

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Гончаров Гавриил Александрович

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИИ Г. УФА ПО
ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ И ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ БАЛЬЗАМИЧЕСКОГО
(*POPULUS BALSAMIFERA* L., 1753)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21 – Геоэкология

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный
руководитель:**

Соктоев Булат Ринчинович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент
отделения геологии Инженерной школы природных
ресурсов

**Официальные
оппоненты:**

Сысо Александр Иванович

доктор биологических наук, Институт почвоведения и
агрохимии Сибирского отделения Российской академии
наук (г. Новосибирск), заведующий лабораторией
биогеохимии почв

Белан Лариса Николаевна

доктор геолого-минералогических наук, «Уфимский
университет науки и технологий» (г. Уфа), директор
Международного научно-образовательного центра
«Кафедра ЮНЕСКО «Геопарки и территории устойчивого
развития»

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода

Автореферат разослан «__» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.29
д.б.н., профессор

A stylized handwritten signature in blue ink, belonging to N.V. Baranovskaya.

Н.В. Барановская

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Урбанизация и индустриализация приводят к трансформации компонентов природной среды, что обостряет геоэкологические риски для отдельных регионов и оказывает значительное влияние на здоровье населения (Алексеев, 2000; Волкова, 1987; Саев, 1990; Глазовская, 1972, 1997, 2007; Обухов, 1980). В связи с этим возрастает значимость мониторинга состояния компонентов природной среды в пределах урбанизированных территорий (Касимов, 1995).

С учётом нарастающего антропогенного воздействия изучение геохимического состояния урбанизированных территорий стало предметом научного интереса ещё во второй половине XX века. В 1976 году в ИМГРЭ под руководством Ю.Е. Саева были начаты первые масштабные геохимические исследования городской среды, основанные на методах поисковой геохимии. Эти подходы впоследствии применялись для экологической оценки и картографирования загрязнения в различных городах страны (Битюкова, 2011). Сегодня активно развивается экогеохимия городских ландшафтов – направление, сочетающее системный анализ миграции химических элементов в природных и техногенных ландшафтах с методами геохимической индикации окружающей среды (Хомич, 2004; Вольфсон, 2024). Практическая реализация экогеохимического подхода базируется на использовании природных индикаторов, в первую очередь почв и растительности, обеспечивающих многомерную оценку состояния окружающей среды (Касимов, 2013).

Совместное использование почвенного покрова и растительности (древесной, травянистой, кустарниковой) в эколого-геохимических исследованиях обеспечивает более полную и надёжную оценку состояния городской среды. Благодаря различной продолжительности накопления загрязняющих веществ (многолетней – для почв и сезонной – для растительности), эти компоненты окружающей среды дополняют друг друга по временному охвату и путям поступления: почвы отражают интегральное накопление загрязняющих веществ и позволяют реконструировать долговременные геохимические изменения (Глазовская, 1987; Алексеев, 2000), а растительность – динамическую и оперативную (Markert, 1993; Барановская, 2011; Юсупов, 2021). Таким образом, их комплексное использование позволяет выявить как устойчивые геохимические аномалии, связанные со стационарными источниками загрязнения, так и краткосрочное воздействие, как из атмосферы (первичное загрязнение), так и из почвы (вторичное загрязнение).

Одним из примеров крупного промышленного центра с многопрофильной специализацией является город Уфа – один из крупнейших индустриальных центров Башкортостана и Поволжья, где в пределах городской черты сосредоточены предприятия нефтепереработки и нефтехимии (Башнефть-Уфанефтехим, Башнефть-УНПЗ, Башнефть-Новыйл, Уфаоргсинтез), машиностроения и металлообработки (Уфимское моторостроительное производственное объединение, Уфимкабель), деревообрабатывающей (Кроношпан), электронной и теплоэнергетической промышленности. К числу наиболее значимых источников техногенной нагрузки

также относятся объекты транспортной и коммунальной инфраструктуры. В условиях комплексного воздействия широкого спектра загрязняющих веществ на компоненты природной среды эколого-геохимические исследования приобретают особую актуальность. Однако, комплексные экогеохимические исследования на территории Уфы носят фрагментарный характер и нуждаются в углублённом системном подходе (Шамсутдинова, 2010; Галеева, 2014, 2015; Абдулина, 2015; Курамшин, 2015; Минигазимов, 2019;).

Поэтому применение комплексного подхода к оценке состояния урбоэкосистемы с использованием компонентов окружающей среды, способных отражать поликомпонентное и многофакторное воздействие, позволит оценить степень влияния промышленных объектов и прогнозировать потенциальные следствия, в том числе токсическое воздействие на человека и экосистемы.

Цель работы: эколого-геохимическая оценка состояния территории города Уфа на основе анализа элементного состава почв и листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L., 1753).

Задачи исследований:

1. выявить геохимические особенности исследуемых компонентов природной среды;
2. оценить пространственное распределение приоритетных химических элементов и определить вероятные источники их поступления в окружающую среду;
3. исследовать морфологию и структуру минеральных фаз в почве и на поверхности листьев;
4. определить особенности пространственного распределения магнитной восприимчивости почв и установить взаимосвязь между петромагнитными характеристиками, морфологией фаз и химическим составом для оценки степени техногенного воздействия;
5. оценить канцерогенный и неканцерогенный риск для здоровья населения от воздействия химических элементов на основе данных элементного состава почв.

Фактический материал и методы исследования. Основой диссертационной работы являются параллельные пробы почв и листьев тополя (всего – 212 проб), отобранные на территории г. Уфа. Отбор, подготовка проб и обработка данных выполнены лично автором в соответствии с действующими нормативными документами.

Элементный состав проб почв и листьев тополя определен комплексом современных аналитических методов: инструментальный нейтронно-активационный анализ на 28 химических элементов (ИНАА, аналитики – А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская, Международный инновационный научно-образовательный центр (МИНОЦ) «Урановая геология» им. Л.П. Рихванова ТПУ), атомно-абсорбционная спектрометрия на Hg (ААС, консультанты – к.х.н. Н.А. Осипова, к.г.-м.н. Е.Е. Ляпина, МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА, аналитик – к.т.н. Б.Ж. Жалсараев, ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ)). Морфология, структура и элементный состав

частиц в составе почв и на поверхности листьев тополя изучены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, консультант – к.г.-м.н. С.С. Ильенко, МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ). Магнитная восприимчивость почв определена методом каппаметрии (МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ), магнитометрии и коэрцитивной спектрометрии (аналитик – к.г.-м.н. Д.М. Кузина, НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма, Казанский федеральный университет).

Защищаемые положения:

1. Содержание Cr, Ni, Cu, Ca, Co, Pb, V, Zn, Y, S и Tb в почвах на территории г. Уфа превышает средние значения для урбанизированных территорий от 1,5 до 9 раз, что обусловлено влиянием природно-техногенных факторов. В северной части города формируется опасный уровень загрязнения (32-128 ед.) под влиянием промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики.
2. Промышленная специализация предприятий на территории г. Уфа проявляется в величине магнитной восприимчивости почв и в соотношении ферромагнитной, диа-/парамагнитной и суперпарамагнитной компонент.
3. Специфика листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L., 1753) на территории г. Уфа заключается в аккумуляции Co, Zn, Sc, Ca, Sr, Ta, Fe и Br. Влияние промышленных предприятий проявляется в элементном составе листьев и частицах на их поверхности: фосфаты легких редкоземельных элементов приурочены к районам расположения предприятий нефтепереработки и нефтехимии; самородные частицы W и Ti, а также интерметаллические сплавы тяжелых металлов (Ni, Co, Cr, Ti) – к предприятиям машиностроения и металлообработки.
4. Северная часть города, как зона влияния предприятий теплоэнергетики, нефтепереработки и нефтехимии, машиностроения и металлообработки, характеризуется умеренным экологическим риском. Cr и As является приоритетными элементами в формировании как неканцерогенного, так и канцерогенного показателя опасности.

Научная новизна.

- Впервые дана эколого-геохимическая оценка территории города Уфа по данным изучения почв и листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Комплекс показателей (элементный состав, магнитная восприимчивость и минерально-вещественный состав) позволил выявить особенности пространственного распределения химических элементов и тенденции изменения их содержания в зависимости от локализации потенциальных техногенных источников.

- Для территории города Уфы получены значения магнитной восприимчивости почв в пределах селитебной и промышленной зон, отражающие уровень техногенного воздействия промышленных предприятий. Установлены соотношения вкладов ферромагнитной, диа-/парамагнитной и суперпарамагнитной компонент в общее значение магнитной восприимчивости, что расширяет представления о природе и происхождении магнитно-активных частиц в условиях урбанизированной среды.

