенных рисков от загрязненных почвенных частиц в исследуемых городах увеличивается с ростом техногенной нагрузки и достигает наибольших значений в Улан-Удэ. По канцерогенной опасности ТММ образуют ряд  $As > Pb > Co > Ni > Cd$  с наибольшим уровнем риска для детей в трех городах.

**Теоретическая и практическая значимость.** Исследование проводилось в рамках проекта РФФИ-РГО № 17-29-05055\17-офи\_м «Эколого-геохимическое состояние ландшафтов Байкальского региона в сфере воздействия городов и горнопромышленных центров» и хоздоговора с ФГБУ УралНИИ «Экология» «Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал». В диссертации представлены геохимические данные о современной экологической ситуации в Улан-Удэ, Гусиноозерске и Северобайкальске. Исследование содержит анализ пространственного распределения, процессов миграции и аккумуляции ТММ в городах с развитым топливно-энергетическим комплексом, относящимся к центральной и буферной экологическим зонам оз. Байкал. Материалы диссертации могут быть применимы для решения теоретических и прикладных задач, полученные результаты создают основу для разработки эффективных мер по охране окружающей среды и улучшению качества жизни городского населения. Они могут быть использованы для мониторинга и предотвращения негативных последствий загрязнения окружающей среды угольными электростанциями, подготовки рекомендаций по восстановлению загрязненных территорий, а также для обоснования экологически безопасных условий ведения хозяйственной деятельности в уникальном природном регионе.

**Личный вклад автора.** Автор принял личное участие в сборе и обработке материала для написания диссертации, выполнил анализ литературных источников. В составе экспедиций автором проводилось опробование городских почв и дорожной пыли. Автор принимал участие в определении рН, удельной

электропроводности, содержании органического углерода, гранулометрического состава почв и дорожной пыли. Автором выделена фракция PM<sub>10</sub> почв и пыли, произведена статистическая обработка полученных данных, подготовлен табличный и иллюстративный материал.

**Степень достоверности, апробация результатов и публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 5 в рецензируемых изданиях Scopus, Web of Science, RSCI. Методика эколого-геохимического анализа компонентов ландшафтов, загрязненных под влиянием угольной ТЭС, апробирована на примере Гусиноозерска и оз. Гусино в статьях (Efimova et al., 2022) с вкладом автора 20% и (Сычева и др., 2022) с вкладом автора 60%. Анализ пространственной структуры загрязнения почв и их фракции PM<sub>10</sub> с определением ведущих природных и антропогенных факторов аккумуляции ТММ представлен на примере Гусиноозерска в публикации (Сычева, Кошелева, 2023) с вкладом автора 65%. Оценка уровней неканцерогенной и канцерогенной опасности накопления ТММ в почвах Северобайкальска для здоровья детей и взрослых приводится в работе (Сычева, Кошелева, 2024), вклад автора составляет 65%. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова и дорожной пыли Улан-Удэ с идентификацией источников загрязнения с помощью метода PMF представлена в статье (Sycheva, Kosheleva, 2025), вклад автора составляет 70%. Результаты апробированы на научных и научно-практических конференциях (Проблемы экоинформатики, Москва, 2024; ICOMR, Улан-Батор, 2020; Экология и техносферная безопасность, Сочи, 2024).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 188 страницах, включает 36 таблиц и 75 рисунков. Библиографический список содержит 325 литературных источников, из них 194 на английском языке.

**Благодарности.** Выражаю глубокую признательность научному руководителю д.г.н., профессору Н.Е. Кошелевой за неоценимую помощь и поддержку на протяжении всего процесса работы над диссертацией и во время полевых исследований. Благодарю академика РАН, д.г.н. Н.С. Касимова за ценные советы и рекомендации по интерпретации результатов. Выражаю благодарность всем сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ за критику и помощь в осмыслении материала, а также н.с. Е.В. Терской и инж. Л.В. Добрыдневой, доц. П.П. Кречетову, асп. Н.Б. Жаксылыкову за консультации и помощь в выполнении ряда лабораторных работ. Автор искренне признателен н.с. И.В. Тимофееву, М.А. Узору, Н.Б. Жаксылыкову и Д.В. Котову за помощь в сборе полевых материалов. Выражаю благодарность директору Байкальского института природопользования СО РАН Е.Ж. Гармаеву и сотрудникам института за содействие и участие в экспедиционных исследованиях. Особую благодарность выражаю к.г.н., сотруднику лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН Н.В. Сычеву за поддержку, терпение и понимание.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследования, ее научная новизна, практическая значимость, сформулированы защищаемые положения и приведены сведения об апробации работы. Глава 1 посвящена обзору современного состояния и методов эколого-геохимических исследований, связанных с оценкой влияния угольных ТЭС на загрязнение окружающей среды в городах. В главе 2 дана характеристика физико-географических условий и основных источников техногенного воздействия в Улан-Удэ, Гусиноозерске и Северобайкальске. В главе 3 рассмотрены методы полевых, лабораторных исследований и обработки полученных данных. В главе 4 и 5 изложены результаты эколого-геохимических исследований Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска на основе данных о содержании ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$ . В главе 6 представлен сравнительный анализ загрязнения почв трех городов с оценкой экологического риска для здоровья населения. Заключение содержит основные выводы диссертационной работы.

### ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**Первое защищаемое положение.** *Геохимический профиль почв и дорожной пыли Улан-Удэ определяется Cd, Pb, Zn, Cu, Sb, поступающих с эмиссиями топливно-энергетического комплекса, промышленности и транспорта. В Гусиноозерске и Северобайкальске влияние угольной энергетики и транспорта проявляется в формировании в почвах локальных аномалий Sr, Mo, Zn, Cd, Pb. (основано на результатах глав 3, 4, 6).*

Выделение приоритетных поллютантов в почвах, дорожной пыли и их частицах  $PM_{10}$  Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска на основе коэффициентов  $CF$ ,  $CS$  и суммарного показателя загрязнения  $Zc$  в различных функциональных зонах городов показало, что для Улан-Удэ характерно обогащение почв широким спектром элементов с более высокими уровнями накопления (табл. 1). Наиболее контрастные аномалии Cd, Zn и Sb характерны для фракции  $PM_{10}$  дорожной пыли, Pb и Cu – для фракции  $PM_{10}$  почв.

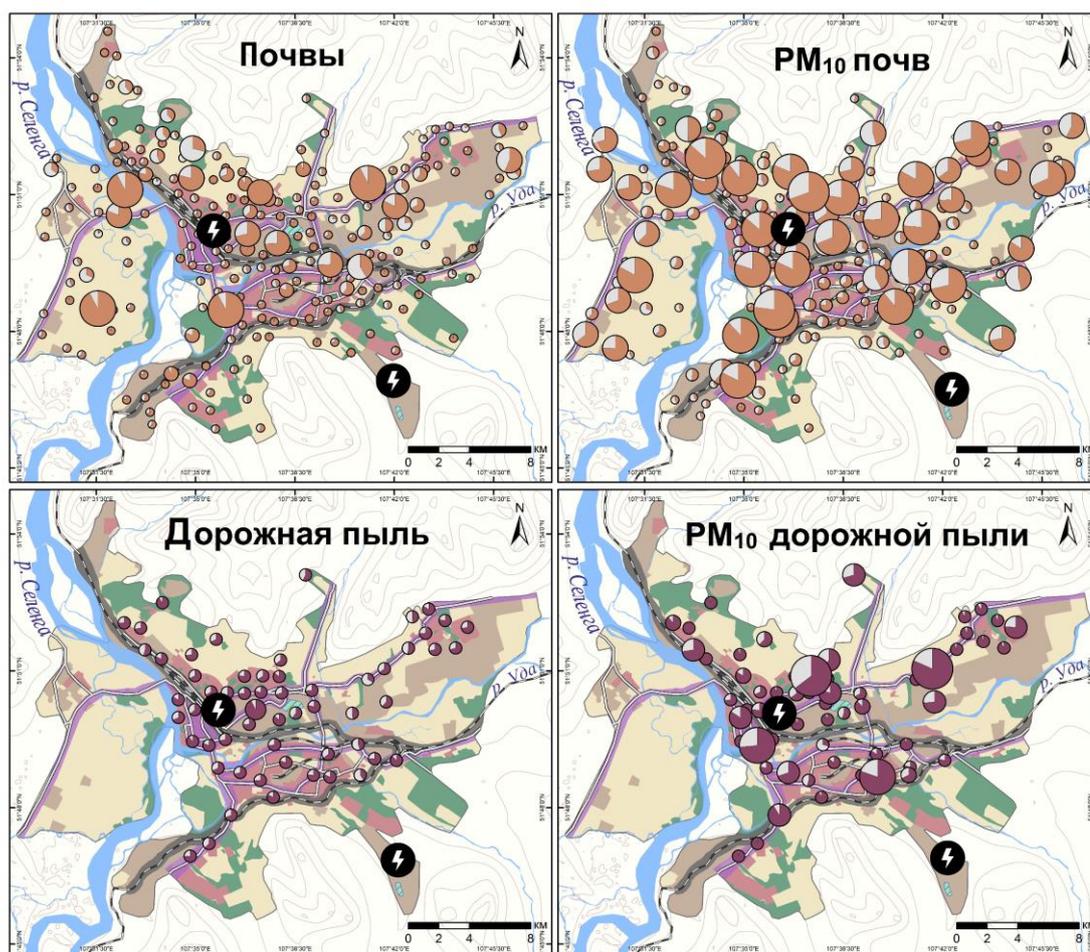
Пространственное распределение ассоциации Cd, Pb, Zn, Cu, Sb в почвах, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$  отражают картограммы, показывающие вклад этих ТММ в суммарное загрязнение. При максимальном, чрезвычайно опасном уровне загрязнения ( $Zc > 128$ ) почв и дорожной пыли доля ассоциации Cd, Pb, Zn, Cu, Sb превышает 80% (рис. 2).

В центральной части Улан-Удэ сформировалась обширная зона с высоким и максимальным уровнями суммарного загрязнения ТММ почв и их фракции  $PM_{10}$ . Она обусловлена совместным воздействием ТЭЦ-1, ЗШО, промышленных предприятий, транспортная доступность которых обеспечивается ответвлениями железнодорожных путей, а также густой сетью автомобильных дорог, что создает высокую контрастность геохимических аномалий в почвах Улан-Удэ.

Таблица 1

Кларки концентрации  $CC$  (в нижних индексах) ТММ в дорожной пыли и фракции  $PM_{10}$  в Улан-Удэ, Гусинозерске и Северобайкальске

Город	Компонент	средние $CC$	$CC$ в локальных аномалиях
Улан-Удэ	почвы	Pb <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub> Cd <sub>3</sub> Zn <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub>	Pb <sub>22</sub> W <sub>21</sub> Sb <sub>18</sub> Bi <sub>13</sub> Cd <sub>10</sub>
	$PM_{10}$	Cd <sub>5</sub> Pb <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> Mo <sub>2</sub>	W <sub>54</sub> Bi <sub>37</sub> Pb <sub>36</sub> Cd <sub>25</sub> Sb <sub>13</sub> Cu <sub>11</sub> Zn <sub>10</sub>
	дорожная пыль	Pb <sub>2</sub>	Sb <sub>13</sub>
	$PM_{10}$	Cd <sub>8</sub> Zn <sub>5</sub> Sb <sub>3</sub> Pb <sub>3</sub> Cu <sub>2</sub> W <sub>2</sub> As <sub>2</sub>	Cd <sub>101</sub> Zn <sub>51</sub> Sb <sub>46</sub> W <sub>38</sub> Bi <sub>16</sub> Pb <sub>15</sub> Cu <sub>14</sub> Mo <sub>11</sub>
Гусинозерск	почвы	Mo <sub>3</sub> Sr <sub>3</sub> Cd <sub>2</sub> Pb <sub>2</sub>	Mo <sub>41</sub> Sr <sub>14</sub> Sb <sub>12</sub> Zn <sub>11</sub> Pb <sub>11</sub>
	$PM_{10}$	Mo <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> W <sub>2</sub> Cd <sub>2</sub>	Mo <sub>26</sub> Sb <sub>18</sub> W <sub>11</sub> Zn <sub>11</sub>
Северобайкальск	почвы	Pb <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Cd <sub>2</sub>	Cd <sub>11</sub> Zn <sub>8</sub> Pb <sub>6</sub> Sb <sub>6</sub>
	$PM_{10}$	Pb <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Cd <sub>2</sub>	Cd <sub>10</sub> Pb <sub>10</sub> Mo <sub>8</sub>



Суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  ○  $\geq 128$  ○ 64-128 ○ 32-64 ○ 16-32 ○  $\leq 16$

Вклад (%) в суммарное загрязнение Ассоциации Cd, Pb, Zn, Cu, Sb ○ Остальных элементов

Рисунок 2. Вклад ассоциации Cd, Pb, Zn, Cu, Sb в суммарное загрязнение почв, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$  в Улан-Удэ

Дорожная пыль Улан-Удэ, формирующаяся преимущественно под влиянием автотранспорта и отражающая сезонные колебания уровня загрязнения, характеризуется низкой степенью обогащенности ТММ по сравнению с почвами. Суммарное загрязнение дорожной пыли оказалось неопасным. На крупных автодорогах вблизи заправочных станций и ремонтных мастерских во фракции  $PM_{10}$  пыли значение  $Z_c$  возрастает до максимального.

Сравнение суммарного загрязнения ТММ почв и фракции  $PM_{10}$  трех городов показало, что наибольший уровень загрязнения, соответствующий среднему для почв в целом ( $Z_c = 18$ ) и высокому для частиц  $PM_{10}$  ( $Z_c = 38$ ), характерен для Улан-Удэ, где установлено трехкратное увеличение суммарного загрязнения почв за последние 10 лет (Корляков и др., 2019). Почвы и частицы  $PM_{10}$  Гусинозерска и Северобайкальска загрязнены слабо ( $Z_c < 16$ ) (рис. 3).

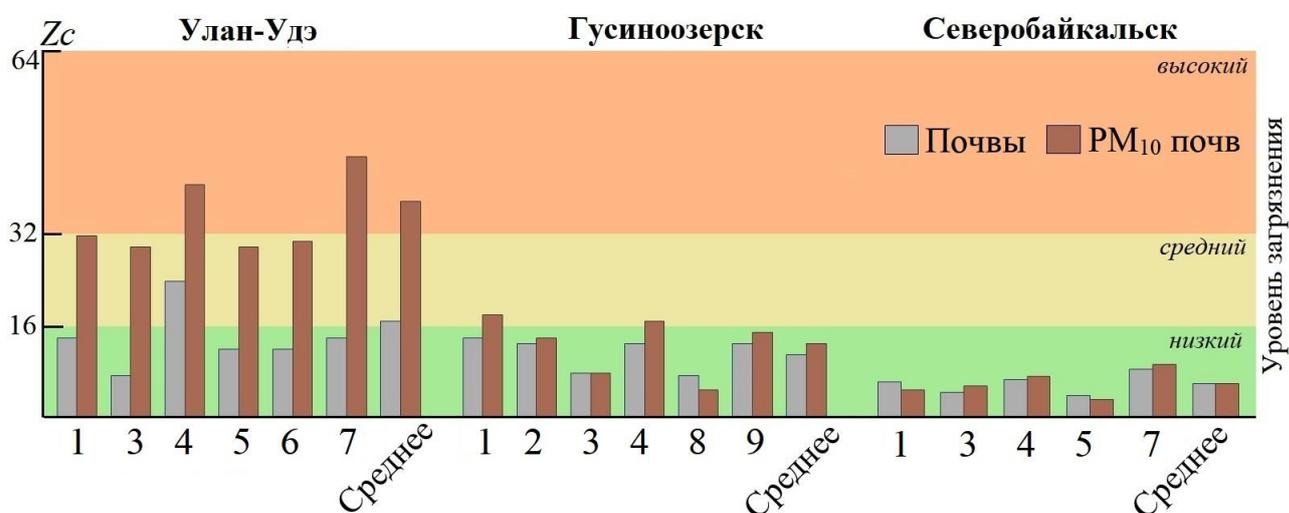


Рисунок 3. Уровни суммарного загрязнения почв и фракции  $PM_{10}$  ( $Z_c$ ) в разных функциональных зонах Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска.

Функциональные зоны: 1 – промышленная действующая; 2 – промышленная недействующая; 3 – селитебная многоэтажная; 4 – селитебная одноэтажная; 5 – рекреационная; 6 – автотранспортная; 7 – железнодорожная; 8 – постагрогенная; 9 – пустыри.

В Улан-Удэ наибольший уровень загрязнения почв выявлен в селитебной одноэтажной зоне ( $Z_c = 24$ ), где значительное влияние оказывают выбросы автотранспорта, летучей золы при печном отоплении домов и формируются контрастные аномалии ТММ вблизи гаражных кооперативов, автомастерских и стихийных свалок бытовых отходов. Фракция  $PM_{10}$  почв максимально загрязнена в железнодорожной зоне ( $Z_c = 46$ ), где техногенная нагрузка обусловлена совместным воздействием железной дороги, обеспечивающей подъезд к промышленным объектам, выбросами предприятий, пылением ЗШО и хранилища угля на территории ТЭЦ-1.

В Гусиноозерске практически одинаково загрязнены почвы и фракция  $PM_{10}$  промышленной действующей подзоны ( $Z_c = 14$  и  $18$  соответственно), где основное влияние оказывают транспортировка, хранение и сжигание бурого угля. Это

подтверждают результаты анализа пространственного распределения приоритетных поллютантов Sr и Mo в почвах. Наибольшие уровни накопления Sr ( $CC = 9,0-14$ ) выявлены вблизи ЗШО, зоны разгрузки и площадки хранения угля на территории Гусиноозерской ГРЭС. На юге Гусиноозерска установлено аномально высокое накопление Mo ( $CC = 41$ ), вызванное, вероятно, выщелачиванием металла из нерекультивированного углесодержащего отвала вскрышных пород. В почвах и фракции  $PM_{10}$  железнодорожной зоны Северобайкальска формируются локальные аномалии Cd, Zn, Pb вдоль БАМ и вблизи подъездных путей к Центральной ТЭЦ.