- Установлена геохимическая специфика листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), произрастающего на территории г. Уфы, на основе комплекса биогеохимических показателей. СЭМ исследование поверхности листьев позволило идентифицировать пути поступления элементов и выявить доминирующие механизмы их аккумуляции.

- Оценка канцерогенного и неканцерогенного риска позволила выделить участки с потенциально опасным уровнем воздействия на здоровье населения, при этом максимальный вклад связан с хромом и мышьяком.

Практическая значимость. Полученные данные о содержании 28 элементов в листьях и 39 - в почвах предлагается использовать в качестве регионального геохимического фона при последующих исследованиях и мониторинге урбанизированных территорий. Разработан картографический комплекс для территории г. Уфы, отражающий пространственное распределение химических элементов в почвах и листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.). Выполненное экологическое районирование позволило выделить районы с различным уровнем антропогенной нагрузки и потенциальными рисками для здоровья населения. Оценка канцерогенного и неканцерогенного риска дополняет картину экологической обстановки и может служить основанием для профилактических мер. Материалы диссертации могут быть использованы Министерством экологии и природопользования Республики Башкортостан, отделами городского планирования и санитарного надзора для мониторинга зон техногенного воздействия и принятия управленческих решений. Кроме того, результаты исследования используются в образовательном процессе при подготовке специалистов в области экологии, геохимии и охраны окружающей среды.

Личный вклад. Автор принимал участие на всех этапах работы (планирование, организация и выполнение), в том числе отбор и подготовка проб почв и листьев тополя на базе МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ. Автором лично проведена статистическая обработка и интерпретация полученных данных на основе эколого-геохимических показателей, самостоятельно сформулированы цель, задачи и основные положения исследования, подготовлен текст диссертации в соответствии с планом, согласованным с научным руководителем.

Достоверность защищаемых положений обеспечена статистически значимым количеством проб, применением современных аттестованных аналитических методов в аккредитованных лабораториях. Для оценки качества аналитических данных проводился внутренний и внешний контроль, который показал удовлетворительную сходимость. Достоверность полученных результатов обеспечена глубиной проработки фактического материала и анализа литературы по теме диссертации.

Апробация работы и публикации. Результаты работы по теме диссертации представлены на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях: «Экология России и сопредельных территорий» (г. Новосибирск, 2021 г.), «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2022-2025 гг.), «Современные проблемы геохимии» (г. Иркутск, 2023 г.), «Геохимические методы поисков как

инструмент обнаружения прямых признаков месторождений стратегических видов минерального сырья» (г. Москва, 2023 г.), Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике (г. Улан-Удэ, 2024 г.), «Актуальные проблемы экологической геохимии» (г. Москва, 2024 г.), «Проблемы геохимической экологии в условиях техногенеза биосферы» (г. Томск, 2025 г.).

Основное содержание и материалы по защищаемым положениям изложены в 13 статьях и тезисах докладов, в том числе 3 статьи в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010).

Структура и объем работы. Диссертация объемом 145 страниц состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 234 источников. Работа содержит 55 рисунков и 18 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы и проведенных исследований, определены цель и задачи исследования, изложены основные результаты, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обозначен личный вклад автора и апробация работы. **Глава 1** посвящена урбанизации как одному из ключевых факторов, усиливающих антропогенное воздействие на компоненты окружающей среды. **Глава 2** содержит сведения о геоэкологической характеристике территории г. Уфа, включая природные и антропогенные условия, формирующие современное состояние окружающей среды. **Глава 3** посвящена методике исследования (отбор и подготовка проб, лабораторно-аналитические методы, обработка данных). **В главе 4** изложены результаты эколого-геохимической оценки почв. **Глава 5** посвящена анализу данных элементного состава золы листьев тополя и частиц на поверхности листьев. **В главе 6** обосновано применение магнитной восприимчивости почв как индикатора техногенного загрязнения. **В главе 7** приведены данные по оценке неканцерогенного и канцерогенного риска для здоровья населения от химических элементов. **В заключении** представлены основные выводы и рекомендации.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, к.г.-м.н., доценту отделения геологии Б.Р. Соктоеву за неоценимую помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертационного исследования, за профессиональные советы, внимательное руководство и постоянное содействие при выполнении работы.

Искренняя благодарность адресуется профессорам отделения геологии ИШПР, д.г.-м.н. Е.Г. Язикову, С.И. Арбузову, А.В. Таловской и д.б.н. Н.В. Барановской, за ценные советы и замечания при обсуждении результатов. Отдельную признательность автор выражает сотрудникам Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета к.г.-м.н. Д.М. Кузиной и к.г.-м.н. А.Р. Юсуповой, а также сотруднику ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН к.т.н. Б.Ж. Жалсараеву за проведение аналитических исследований. Автор благодарен за содействие в проведении лабораторных исследований в МИНОЦ «Урановая геология» преподавательскому составу

отделения геологии ТПУ: старшему преподавателю, к.г.-м.н. С.С. Ильенку – при работе на электронном сканирующем микроскопе, доценту, к.х.н. Н.А. Осиповой и к.г.-м.н. Е.Е. Ляпиной – на атомно-абсорбционном спектрометре. Также выражается признательность аналитикам ядерно-геохимической лаборатории ТПУ А.Ф. Судыко и Л.В. Богутской за проведение исследований химического состава проб.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW–2023–0010)

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Положение 1. *Содержание Cr, Ni, Cu, Ca, Co, Pb, V, Zn, Y, S и Tb в почвах на территории г. Уфа превышает средние значения для урбанизированных территорий от 1,5 до 9 раз, что обусловлено влиянием природно-техногенных факторов. В северной части города формируется опасный уровень загрязнения (32-128 ед.) под влиянием промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики.*

Доказательная база данного положения обсуждается в главе 4.

По данным сравнительного анализа содержания 39 химических элементов в

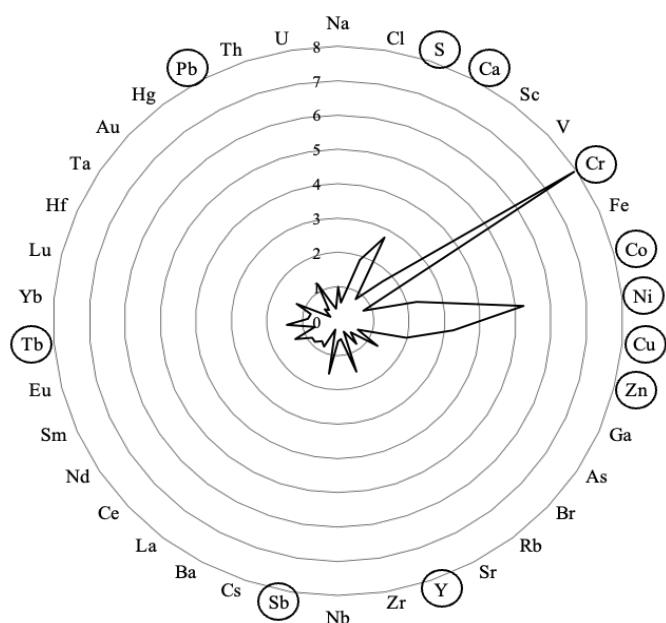
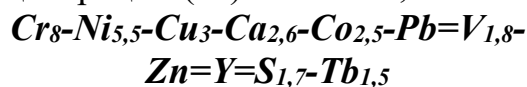


Рис. 1. *Геохимическая специализация почв на территории г. Уфа относительно литературных данных (Kabata-Pendias, 2011; Алексеенко, Алексеенко, 2013)*

почвах города Уфы относительно среднемировых значений для урбанизированных территорий (Kabata-Pendias, 2011; Алексеенко, Алексеенко, 2013) (рис. 1) построен геохимический ряд приоритетных химических элементов с коэффициентом концентрации (K_c) больше 1,5:



Расчёт индекса геоаккумуляции (I_{geo}) и коэффициента обогащения (EF) позволил количественно оценить уровень антропогенного влияния на почвы и установить вклад элементов (по убыванию):



Полученный ряд в целом соответствует геохимическому ряду: исключение составляет Pb, для которого

установлена высокая пространственная неоднородность.

Спектр приоритетных химических элементов обусловлен влиянием природных и антропогенных факторов, а также их сочетанным эффектом.

Так, присутствие Са обусловлено природно-литологическими особенностями территории расположения города (карбонаты, сульфаты): максимальные содержания выявлены в южной части города, что хорошо согласуется с данными о распространении закарстованных участков (Абдрахманов, 2016).