**Второе защищаемое положение.** *Ключевым фактором аккумуляции ТММ в почвах Улан-Удэ и Северобайкальска является содержание органического углерода (Co, Sr, Sb, Zn, Cd, Cu, Mo), в Гусиноозерске – оксидов железа (Co, Ni, V, Cr, W, Sb). Функциональная принадлежность территории более значима в Гусиноозерске и Северобайкальске по сравнению с Улан-Удэ, для которого характерно наложение ореолов загрязнения от источников из разных функциональных зон (основано на результатах глав 4, 5).*

Ведущие факторы аккумуляции ТММ в городских почвах определены путем построения регрессионных деревьев (дендрограмм) в пакете SPLUS, определяющих уровни содержания ТММ при разных комбинациях факторов (Rawls, Pachepsky, 2002; Кошелева и др., 2015). Исследование содержания ТММ в почвах города совместно с природными (рН, удельная электропроводность, содержание органического углерода, физической глины,  $Fe_2O_3$ , MnO) и антропогенными (функциональная зона) факторами их накопления дает возможность определить комбинации переменных, при которых наблюдается максимальная аккумуляция ТММ, и на основе анализа механизмов образования геохимических барьеров диагностировать их классы (Касимов и др., 2011; Глазовская, 2012; Кошелева и др., 2015, 2022).

В почвах Улан-Удэ содержание органического углерода  $C_{орг}$  является ведущим фактором накопления Sb, Cd, Mo, Cu, Zn. Рост концентрации Mo в 6 раз отмечен при содержании  $C_{орг} > 7,0\%$ , Cu в 4 раза при  $C_{орг} > 4,8\%$ , Zn в 1,8 раз при  $C_{орг} > 0,69\%$ , Cd и Sb в 1,3-2,0 раза при  $C_{орг} > 1,1\%$ . Значение других факторов аккумуляции можно оценить на примере Cu. Согласно дендрограмме (рис. 4), при более высоком содержании  $C_{орг}$  и  $Fe_2O_3 > 3,9\%$  концентрация Cu увеличивается в 2,4 раза, а при  $C_{орг} < 4,8\%$  усиление накопления Cu связано с утяжелением гранулометрического состава ( $PM_{10} > 39\%$ ) и увеличением рН  $> 6,8$ . Это указывает на закрепление Cu в почвах Улан-Удэ на комплексном биогеохимическом органо-минеральном, сорбционно-седиментационном и щелочном барьерах.

Щелочно-кислотные условия в почвах Улан-Удэ оказывают наибольшее влияние на аккумуляцию Bi и Ni, накапливающихся на кислотном барьере, и Sr, который аккумулируется на щелочном барьере. Удельная электропроводность является ведущим фактором накопления Pb и W. Аккумуляция As, Sr, Co и V протекает преимущественно на хемосорбционном барьере с участием  $Fe_2O_3$ .

Накопление одного W различается по функциональным зонам, с максимумами в промышленной и автотранспортной зонах. Высокая плотность источников загрязнения в разных функциональных зонах Улан-Удэ приводит к наложению их ореолов, что затрудняет оценку роли функционального назначения территории как фактора аккумуляции поллютантов.

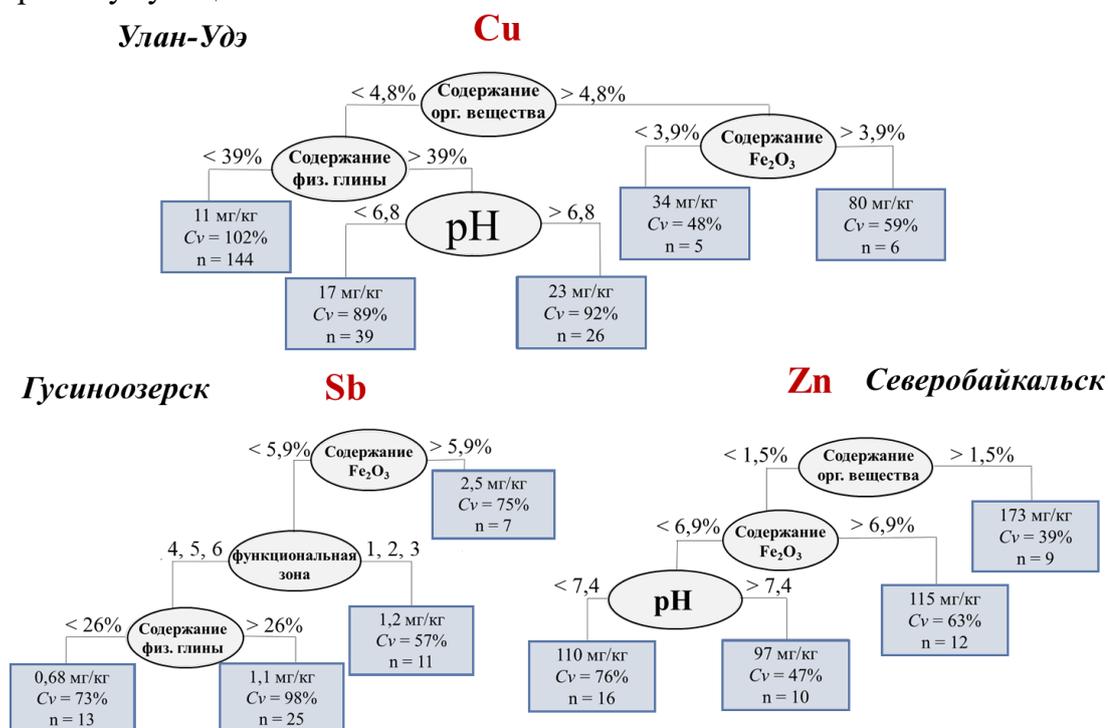


Рисунок 4. Факторы накопления (в овалах) Cu, Sb и Zn в верхних горизонтах почв Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска. Для каждого сочетания факторов приводится среднее содержание ТММ, коэффициент вариации Cv и число точек опробования n. *Функциональные зоны*: 1 – промышленная действующая; 2 – промышленная недействующая; 3 – селитебная одноэтажная; 4 – селитебная многоэтажная; 5 – постагрогенная; 6 – пустыри.

В Гусиноозерске ведущим фактором аккумуляции Co, Ni, V, Cr, W и Sb в почвах является содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, участвующего в формировании хемосорбционного барьера в почвах. Так, при содержании Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 4,3% концентрации Co и V возрастают в 1,3-1,4 раза, Cr и Ni в 1,5 раза (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 5,3%), W в 1,9 раз (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 5,7%), Sb в 2,6 раз (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 5,9%). Все эти ТММ, кроме Sb, поступают в почвы с выбросами золы при сжигании бурого угля на ГРЭС и при печном отоплении. В почвах Гусиноозерска Pb и Cu накапливаются преимущественно на биогеохимическом органо-минеральном барьере, As и Bi – на сорбционно-седиментационном, Mo – на кислотном. Возрастание величины ЕС<sub>1.5</sub> прямо влияет на аккумуляцию Sr и Zn. Принадлежность к функциональной зоне выступает значимым фактором практически для всех ТММ, за исключением As, Bi и V.

В почвах Северобайкальска концентрации большинства поллютантов V, Co, Ni, Zn, Cd, Sr Sb возрастают с увеличением содержания органического вещества, что также характерно для Улан-Удэ. Чаще всего эта зависимость наблюдается в

почвах промышленной и железнодорожной зон. Аккумуляция W, Pb и Bi в верхних горизонтах почв Северобайкальска протекает преимущественно на хемосорбционном барьере с участием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V и Cr – на сорбционно-седиментационном, Ni и Cu – на щелочном, а As – на кислотном.

**Третье защищаемое положение.** В почвах и дорожной пыли Улан-Удэ большинство ТММ накапливается в мелкодисперсной фракции PM<sub>10</sub>. Доля ТММ в частицах PM<sub>10</sub> дорожной пыли выше, чем в почвах. Равномерное распределение ТММ между фракциями почв в Гусиноозерске и Северобайкальске связано с меньшим уровнем антропогенной нагрузки (основано на результатах глав 4, 5, 6).

Для Улан-Удэ выявлено увеличение концентраций всех ТММ, кроме Sr, в микрочастицах PM<sub>10</sub> по сравнению с общим содержанием (рис. 5).

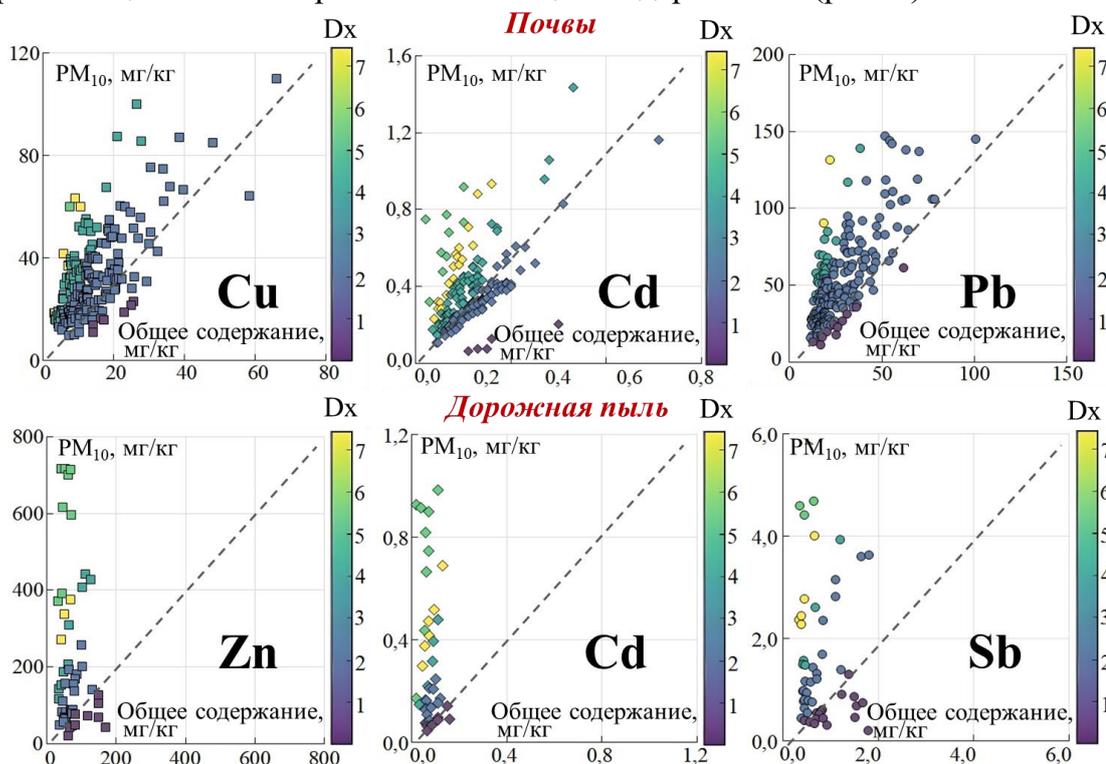


Рисунок 5. Гранулометрическое фракционирование ТММ почв и дорожной пыли Улан-Удэ

Наибольшие уровни накопления во фракции PM<sub>10</sub> почв и дорожной пыли характерны для Cd (с превышением в 3,5 и 11 раз) и Cu (2,7 и 5,9 раз, соответственно).

В условиях низкой интенсивности промышленного производства и транспортного потока в Северобайкальске объем выпадающих техногенных аэрозолей значительно ниже, а сами частицы слабее обогащены ТММ, что приводит к более равномерному распределению элементов между частицами разного диаметра. В Гусиноозерске, несмотря на большие объемы выбросов Гусиноозерской ГРЭС, антропогенная нагрузка на городскую среду снижается из-за интенсивного рассеивания выбросов в атмосфере благодаря высоте дымовой

трубы (330 м), из которой продукты сгорания, включая мелкодисперсную золу, выбрасываются на большую высоту, что снижает выпадения ТММ вблизи источника.

Исследование фракционного состава ТММ в почвах Улан-Удэ (рис. 6) показало, что на фракцию  $PM_{10}$  в среднем приходится более половины содержания Cd и Cu. Доля Co, Bi, Pb, Ni, Cr, Sb, As во фракции  $PM_{10}$  находится в пределах 40-48%. В Гусиноозерске и Северобайкальске доли всех изучаемых ТММ во фракции  $PM_{10}$  почв не превышают 40%.

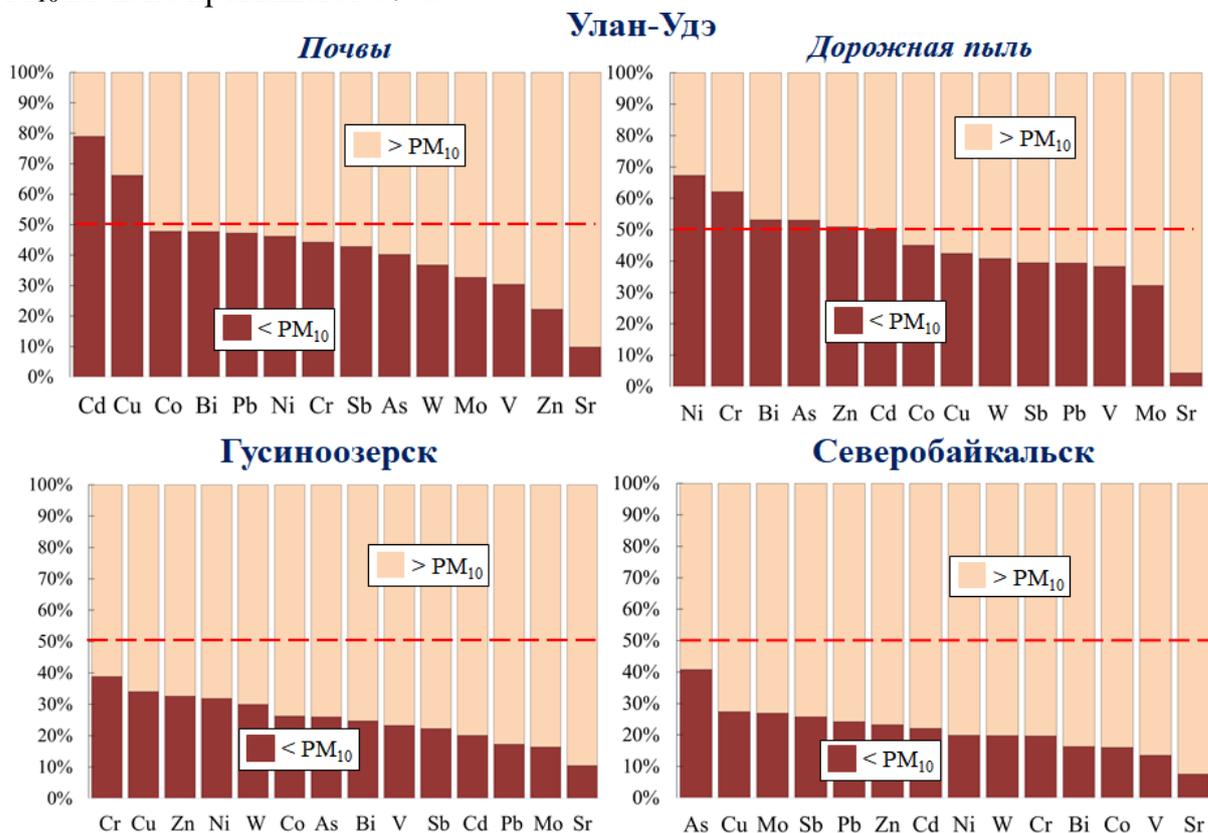


Рисунок 6. Доля ТММ во фракциях почв Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска и дорожной пыли Улан-Удэ

В дорожной пыли Улан-Удэ частицы  $PM_{10}$  содержат более 50% As, Zn, Ni, Cr, Bi, Cd. Дорожная пыль крупных, средних и малых дорог слабо различается по доле ТММ в частицах  $PM_{10}$ , тогда как в дорожной пыли дворов доля Ni возрастает до 90%, Cr и Cd 81-89%, Bi, As и Zn 64-73%. При медленном движении автомобилей во дворах, с частыми остановками и стартами, увеличивается износ тормозных колодок, сцепления и шин, что способствует образованию мелких частиц, обогащенных ТММ.

Анализ пространственного распределения содержания приоритетных загрязнителей в почвах, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$  в Улан-Удэ, а также значений суммарного показателя загрязнения демонстрирует преобладающее накопление элементов в тонких частицах (рис. 7). Так, суммарный уровень загрязнения фракции  $PM_{10}$  почв возрастает в 2 раза, а дорожной пыли – в 7 раз по сравнению с общим содержанием.

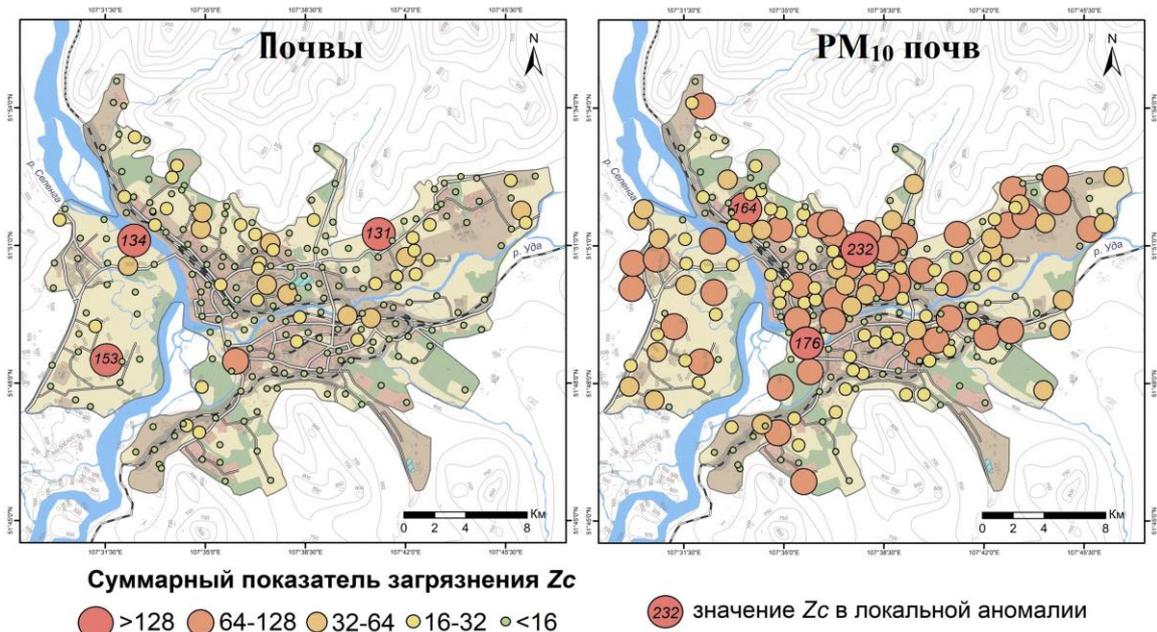


Рисунок 7. Суммарное загрязнение ТММ почв и фракции  $PM_{10}$  в Улан-Удэ

Сравнение уровней накопления ТММ в частицах  $PM_{10}$  почв и дорожной пыли по сравнению с их общим содержанием показало, что в пыли контрастность накопления всех элементов, кроме Sr, Mo, V и Co выше в 2-7 раз (рис. 8). В почвах значения  $D_x$  оказались выше для одного Sr, который является углефильным элементом, он длительное время накапливается в почвах Улан-Удэ в результате осаждения летучей золы, пыления ЗШО и хранилища угля.