Для S (рис. 2 а) установлен смешанный характер генезиса, связанный с природными процессами (выветривание сульфатных пород) и техногенными источниками (объекты топливно-энергетического комплекса и нефтепереработки/нефтехимии). Содержание S в углеводородном сырье Волго-Уральского нефтегазоносной провинции (НГП) достигает 1,5-3,5 % (высокосернистые), что обуславливает значительные выбросы S-содержащих соединений при переработке и сжигании и формирование ореолов максимальных концентраций S вокруг НПЗ в северной части города. Исходное углеводородное сырье (нефти Волго-Уральской НГП) также является источником повышенных содержаний V, Ni (рис. 2 б) и Co в почвах прилегающих территорий (рис. 2): нефти относятся к ванадиевому типу с высоким $V/Ni=5,81$ (Пуланова, 2017; Яценко, 2012).

Согласно анализу пространственного распределения вблизи производственных цехов ПАО «ОДК-УМПО» в Калининском районе зафиксированы устойчивые ореолы повышенных концентраций Cr (рис. 2 в), Co, Zn и Sb. Эти элементы формируют локальные аномалии, отражающие техногенное воздействие отрасли машиностроения и металлообработки на почвы. При этом для Sb характерны $K_c > 2$ только в районах, прилегающих к железнодорожной станции Дёма и предприятиям машиностроения и металлообработки, что подчёркивает её специфическую пространственную приуроченность к зонам с наибольшей техногенной нагрузкой.

Развитая транспортная инфраструктура также вносит значительный вклад в формирование ореолов повышенных концентраций ряда химических элементов в почвах города Уфы. Районы с интенсивным автомобильным (южная селитебная часть города) и железнодорожным (микрорайон Дёма) движением, включая перегрузочные станции и крупные автомобильные развязки, характеризуются накоплением Cr (рис. 2 в), Ni (рис. 2 б), Cu, Pb, S (рис. 2 а), Sb, Zn, As. С увеличением расстояния от источника наблюдается закономерное снижение содержаний, отражающее градиент техногенного воздействия.

Анализ суммарного показателя загрязнения (средний $Z_c=28$) (рис. 2 г) показал, что в целом территория города соответствует среднему уровню загрязнения. Минимальные значения ($Z_c=14$) установлены в районах с относительно благополучной экологической обстановкой (Кировский, Советский, Октябрьский районы, микрорайоны Шакша и Затон). В то же время высокий уровень загрязнения ($Z_c > 32$) фиксируется в северной части города вокруг промышленных объектов Калининского и Орджоникидзевского районов, а также в микрорайоне Дёма. Основной вклад (более 60 %) в формирование Z_c вносят Cr, Ni и Cu, что указывает на выраженный техногенный характер загрязнения и обуславливает необходимость дальнейшего экологического контроля в наиболее уязвимых зонах, наличие которых

подтверждается фиксированием превышений ПДК и ОДК по ряду приоритетных элементов, включая S, Ni, Zn, Pb и As.

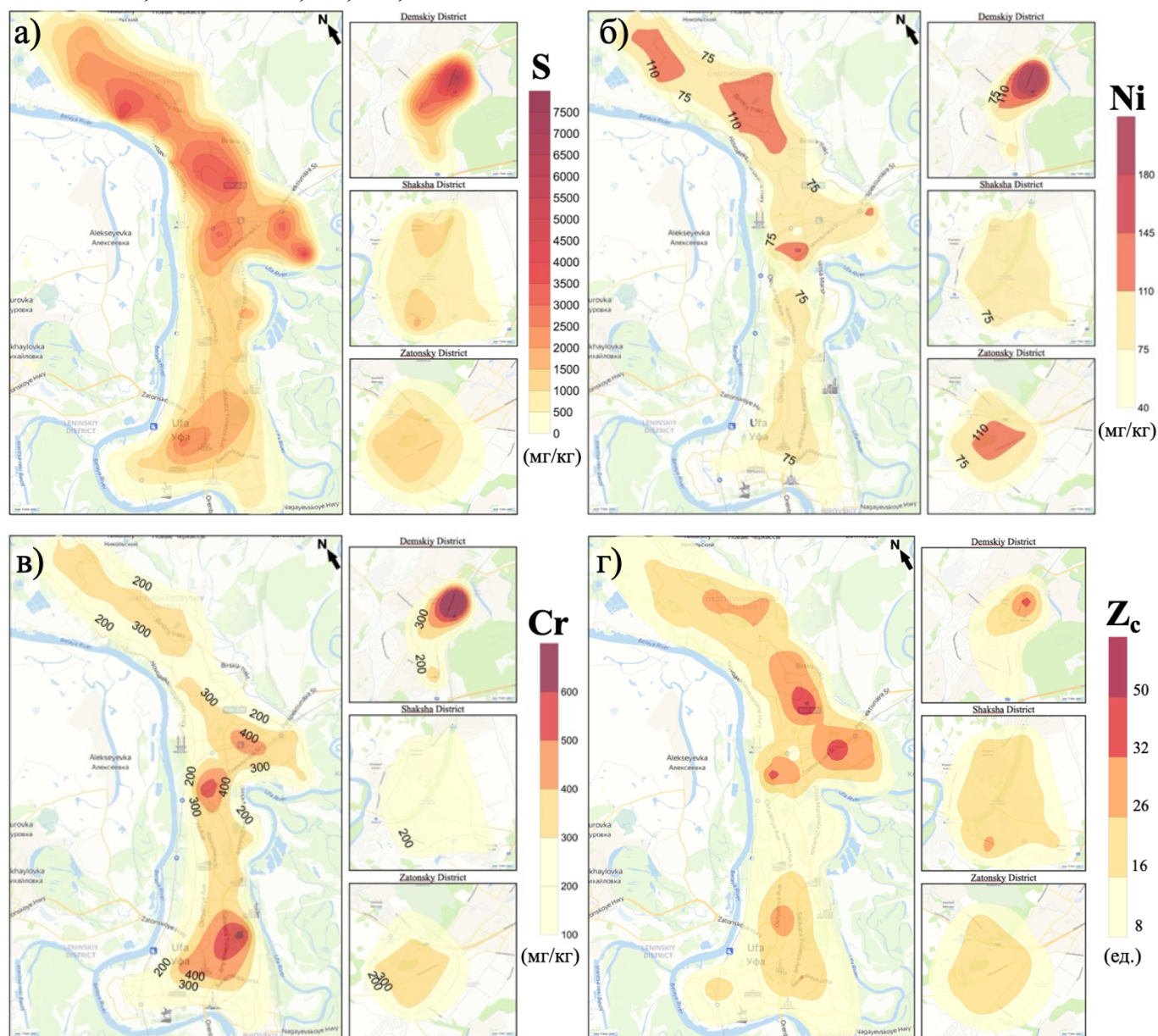


Рис. 2. Пространственное распределения ряда приоритетных химических элементов и Z_c в почве на территории г. Уфа

Положение 2. Промышленная специализация предприятий на территории г. Уфа проявляется в величине магнитной восприимчивости почв и в соотношении ферромагнитной, диа-/парамагнитной и суперпарамагнитной компонент.

Доказательная база данного положения обсуждается в главе 6.

Анализ параметра магнитной восприимчивости (МВ) почв (среднее – $112 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) на территории города показал широкую вариативность: диапазон значений – от 68 до $1090 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. При этом диапазон значений без экстремальных значений (5-95

процентиль) составил от 73 до $198 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Пространственное распределение МВ (рис. 3 а) хорошо согласуется с Z_c как для почв (рис. 2), так и для листьев тополя. Ореолы максимальных значений МВ приурочены к районам функционирования основных промышленных предприятий города. Минимальные значения зафиксированы в микрорайонах Шакша и Затон, за исключением участка вблизи трассы М7. Максимальные значения МВ установлены в районе железнодорожной станции Дёма ($1090 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и промышленных зон в северной части города – у цехов № 1 и 2 ПАО «ОДК-УМПО» (197 и $180 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, соответственно), Уфимского НПЗ ($223 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) и НПЗ «Уфанефтехим» ($199 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Повышенные уровни МВ также отмечаются на участках, приуроченных к транспортным развязкам. Полученные результаты указывают на комплексное поступление веществ, формирующих МВ – как долговременное (накопление в почве), так и сезонное (сухое и мокрое осаждение из атмосферного воздуха).