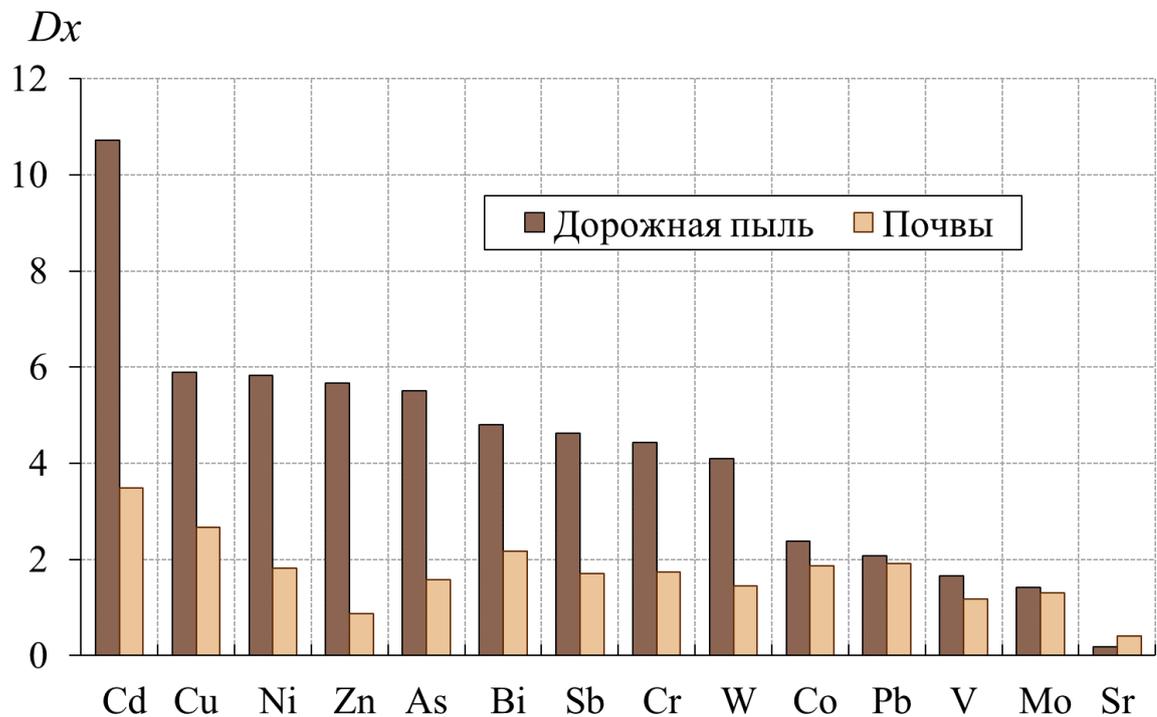


Рисунок 8. Коэффициенты  $D_x$  ТММ в почвах и дорожной пыли Улан-Удэ

Автотранспорт является основным источником микрочастиц, обогащенных ТММ, значительную долю в составе дорожной пыли составляют искусственные материалы (резиновая пыль, мелкие частицы металлов и сажи), которые обладают

высокой удельной поверхностью и способны активнее закреплять ТММ. В почвах ТММ фиксируются на частицах различного размера через длительные процессы осаждения поллютантов, химической адсорбции, связывания с органическим веществом и глинистыми минералами с чем связаны более низкие значения  $D_x$ .

**Четвертое защищаемое положение.** В почвах и их фракции  $PM_{10}$  Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска общими источниками ТММ являются сжигание угля, автомобильный транспорт и бытовые отходы, которые объясняют 67-83% общей дисперсии содержания ТММ. Вклад других источников связан с влиянием железнодорожного транспорта и особенностями промышленного производства в каждом городе (основано на результатах главы 4, 5).

С помощью модели PMF (Positive Matrix Factorization), которая в настоящее время считается наиболее эффективным статистическим методом в технологии Source Apportionment (Thurston et al., 2011; Bhuyan et al. 2018; Popovicheva et al., 2024), идентифицированы источники ТММ и количественно определены их вклады в накопление ТММ в почвах и фракции  $PM_{10}$  Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска (рис. 9).

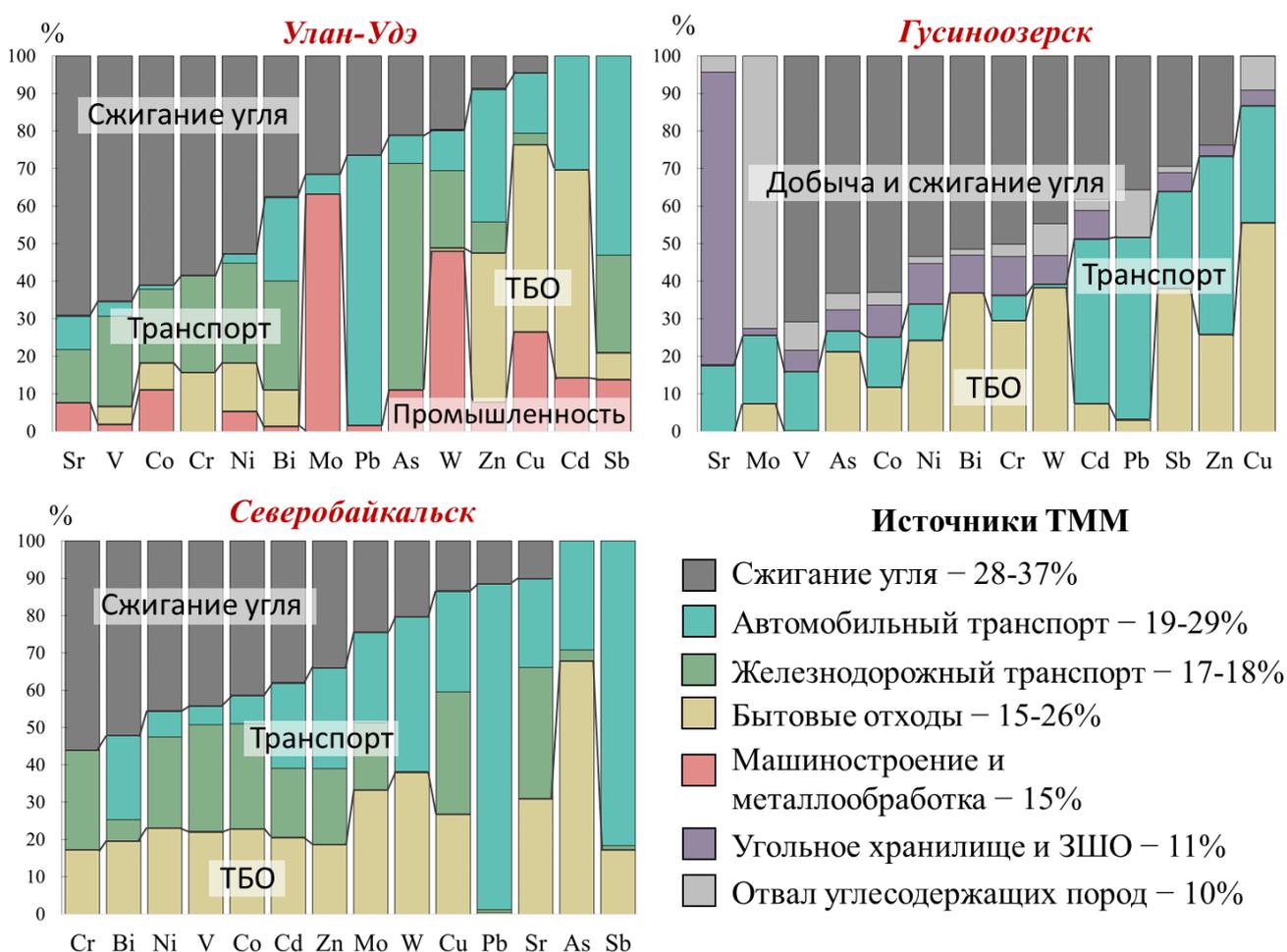


Рисунок 9. Вклад источников в накопление ТММ в почвах Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска

Первый фактор, связанный с сжиганием угля на ТЭС и при печном отоплении, вносит наибольший вклад в содержание ТММ: 28% в Северобайкальске, 33% в Улан-Удэ и 37% в Гусиноозерске. Данный фактор составляет наибольшую долю V (44-71%), Co (41-63%), Cr (50-58%), Ni (52-53%) в почвах трех городов. В Улан-Удэ с сжиганием угля дополнительно ассоциируется Sr (69%), в Гусиноозерске – As (63%), Bi (52%) и W (45%), в Северобайкальске – Bi (46%), Cd (38%) и Zn (34%).

Набор элементов в профилях загрязнения зависит от химического состава и условий сжигания углей при участии других локальных источников, что приводит к вариативности профиля ТММ. В Северобайкальске, при наименьшем среди трех городов вкладе данного фактора в общую дисперсию ТММ, что обусловлено низкой мощностью Центральной ТЭЦ и меньшим количеством частных домовладений, в профиле фактора присутствуют Zn и Cd, которые поступают от БАМ, проходящей поблизости от электростанции.

Вклад второго фактора, связанного с выбросами автомобильного транспорта, составляет 29% общей дисперсии ТММ в Северобайкальске, 20% в Гусиноозерске и 19% в Улан-Удэ, с ним ассоциированы Pb (49%-89%), Sb (26-82%), Zn (29-48%), Cd (30-44%).

Третий фактор – стихийные свалки бытовых отходов – характеризуется полиэлементным составом загрязнителей, общими для трех городов поллютантами являются Cu (31-55%), Zn (27-40%), W (37-38%), вклад этого фактора в дисперсию ТММ составляет 26% в Северобайкальске, 21% в Гусиноозерске, 15% в Улан-Удэ. На фактор, характеризующий выбросы железнодорожного транспорта, приходится 18% общей дисперсии ТММ в Улан-Удэ, он включает As (61%), Bi (29%), Ni, Sb (27%) и 17% в Северобайкальске, где с ним связаны Sr (35%), Cu (33%) V, Co (29%).

Остальные техногенные источники ТММ различаются и обусловлены спецификой промышленного производства в каждом городе. В Улан-Удэ наибольшую долю Mo (63%) и W (48%) дает фактор машиностроения и металлообработки, его вклад в общую дисперсию ТММ составляет 15%. В Гусиноозерске вклад факторов, связанных с влиянием отвала углесодержащих пород и пыления угля и ЗШО, составляет 10 и 11% соответственно, данные факторы объясняют максимальную долю Mo (73%) и Sr (78%).

Во фракции PM<sub>10</sub> почв Гусиноозерска выделяются те же источники, что и для почв в целом. Значительно, почти в два раза возрастает вклад фактора, связанного с бытовыми отходами – до 29%. В Улан-Удэ для частиц PM<sub>10</sub> выделен шестой фактор – влияние ЗШО (его вклад составляет 11%), с которым ассоциируется 80% содержания Zn. В Северобайкальске для фракции PM<sub>10</sub> идентифицирован пятый фактор с вкладом 21%, он включает Bi (39%), W (38%), Sr (34%), V (32%), As (29%), Co (29%), Cd (28%). Этот фактор представляет сразу несколько техногенных источников – очистные сооружения, выбросы железнодорожного транспорта, золы при сжигании угля, бытовые отходы.

Для анализа пространственных закономерностей воздействия идентифицированных источников на накопление ТММ в почвах построены карты, отражающие их вклад в каждой точке опробования в Улан-Удэ, Гусинозерске и Северобайкальске (рис. 10).

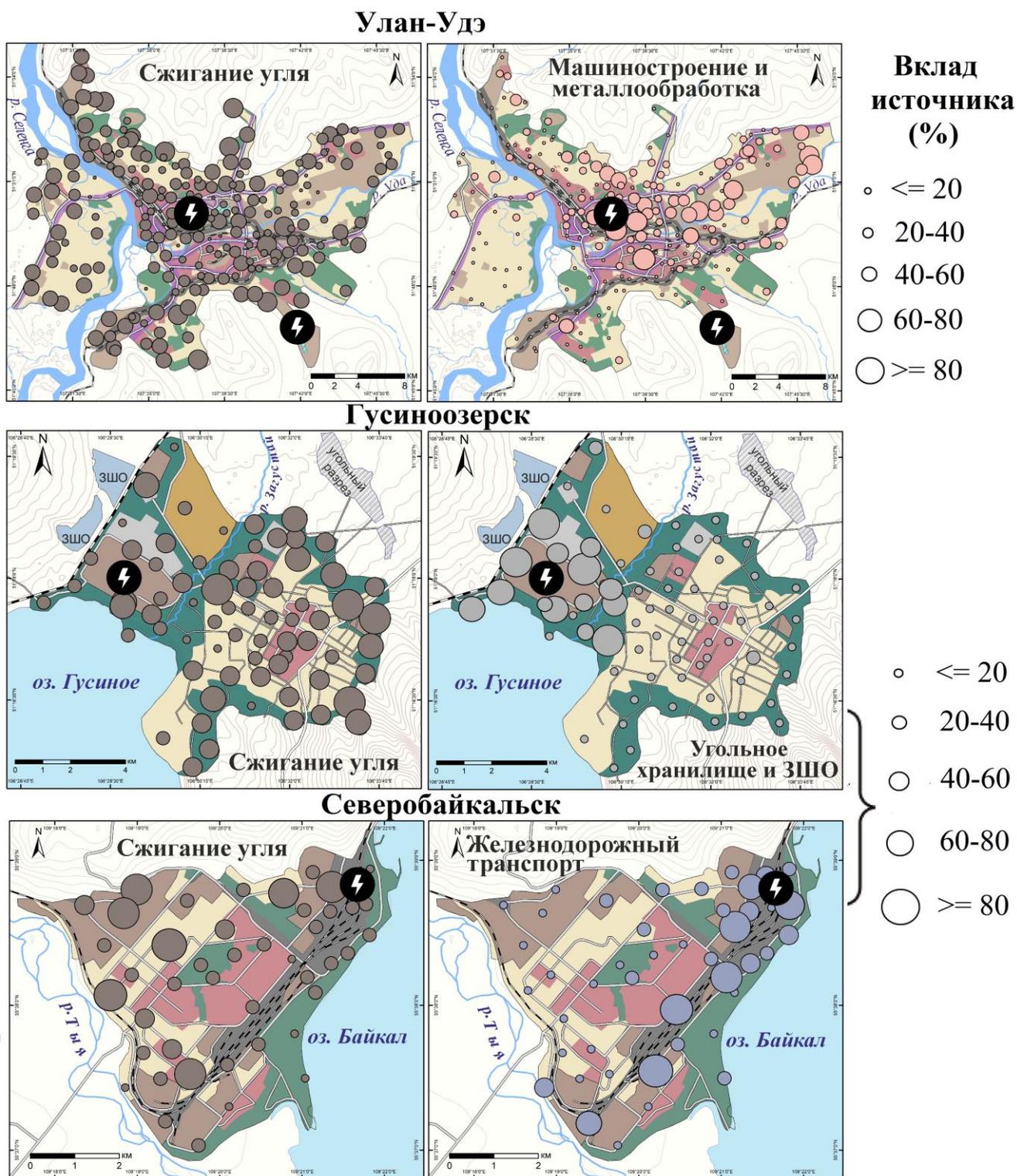


Рисунок 10. Пространственное распределение вкладов источников в накопление ТММ в почвах Улан-Удэ, Гусинозерска и Северобайкальска

Фактор, связанный с сжиганием угля, вносит наибольший вклад (> 80%) в аккумуляцию ТММ в частном жилом секторе трех городов и вблизи небольших котельных в Улан-Удэ и Северобайкальске, где низкая высота дымовых выбросов приводит к выпадению и накоплению поллютантов вблизи источника.

В Улан-Удэ максимальный вклад выбросов предприятий машиностроения и металлообработки прослеживается во всей центральной промышленной зоне, в наиболее удаленных от промзоны районах частного жилого сектора он сводится к минимуму (< 20%). В Гусиноозерске вблизи ГРЭС отмечен наибольший вклад источника, связанного с пылением ЗШО и угля. Рядом с отвалом углесодержащих пород на юге города установлен максимальный вклад одноименного фактора (93%). В Северобайкальске максимальный вклад фактора, связанного с выбросами железнодорожного транспорта, отмечается вдоль БАМ и вблизи Центральной ТЭЦ. вклад фактора, описывающего выбросы автотранспорта, находится на одном уровне практически на всей территории, достигая наибольших значений вблизи автомастерских на севере города.

**Пятое защищаемое положение.** *Развитие неканцерогенных и канцерогенных рисков от загрязненных ТММ почвенных частиц в исследуемых городах увеличивается с ростом техногенной нагрузки и достигает наибольших значений в Улан-Удэ. По канцерогенной опасности ТММ образуют ряд  $As > Pb > Co > Ni > Cd$  с наибольшим уровнем риска для детей в трех городах (основано на результатах главы 6).*

Для оценки рисков для здоровья человека, связанных с загрязнением почв ТММ, была использована модель ННРА (Human Health Risk Assessment). Модель разработана Агентством по охране окружающей среды США (EPA) и утверждена в России в качестве Руководства (Р 2.1.10.3968-23) для анализа воздействия вредных веществ на здоровье человека через проглатывание (ingest), вдыхание (inhal) и кожный контакт (dermal). С помощью модели можно прогнозировать канцерогенные (возникновение злокачественных новообразований) и неканцерогенные (заболевания различной природы – повреждения почек, печени, нервной системы и др.) риски для взрослого населения и детей.