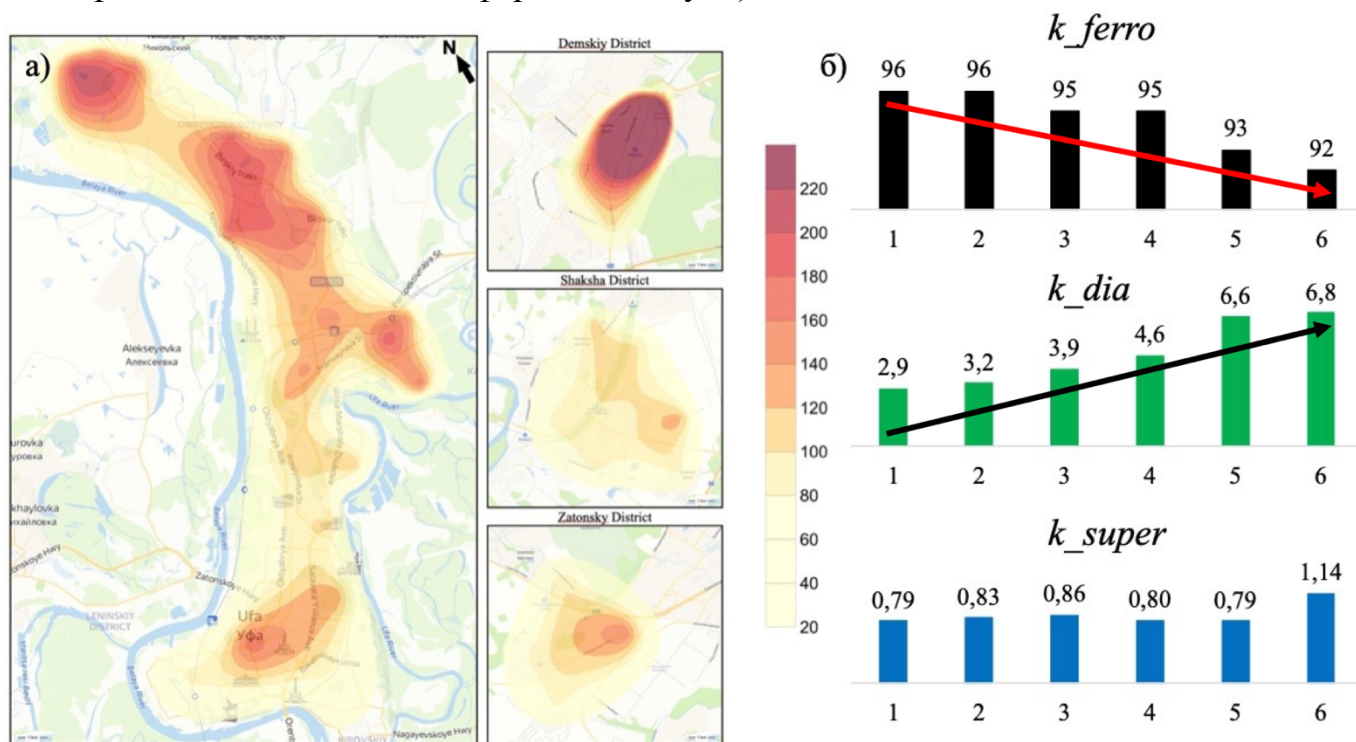


Рис. 3. Магнитная восприимчивость почв на территории г. Уфа

Примечание: а – пространственное распределение, б – процентное соотношение составных компонент (k_{ferro} , k_{dia} , k_{super}), цифрами обозначены: 1 – нефтехимия/ТЭК, 2 – железнодорожная станция, 3 – металлообработка/моторостроение, 4 – селитебная территория, 5 – микр. Затон, 6 – микр. Шакша.

Кроме того, установлен вклад составных компонент в показатель МВ: ферромагнитная (k_{ferro}) – $88,3 \pm 17,9$, диа-/парамагнитная (k_{dia}) – $4,1 \pm 0,19$, суперпарамагнитная (k_{super}) – $0,9 \pm 0,08 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$. Соотношение составных компонент магнитной восприимчивости также может рассматриваться в качестве

индикаторного показателя техногенной нагрузки. Районы с повышенными значениями Z_c характеризуются доминированием ферромагнитной составляющей (k_{ferro}) в общем магнитном сигнале, что связано с поступлением в почву техногенных ферромагнитных частиц, образующихся в результате деятельности металлургических, транспортных и топливно-энергетических предприятий. В противоположность этому, наименее загрязнённые участки демонстрируют относительное преобладание диамагнитной составляющей (k_{dia}), отражающей природный минеральный состав почв и минимальное влияние антропогенных факторов. Таким образом, магнитный сигнал почв может быть не только количественным индикатором загрязнения, но и качественным маркером различий в происхождении и типе магнитных носителей, коррелирующих с уровнем техногенной нагрузки (рис. 3 б).

Между элементным составом и МВ почв установлена значимая положительная связь с Cr, Cu, Ni, Co, S и Pb. Данные химические элементы характеризуются высоким показателем технофильности и пространственно приурочены к районам расположения промышленных объектов. Кроме МВ, значимая корреляция с данными химическими элементами установлена для ферромагнитной и суперпарамагнитной компонент, что связано с их поступлением в окружающую среду от предприятий машиностроения и металлообработки, нефтехимии и нефтепереработки, топливно-энергетического комплекса и вкладом в формирование петромагнитных свойств почвы.

Результаты изучения магнитной фракции почв методом СЭМ выявили наличие техногенных частиц, условно разделенных на четыре группы: 1) самородные металлы, 2) оксиды Fe, 3) интерметаллические сплавы, 4) сульфат Ba с примесями тяжёлых металлов (рис. 4). В зоне влияния УМПО выявлены самородные частицы W и Fe размером 20-30 мкм, что указывает на их промышленное происхождение. В районе расположения НПЗ зафиксированы оксиды Fe сферической и неправильной формы, характерные для высокотемпературных процессов. В южной части города, рядом с крупными транспортными узлами, установлены частицы сплавов Fe-Cr (до 160 мкм). Вблизи железнодорожной станции Дёма выявлены схожие частицы, а также магнетит с включением барита.

Анализ гистерезисных параметров на диаграмме Дзя–Данлопа (рис. 5), отражающей петромагнитные свойства почвенных образцов, показывает, что все пробы располагаются в области, соответствующей псевдооднодоменной (PSD) и смешанной структуре магнитных частиц. Это свидетельствует о преобладании магнитных зерен промежуточного размера, находящихся между однодоменными (SD) и многодоменными (MD) состояниями. Такие зерна демонстрируют комплексное магнитное поведение, сочетающее в себе характеристики как стабильных, так и нестабильных магнитных доменов, что типично для природных образцов, подвергшихся техногенному воздействию.