Для жителей Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска рассчитаны среднесуточные дозы поступления ТММ (ADD) через три пути воздействия. Значения ADD в трех городах оказались выше для детей, чем для взрослого населения, что обусловлено физиологическими и поведенческими особенностями детей, включая частый контакт с загрязненными поверхностями в процессе игры. Для взрослых во всех городах основной путь экспозиции почти всех ТММ – кожный контакт, для Cr, Cd и Bi – проглатывание. Для детей, напротив, главным путем поступления в организм большинства поллютантов является проглатывание, для Ni и As – контакт с кожей. Ингаляционный путь имеет наименьшее значение как для детей, так и для взрослых. Поскольку для расчетов в данной модели используются общие концентрации ТММ в почвах, а не в отдельных фракциях,

предполагается, что крупные почвенные частицы быстро оседают, их размер препятствует проникновению в нижние отделы дыхательной системы, поэтому они не оказывают существенного системного воздействия на организм.

Суммарный неканцерогенный риск  $HI$  соответствует низкому уровню ( $HI$  0,1-1,0) для взрослого населения всех городов. Для детей допустимый уровень превышен во всех городах, значения индексов  $HI$  в среднем составили 1,28 в Северобайкальске, 1,91 в Гусиноозерске и 1,99 в Улан-Удэ, что соответствует среднему неканцерогенному риску.

Суммарный канцерогенный риск  $TR$  от всех путей воздействия As, Pb, Co, Ni и Cd, обладающих канцерогенными свойствами, для населения Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска соответствует низкому, предельно допустимому уровню ( $TR = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$ ) и изменяется от  $4,4 \cdot 10^{-5}$  в Северобайкальске до  $5,4 \cdot 10^{-5}$  в Улан-Удэ. Наибольший вклад в формирование канцерогенного риска вносит As, его доля варьирует от 94% в Северобайкальске до 97% в Гусиноозерске, на долю Pb приходится от 2% в Гусиноозерске до 5% в Северобайкальске, суммарный вклад Co, Cd, Ni в трех городах составляет около 1% (рис. 11).

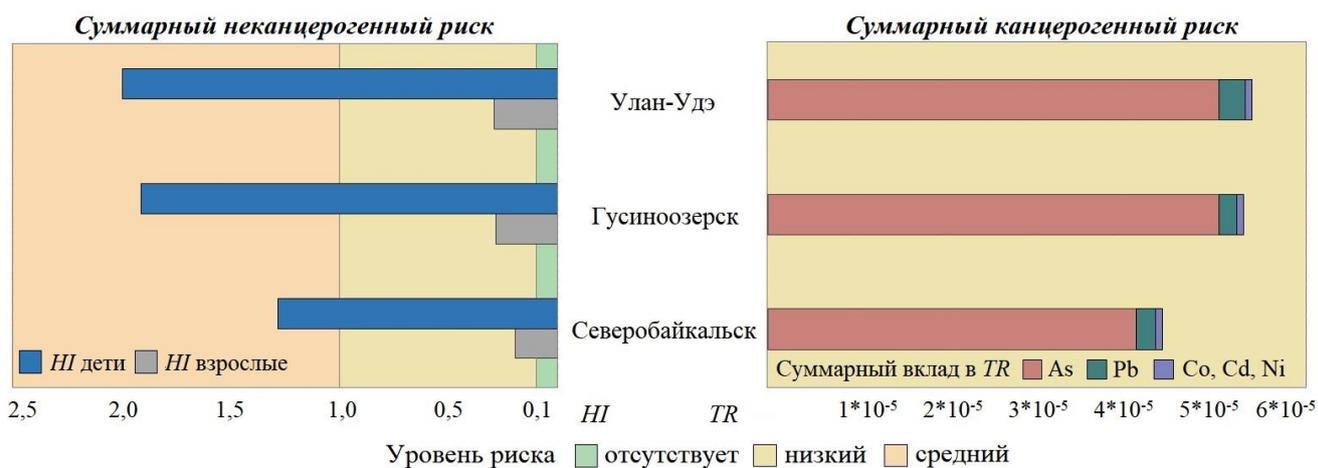


Рисунок 11. Суммарный неканцерогенный ( $HI$ ) и канцерогенный ( $TR$ ) экологический риск для здоровья населения Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска

Впервые изучено пространственное распределение уровней канцерогенного риска в почвах Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска (рис. 12). На большей части территории трех городов установлены низкие уровни риска. В Улан-Удэ значения  $TR$  возрастают до среднего уровня ( $> 1 \cdot 10^{-4}$ ) вблизи стихийных свалок бытовых отходов в жилой зоне, в промзоне ТЭЦ-1 и вблизи железнодорожных путей. В Гусиноозерске наиболее высокие значения  $TR$  также связаны с влиянием несанкционированных свалок отходов в частном секторе и в зоне пустырей, вблизи углесодержащего отвала вскрышных пород на юге города. В Северобайкальске средний суммарный уровень канцерогенного риска выявлен вблизи ЗШО ТЭЦ-1 и

локомотивного депо, на значительной части территории города значения  $TR$  ниже по сравнению с Улан-Удэ и Гусиноозерском.

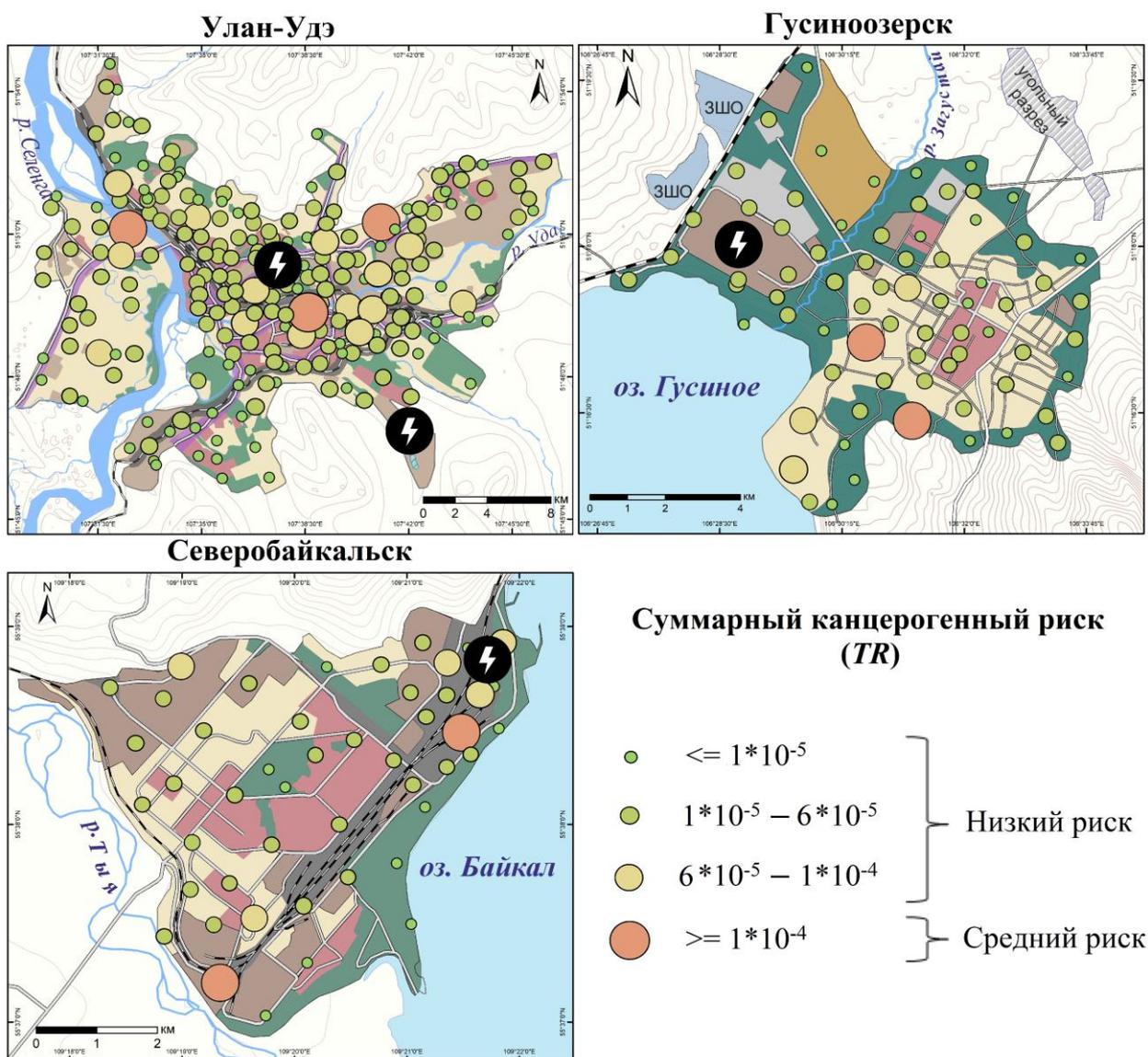


Рисунок 12. Пространственное распределение суммарного канцерогенного риска ( $TR$ ) от ТММ в почвах Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В Улан-Удэ наблюдается значительное загрязнение почв ТММ, что связано с интенсивным воздействием ТЭЦ, промышленности и транспорта. В отличие от малых городов Гусиноозерска и Северобайкальска, где загрязнение менее выражено, в Улан-Удэ образовались обширные зоны с высоким и максимальным уровнем загрязнения, особенно в центральной части города, где сосредоточены основные источники выбросов. Суммарное загрязнение городских почв (средний  $Z_c = 18$ ) формируется при наибольшем вкладе Cd, Pb, Zn, Cu, Sb, которое увеличивается до высокого уровня ( $Z_c = 38$ ) в частицах  $PM_{10}$ .
2. Большинство ТММ (Co, Sr, Sb, Zn, Cd, Cu, Mo) в почвах Улан-Удэ и Северобайкальска накапливается на биогеохимическом органо-минеральном