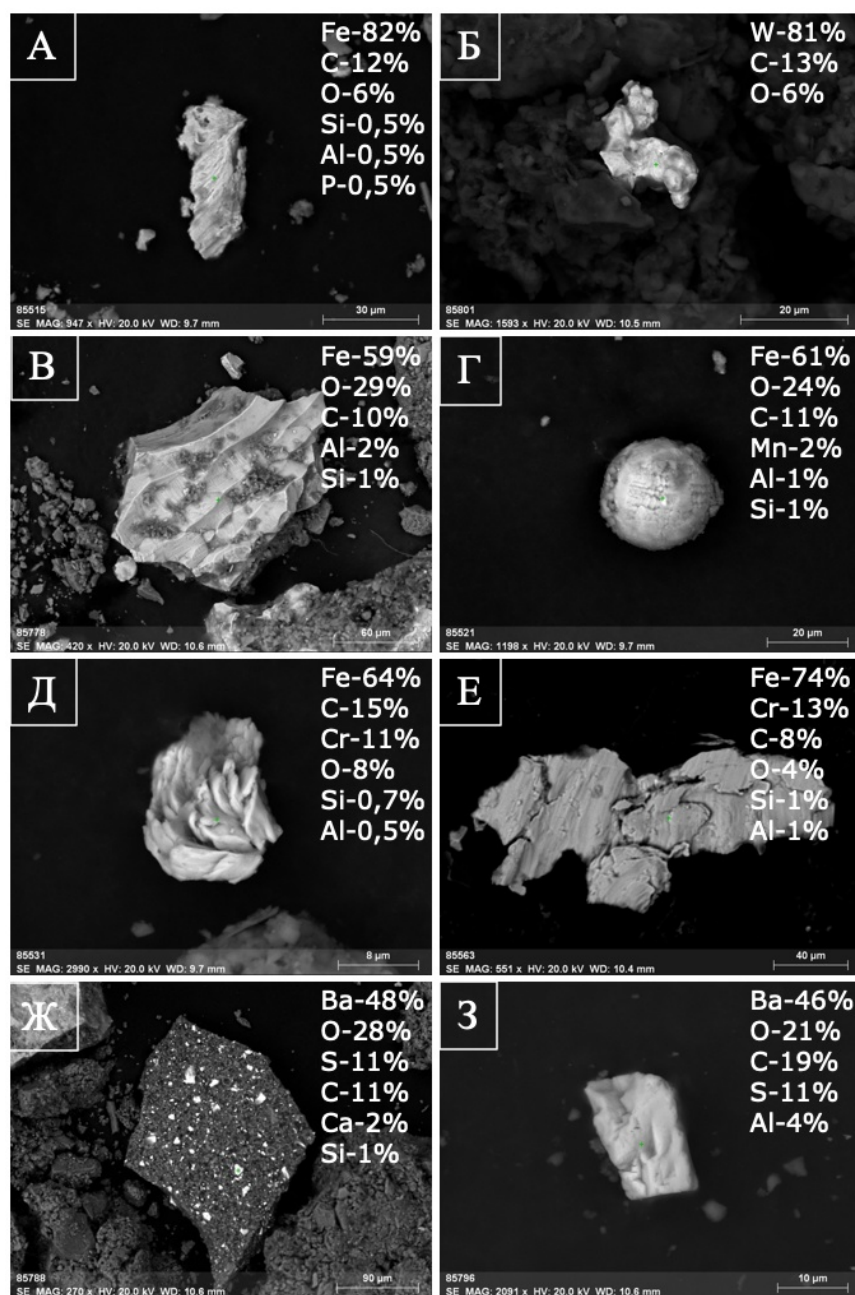


Рис. 4. Микроминеральные фазы в составе магнитной фракции почв промышленных зон г. Уфы

Примечание: А, Б – машиностроение и металлообработка; В, Г – нефтепереработка и нефтехимия; Д, Е – транспортные автомобильные узлы, Ж, З – транспортный железнодорожный узел

При этом для образцов с техногенно нагруженных участков (НПЗ, УМПО, транспортные узлы) характерна бóльшая доля многодоменных частиц, что свидетельствует о наличии типичных для техногенного загрязнения крупных ферромагнитных частиц. В свою очередь, пробы с селитебной части города ближе к однодоменным структурам, что указывает на природный генезис магнитных частиц.

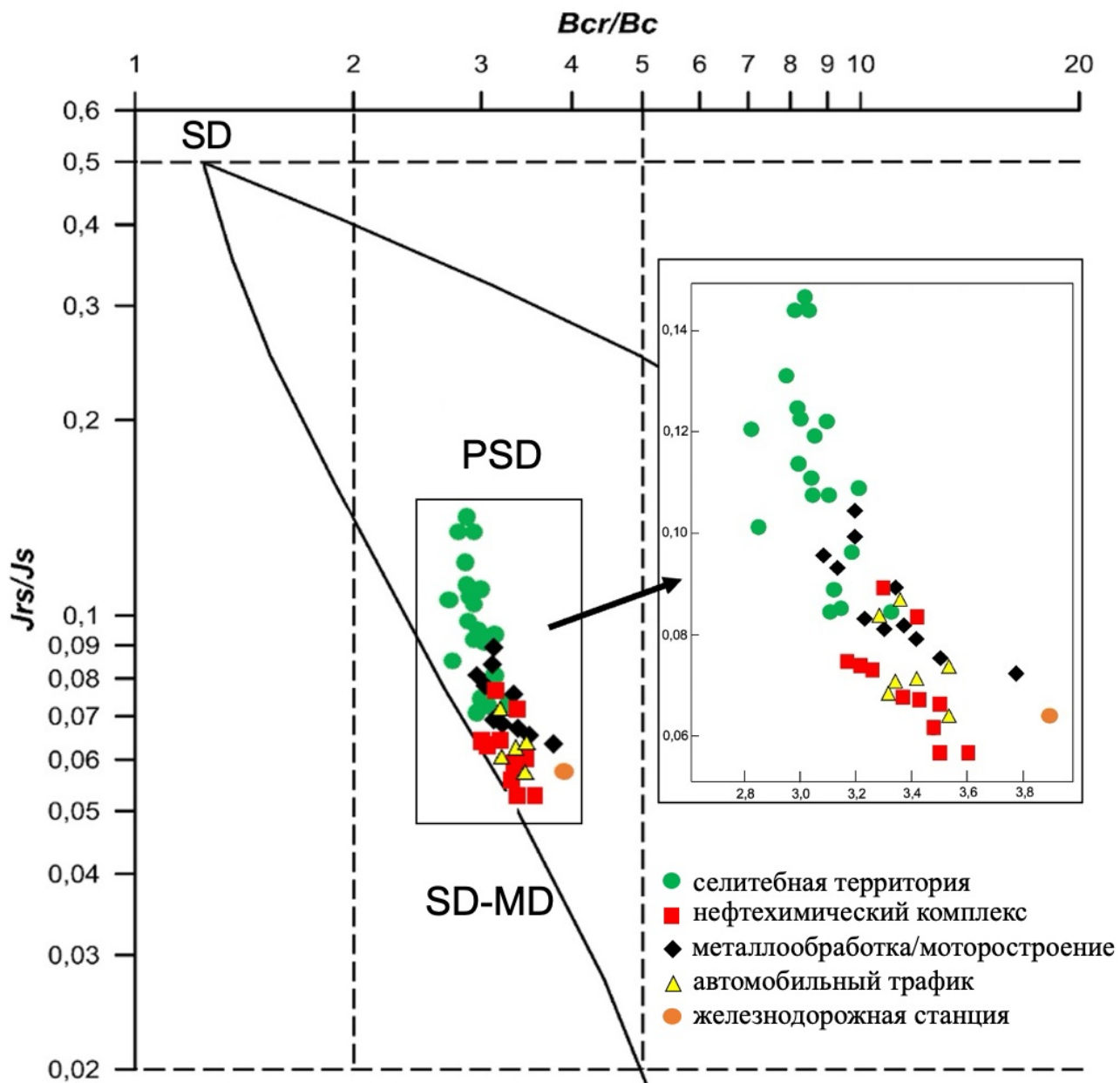


Рис. 5. Распределение проб почв на диаграмме Дзя-Данлопа

Примечание: PSD – псевдооднородные частицы, SD-MD – одно- и многодоменные частицы

Таким образом, параметр MB на территории г. Уфа отражает влияние техногенной нагрузки и служит надежным индикатором загрязнения окружающей среды. Комплекс параметров (диапазон значений, высокая пространственная вариабельность, корреляция с приоритетными химическими элементами, доминирование ферромагнитных частиц в промышленных районах) свидетельствует о техногенном происхождении магнитных частиц. Результаты СЭМ и гистерезисного анализа подтверждают техногенный характер источников, делая магнитную восприимчивость эффективным инструментом эколого-геохимического мониторинга.

Положение 3. Специфика листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L., 1753) на территории г. Уфа заключается в аккумуляции Co, Zn, Sc, Ca, Sr, Ta, Fe и Br. Влияние промышленных предприятий проявляется в элементном составе листьев и частицах на их поверхности: фосфаты легких редкоземельных элементов приурочены к районам расположения предприятий нефтепереработки и нефтехимии; самородные частицы W и Ti, а также интерметаллические сплавы тяжелых металлов (Ni, Co, Cr, Ti) – к предприятиям машиностроения и металлообработки.

Доказательная база данного положения обсуждается в главе 5.

Для выявления геохимической специализации листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L., 1753) на территории г. Уфа были составлены геохимические ряды относительно фоновых показателей (табл. 1).

Таблица 1

Геохимические ряды коэффициентов концентрации ($K_c > 1,5$) химических элементов в листьях тополя на территории г. Уфа

Фоновый показатель	Геохимический ряд
1	Co _{7,2} – Zn _{3,0} – Sc _{2,9} – Ca _{2,8} – Sr _{1,7} – Ta _{1,7} – Fe _{1,5} – Br _{1,5}
2	Rb _{2,3} – Br _{1,8}

Примечание: 1 – «референтное растение» (Markert, 1991); 2 – среднее содержание в золе листьев тополя городов юга Сибири и Дальнего Востока (Юсупов, 2022)

При рассмотрении элементов с $K_c > 1,5$ ед. геохимическая специализация листьев тополя проявляется в накоплении (относительно обоих фоновых показателей) Br. Кроме того, индикаторными химическими элементами также являются редкие элементы и некоторые тяжелые металлы. Как и в случае с почвами, пространственное распределение химических элементов обусловлено влиянием природных и антропогенных факторов, а также их сочетанным эффектом.

Анализ пространственного распределения химических элементов позволил выявить локальные очаги повышенных концентраций, что имеет важное значение для оценки экологического состояния отдельных районов и выявления потенциально опасных зон.

Наличие Br и Rb как трассеров геохимического ряда ($K_c > 1,5$) (табл. 1) по сравнению с урбанизированными территориями азиатской части России обусловлено особенностями элементного состава исходного углеводородного сырья при деятельности объектов нефтепереработки/нефтехимии, топливно-энергетического комплекса и деревообработки, что также подтверждается их пространственным распределением. Влияние технологических процессов нефтепереработки (гидроочистка, каталитический крекинг) приводят также к формированию ореолов повышенных содержаний LREE (La, Ce, Nd) (рис. 6 а). В зоне влияния НПЗ выявлены РЗЭ-содержащие частицы (рис. 6 б), при этом морфология их поверхности свидетельствует о техногенном происхождении.

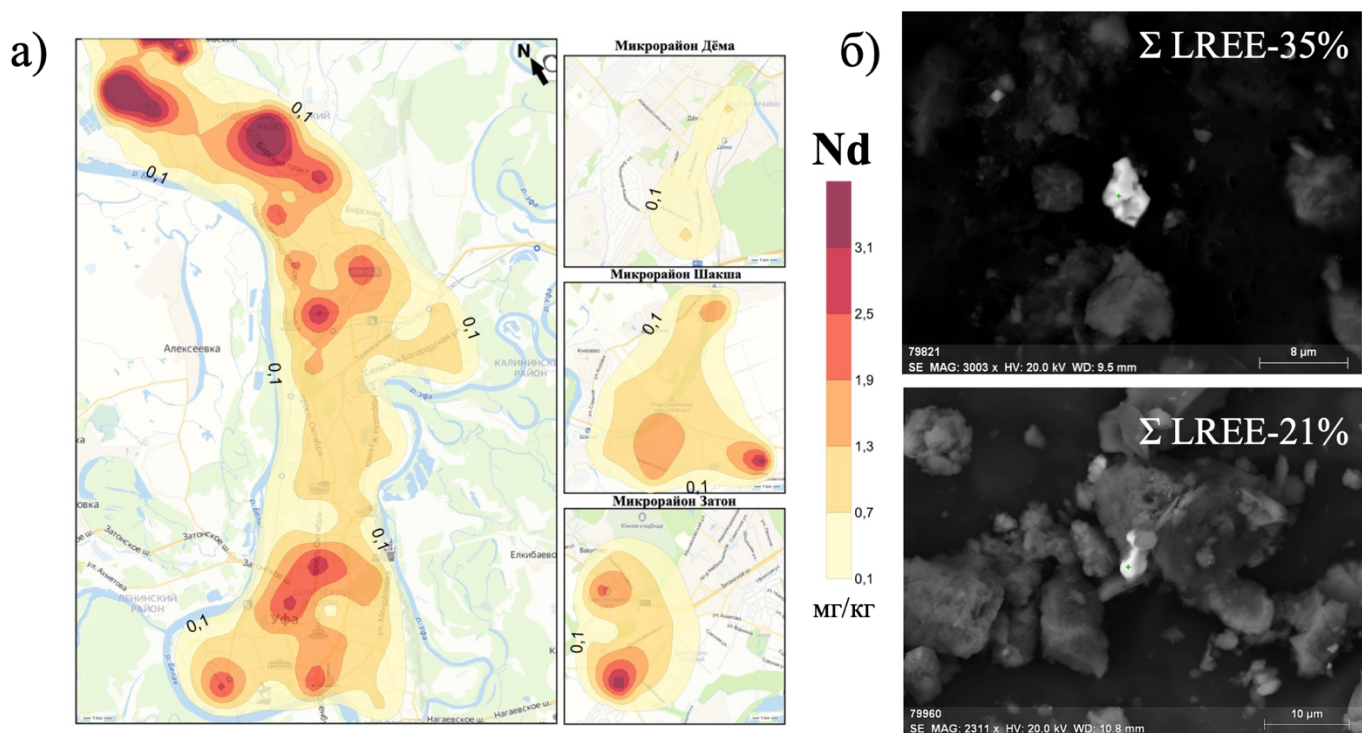


Рис. 6. Пространственное распределения Nd в золе листьев тополя на территории г. Уфа (а), микроминеральные фазы на поверхности листьев тополя в зоне влияния НПЗ (б)

Анализ пространственного распределения Co (рис. 7 а) и Та выявил ореолы повышенного накопления в зоне влияния объектов машиностроения и металлообработки (производственные цеха ПАО «ОДК-УМПО»): концентрации превышают среднее значение по городу в 2 и более раз. Частицы интерметаллических сплавов Ni-Co-Cr-W-Al-Ti были зафиксированы в районах расположения данных предприятий, также были обнаружены Ti-, W-содержащие частицы (рис 7 б). Указанные элементы широко применяются при создании твёрдосплавных и композиционных материалов на основе карбидов W, где Ni и Cr выполняют роль металлической связки и легирующих добавок. Такие сплавы используются в авиастроении как износостойкие и эрозионно-стойкие покрытия и детали в газотурбинных двигателях. Кроме того, WC-системы с легированием Ni-Cr-Ti применяются в режущем инструменте для обработки жаропрочных сплавов, используемом при изготовлении авиационных компонентов, что дополнительно объясняет их широкую применяемость в авиационной индустрии.

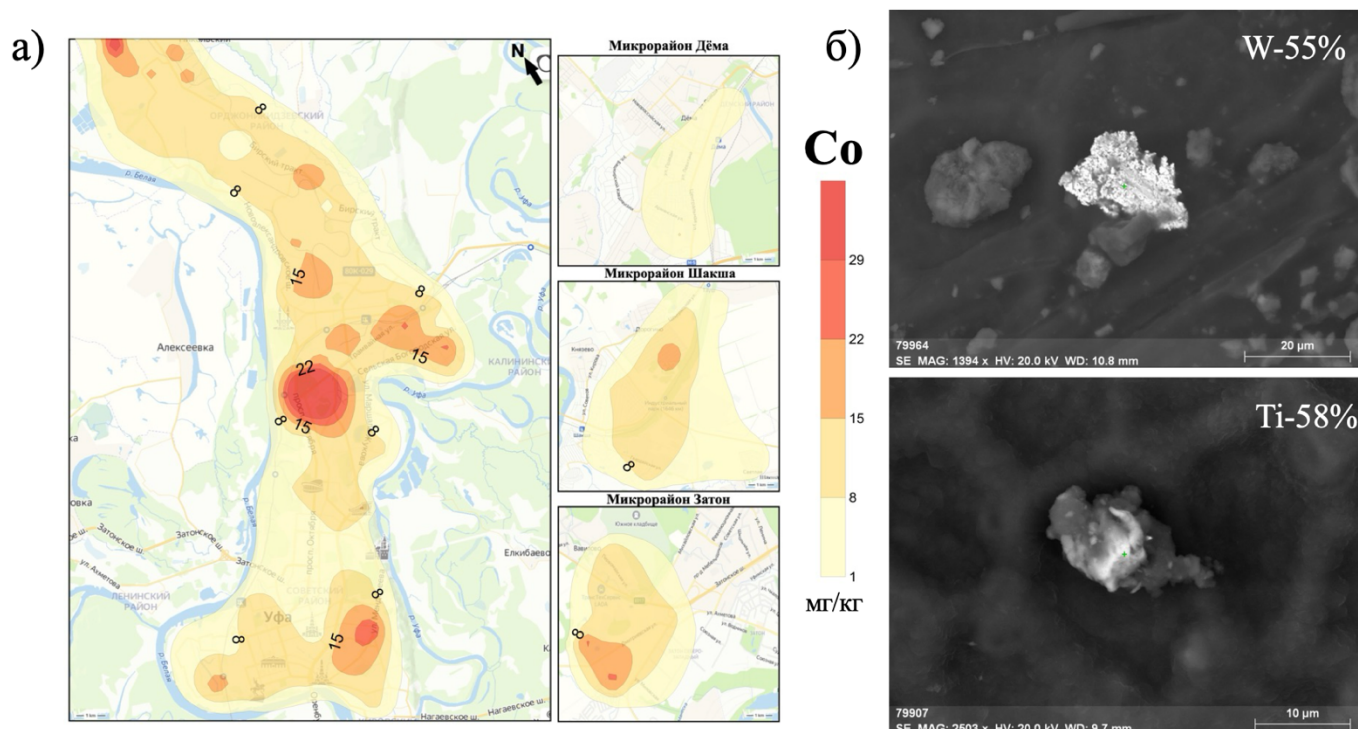


Рис. 7. Пространственное распределения Co в золе листьев тополя на территории г. Уфа (а), микроминеральные фазы на поверхности листьев тополя в зоне влияния объектов машиностроения и металлообработки (б)