барьере при увеличении содержания органического вещества, а в Гусиноозерске (Co, Ni, V, Cr, W, Sb) – на хемосорбционном барьере с участием оксидов Fe. Функциональное назначение территории оказывает наибольшее влияние на аккумуляцию почти всех ТММ в Гусиноозерске и около половины изученных ТММ в Северобайкальске, в то время как в Улан-Удэ только содержание W зависит от вида использования территории.

3. Интенсивность промышленной и транспортной нагрузки оказывает прямое воздействие на уровень аккумуляции и характер распределения ТММ между фракциями почв и дорожной пыли. Улан-Удэ, как крупный промышленный центр, отличается наиболее высоким уровнем накопления ТММ в мелкодисперсной фракции  $PM_{10}$  с большей аккумуляцией ТММ в  $PM_{10}$  дорожной пыли по сравнению с почвами. В Гусиноозерске и Северобайкальске, где антропогенная нагрузка меньше, накопление ТММ в  $PM_{10}$  почв менее выражено, с более равномерным распределением элементов между фракциями.

4. Впервые с помощью рецепторной модели PMF определены основные источники ТММ в почвах Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска и рассчитан их количественный вклад. Дополнение результатов PMF пространственным анализом вкладов факторов обеспечило высокую достоверность идентификации источников и позволило определить наиболее проблемные места в городах с максимальными выбросами из того или иного вида источников. Приоритетным источником ТММ в почвах и фракции  $PM_{10}$  трех городов является сжигание угля на ТЭС и при печном отоплении, что объясняет 28-37% общей дисперсии ТММ. В Улан-Удэ источники загрязнения наиболее разнообразны и многочисленны, значительный вклад вносят выбросы авто- и железнодорожного транспорта, предприятий машиностроения и металлообработки. В Гусиноозерске влияние сжигания угля дополняется факторами, связанными с пылением угля и золошлаковых отвалов, а также выбросами автотранспорта, в Северобайкальске – факторами авто- и железнодорожного транспорта.

5. Оценка рисков для здоровья человека с использованием модели NHRA показала, что основной путь воздействия ТММ на взрослых и детей Улан-Удэ, Гусиноозерска и Северобайкальска – кожный контакт, при этом риск для детей выше из-за их физиологических и поведенческих особенностей. Неканцерогенный риск для детей в трех городах достигает среднего уровня с наибольшими значениями  $HI = 1,99$  в Улан-Удэ. Канцерогенный риск для населения всех городов остается на низком уровне, наибольший вклад в его формирование вносит мышьяк As. Наибольшие уровни риска наблюдаются вблизи промышленных зон, стихийных свалок и транспортных узлов, что подчеркивает необходимость усиления мер по снижению загрязнения почв и защиты здоровья населения в зонах с высокой геохимической нагрузкой.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Sycheva D.G.**, Kosheleva N.E. Accumulation of metals and metalloids in soil cover, road dust, and their PM10 fraction in Ulan-Ude: Spatial variation and source apportionment // *Applied Soil Ecology*. 2025. Vol. 205. P. 105769. (JCI 1.17; 2,274 п.л.; вклад автора 70%)
2. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Источники, уровни накопления и экологическая опасность тяжелых металлов и металлоидов в почвах и фракции PM10 г. Северобайкальска // *Известия Томского политехнического университета*. 2024. Т. 335. №. 3. С. 137-153. (SJR 0.28; 1,799 п.л.; вклад автора 65%)
3. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Эколого-геохимическое состояние почвенного покрова г. Гусиноозерска в зоне влияния угольной ГРЭС // *Почвоведение*. 2023. №. 8. С. 953-969. (Импакт-фактор РИНЦ 2.96; 1,360 п.л.; вклад автора 65%)  
**Sycheva D.G.**, Kosheleva N.E. Ecological and geochemical state of the soil cover of Gusinoozersk in the impact zone of coal thermal power plant // *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. No. 8. P. 1114-1129. (JCI 0.3; 1,360 п.л.; вклад автора 65%)
4. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Тимофеев И.В. Загрязнение почвенного покрова соединениями металлов, мышьяка и сурьмы в районе воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 2. С. 48-55. (SJR 0.26; 0,707 п.л.; вклад автора 60%)
5. Kosheleva N.E., Efimova L.E., Efimov V.A, **Sycheva D.G.** Potentially toxic elements in the Gusinoye Lake (Republic of Buryatia, Russia) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. P. 1-16. (SJR 1.01; 1,639 п.л.; вклад автора 20%)

### Иные публикации автора по теме диссертации

1. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Накопление металлов и металлоидов в почвах и их фракции PM10 в г. Улан-Удэ // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2024. Т. 11, № 1. С. 3–10. (Импакт-фактор РИНЦ 0.35; 0,571 п.л.; вклад автора 80%)
2. **Сычева Д.Г.** Определение источников загрязнения и их вклада в накопление металлов и металлоидов в почвенном покрове г. Улан-Удэ // *Проблемы экоинформатики. Сборник докладов XVI Международного симпозиума Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер. Научные Международные симпозиумы "Проблемы экоинформатики"*. Издательство Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Москва, 2024. С. 224–229. (Импакт-фактор отсутствует; 0,356 п.л.; вклад автора 100%)
3. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Уровни накопления и источники потенциально токсичных элементов в почвах и их фракции PM10 г. Северобайкальска // *Проблемы экоинформатики. Сборник докладов XV Международного симпозиума Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер. Научные Международные симпозиумы "Проблемы*

экоинформатики". Издательство Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Москва, 2022. С. 184–188. (Импакт-фактор отсутствует; 0,359 п.л.; вклад автора 80%)

4. **Сычева Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Влияние топливно-энергетического комплекса на накопление тяжелых металлов в почвах и их фракции РМ10 г. Гусиноозерска (Бурятия) // Охрана окружающей среды – основа безопасности страны. Сборник статей по материалам Международной научной экологической конференции, посвященной 100-летию КубГАУ. Издательство КубГАУ, Краснодар, 2022. С. 453–456. (Импакт-фактор отсутствует; 0,311 п.л.; вклад автора 70%)

5. **Лычкова Д.Г.**, Кошелева Н.Е., Ефимов В.А., Ефимова Л.Е. Аккумуляция потенциально токсичных элементов в компонентах ландшафтов г. Гусиноозерска (Республика Бурятия) // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ИГУ и Дню Байкала. Издательство ИГУ, Иркутск, 2021. С. 294–298. (Импакт-фактор отсутствует; 0,381 п.л.; вклад автора 50%)

6. **Лычкова Д.Г.**, Кошелева Н.Е. Тяжелые металлы и металлоиды в донных отложениях Гусино озера (Республика Бурятия) // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института. Часть 2. Издательство ФБГУ Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, 2020. С. 160–165. (Импакт-фактор отсутствует; 0,321 п.л.; вклад автора 50%)

7. **Лычкова Д.Г.**, Кошелева Н.Е., Накопление тяжелых металлов и металлоидов в почвенном покрове г. Гусиноозерска (Республика Бурятия) // Проблемы экоинформатики. Сборник докладов XIV Международного симпозиума Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер. Научные Международные симпозиумы "Проблемы экоинформатики". Издательство Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Москва, 2020. С. 252–257. (Импакт-фактор отсутствует; 0,326 п.л.; вклад автора 70%)

8. Efimov V., Kosheleva N.E., Lukyanova A.N., **Lychkova D.G.**, Efimova L.E. Main features of chemical composition of waters of lake Gusinoe in summer period // Proceedings of XIII International virtual conf. "Environment and sustainable development of the Mongolian plateau and surrounding territories". Publishing house Mongolian Academy of Sciences, Ulaan-Baatar, 2020. P. 42–47. (Импакт-фактор отсутствует; 0,313 п.л.; вклад автора 35%)

9. **Lychkova D.G.**, Kosheleva N.E. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of the city of Gusinoozersk (Republic of Buryatia) // Proceedings of XIII International virtual conf. "Environment and sustainable development of the Mongolian plateau and surrounding territories". Publishing house Mongolian Academy of Sciences, Ulaan-Baatar, 2020. P. 61–65. (Импакт-фактор отсутствует; 0,303 п.л.; вклад автора 65%)