В пробах листьев тополя, отобранных вдоль крупных автомагистралей зафиксированы повышенные значения содержания Cr (рис. 8 а), что указывает на значительное влияние транспортных потоков на качество атмосферного воздуха. Данные участки располагаются в южной части города, где сосредоточены основные транспортные узлы и высокая интенсивность движения, способствующие аккумуляции тяжёлых металлов на поверхности листьев тополя. СЭМ-анализ выявил присутствие частиц сплавов Cr-Fe, а также включений самородного железа, преимущественно пластинчатой формы (рис. 8 б). Морфология и состав данных частиц указывают на их техногенное происхождение и позволяют предположить, что их основным источником являются процессы износа металлических деталей транспортных средств и элементов транспортной инфраструктуры, таких как тормозные колодки, рельсовые соединения и узлы железнодорожного оборудования. Наличие сплавов Cr-Fe свидетельствует о высокотемпературных процессах, характерных для фрикционных систем, что подтверждает связь выявленных загрязнителей с интенсивными транспортными потоками.

Расчёт коэффициента биологического поглощения (A_x) (рис. 9) позволил установить, что для Ca, Zn, Br, Rb, Sr характерно поступление из почвы ($A_x > 1$), что свидетельствует об их высокой подвижности и активном биологическом усвоении.

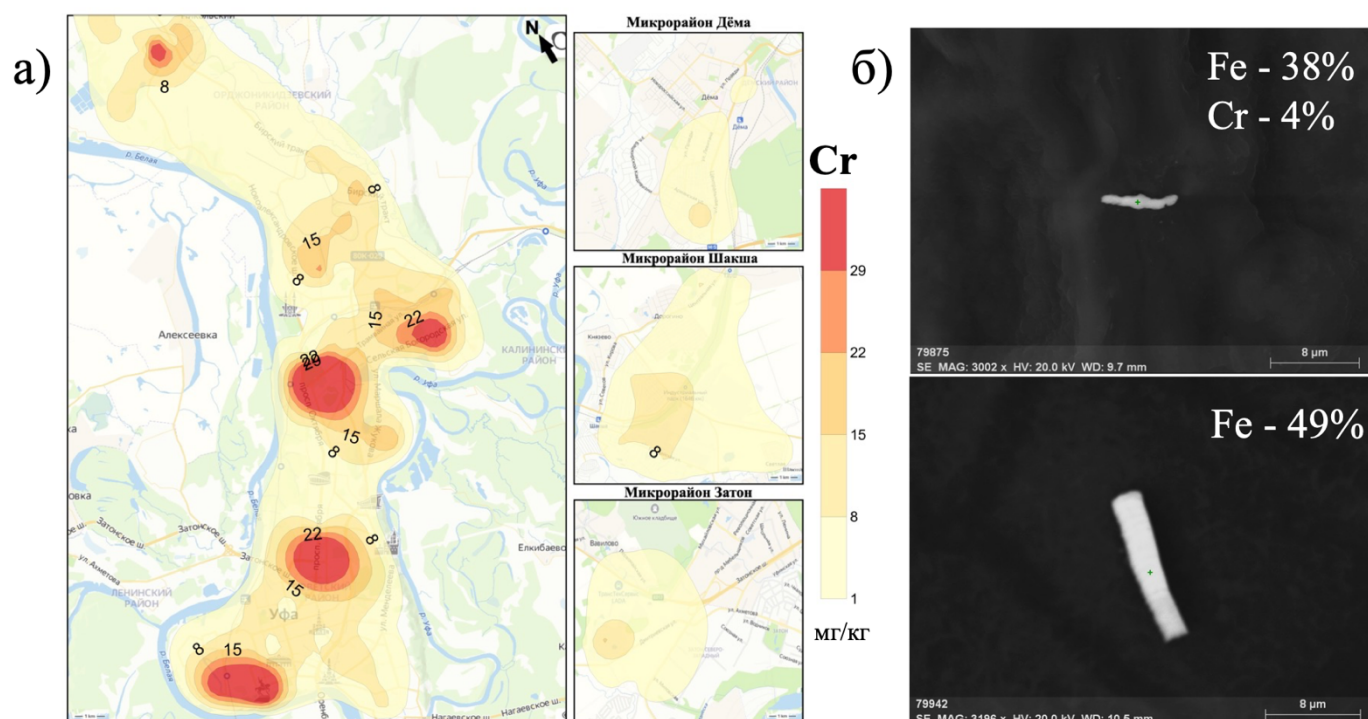


Рис. 8. Пространственное распределения Cr в золе листьев тополя на территории г. Уфа (а), микроминеральная фазы на поверхности листьев тополя в зоне влияния автотранспорта (б)

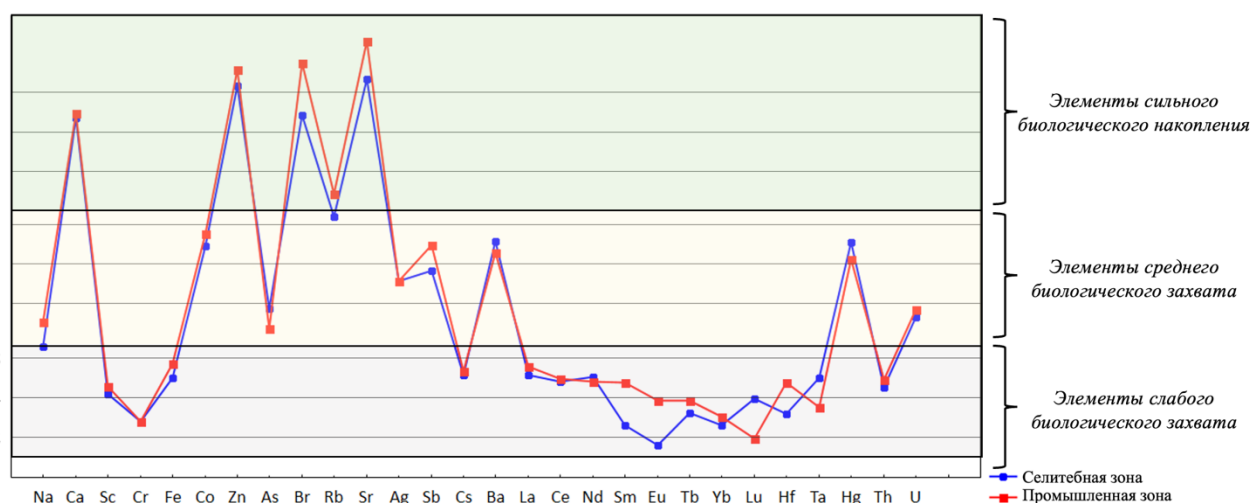


Рис. 9. Коэффициенты биологического поглощения (A_x) химических элементов тополем бальзамическим на территории г. Уфа

Для Na, Co, As, Ag, Sb, Ba, Th, U установлен смешанный механизм поступления в растения ($1 > A_x > 0,1$), включающий как корневое поглощение из почвы, так и осаждение из атмосферного воздуха. При этом для районов расположения основных промышленных предприятий выявлены более активное поглощение элементов, как биогенных, так и микроэлементов (редкие, тяжелые металлы).

Значения Z_c на территории города варьирует от 6 до 96 при медиане 31, что свидетельствует о преимущественно низком и умеренном экологическом риске.

Максимальные значения Z_c зафиксированы вблизи крупных промышленных предприятий, таких как УНПЗ (96 ед.) и ПАО «ОДК–УМПО» (89 ед.), а также в районах с высоким автомобильным трафиком (48 ед.). Основной вклад в формирование интегрального показателя загрязнения вносят Co, Zn, Sc, Ca, Sr, Ta, Fe и Br.

Положение 4. Северная часть города, как зона влияния предприятий теплоэнергетики, нефтепереработки и нефтехимии, машиностроения и металлообработки, характеризуется умеренным экологическим риском. Cr и As является приоритетными элементами в формировании как неканцерогенного, так и канцерогенного показателя опасности.

Доказательная база данного положения обсуждается в главе 7.

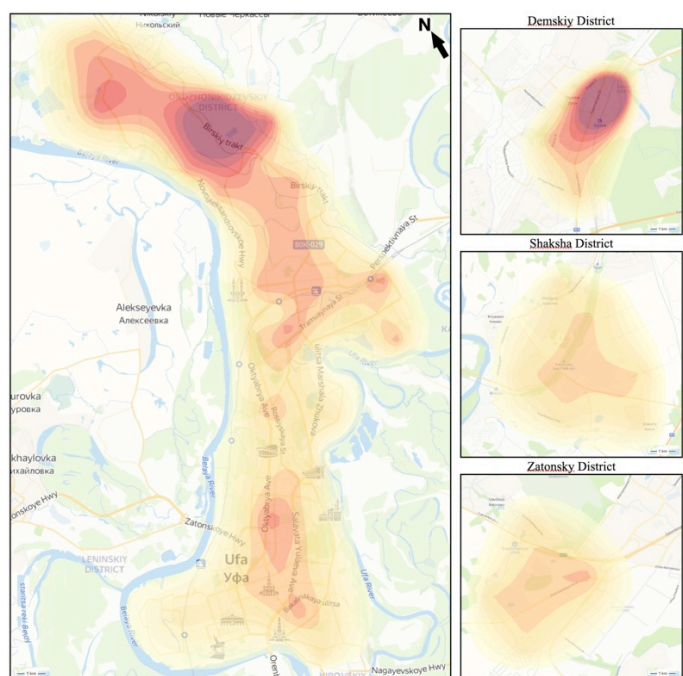


Рис. 10. Схема пространственного распределения индекса опасности тяжелых металлов и металлоидов в почве на территории г. Уфа

На основе данных элементного состава почв были рассчитаны индексы экологического риска для приоритетных тяжелых металлов и металлоидов. Для большей части города выявлен умеренный уровень индекса опасности ($150 < PERI < 300$), при этом есть в северной части города установлены зоны, приуроченные к промышленным предприятиям (рис. 10). В этих зонах отмечены повышенные уровни риска для Hg, Ni, Cu, As и Pb. Hg и As, которые несмотря на низкие концентрации относительно фоновых показателей, остаются приоритетными элементами из-за высокой токсичности и коэффициента опасности.

Для комплексной оценки потенциальных угроз здоровью

населения, связанных с неканцерогенным и канцерогенным воздействием тяжелых металлов и металлоидов в почвах применена методика Агентства по охране окружающей среды США (USEPA), признанная на международном уровне и позволяющая не только количественно определить уровень риска для различных групп населения (взрослые и дети), но и выделить химические элементы, способные оказывать долговременное токсическое воздействие.

Максимальный вклад в формирование неканцерогенного риска вносят Cr (63 %), As (12 %), Co (9 %), Pb (6 %). Меньший вклад связан с поступлением Ni, Hg, Cu, Zn.

Повышенный риск связан с деятельностью основных промышленных предприятий в северной части и расположением крупных транспортных узлов в южной части города (как автомобильный, так и железнодорожный). При этом уровень риска существенно различается для взрослого и детского населения: дети подвергаются значительно более высокому риску. Суммарный индекс неканцерогенного риска (НИ) показывает, что для более 95 % детского населения характерен уровень риска ($НИ > 1$), что свидетельствует о потенциальной угрозе для здоровья, в то время как для взрослого населения показатель НИ большей частью ниже 1.

Канцерогенный риск от воздействия As и Cr на территории г. Уфы превышает допустимые уровни, особенно среди детского населения. Средние значения риска для As и Cr у детей в 6-10 раз выше установленного порога, а максимальные показатели достигают критических значений, что свидетельствует о значительной угрозе здоровью и требует приоритетных мер контроля. Как и в случае оценки неканцерогенного риска более подверженным является детское население: значения HQ чаще превышают безопасный порог, в то время как у взрослых в большинстве случаев остаются в допустимых пределах.

Таким образом, основная зона умеренного экологического риска сосредоточена в северной части города, вблизи промышленных объектов. Приоритетными элементами, формирующими профиль риска для всех возрастных групп, выступают Cr и As, что подчёркивает необходимость их регулярного контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование позволило провести эколого-геохимическую оценку территории г. Уфа по данным изучения почв и листьев тополя.

Геохимический анализ почв г. Уфа выявил смешанный характер формирования элементного состава, обусловленный как природно-литогеохимическими особенностями региона (распространение карбонатных и сульфатных пород), так и техногенным воздействием. Геохимический ряд Cr, Ni, Cu, Ca, Co, Pb, V, Zn, Y, S, Tb отражает вклад промышленных выбросов, транспортных эмиссий и коммунальной деятельности.

Ранжирование районов по техногенному профилю позволило выделить как общие, так и специфические элементы загрязнения, приуроченные к отдельным типам антропогенной нагрузки. В частности, Sb ассоциирован с металлообработкой (УМПО), Br, Rb – с ТЭЦ, а Ni, V и S – с нефтеперерабатывающей промышленностью. Максимальные значения Z_c зафиксированы в районах, прилегающих к УМПО, НПЗ, железнодорожной станции Дёма и ТЭЦ.

Данные по магнитной восприимчивости почв подтвердили наличие техногенных ферромагнитных частиц, преимущественно оксидов железа, характерных для высокотемпературных производственных процессов. Пространственное распределение магнитной восприимчивости совпадает с зонами повышенной концентрации тяжёлых металлов.

Анализ элементного состава листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L., 1753) выявил накопление Co, Zn, Sc, Ca, Sr, Ta, Fe и Br, что отражает избирательную способность растений к поглощению элементов и подтверждает их использование как биоиндикатора. Влияние промышленных предприятий и техногенных источников установлено как по геохимическим данным, так и по данным морфологии частиц на поверхности листьев тополя.

Селективность накопления элементов в растениях объясняется как физиолого-биохимическими особенностями вида, так и характером загрязнения. Для Ca, Co, Zn, Br и Sr установлено поступление преимущественно из почв, тогда как Ta, Sc и Fe преимущественно поступают путем атмосферного осаждения согласно данным A_x .

Оценка экологических и санитарно-гигиенических рисков показала, что основная масса проб относится к категории низкого риска. Однако локальные превышения концентраций потенциально токсичных элементов указывают на зоны потенциального риска. Индекс неканцерогенного воздействия (НИ) для населения находится в пределах нормы, канцерогенные риски по As и Cr также остаются в допустимых пределах.

Полученные результаты подчеркивают необходимость мониторинга в районах с промышленными предприятиями и высокой транспортной нагрузкой, а также демонстрируют эффективность применения геохимических и биоиндикационных подходов для оценки состояния окружающей среды в условиях урбанизированной среды.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science

1. **Гончаров Г.А.**, Соктоев Б.Р., Фархутдинов И.М. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова на территории города Уфы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 61–79. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4307>
2. **Goncharov G.**, Soktoev, B., Farkhutdinov, I., & Matveenkov, I. Heavy metals in urban soil: Contamination levels, spatial distribution and human health risk assessment (the case of Ufa city, Russia) // Environmental Research. – 2024. – Т. 257. – С. 119216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119216>
3. **Гончаров Г.А.**, Соктоев Б.Р., Ляпина Е.Е., Фархутдинов И.М. Эколого-геохимическая оценка состояния территории города Уфы по данным изучения листьев тополя (*Populus balsamifera* L.) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. - 2024. – Т. 166. – № 3. – С. 476-494. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.3.476-494>.

Тезисы в материалах и сборниках конференций

4. **Гончаров Г.А.** Эколого-геохимическая оценка территории г. Уфа по данным изучения элементного состава золы листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera*) // Экология России и сопредельных территорий: Материалы XXIV

Международной экологической студенческой конференции. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2022. – С. 68.

5. **Гончаров Г.А.** Загрязнение почв тяжёлыми металлами на территории города Уфа // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Издательство ТПУ, 2022. – Том 1. – С. 274-276.
6. **Гончаров Г.А.** Влияние промышленных предприятий на элементный состав почвенного покрова на территории города Уфа // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Издательство ТПУ, 2023. – Том 1. – С. 213-215.
7. **Гончаров Г.А.,** Соктоев Б.Р. Листья тополя как индикатор промышленной специализации города Уфа // Современные проблемы геохимии: материалы конференции молодых ученых. – Иркутск: Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 2023. – С. 39-41.
8. **Гончаров Г.А.,** Соктоев Б.Р. Оценка эколого-геохимического состояния территории города Уфа по данным изучения минеральных фаз на поверхности листьев тополя // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Геохимические методы поисков как инструмент обнаружения прямых признаков месторождений стратегических видов минерального сырья». – М.: ИМГРЭ, 2023. – С. 53-56.
9. **Гончаров Г.А.** Оценка рисков для здоровья населения от воздействия тяжелых металлов в почве (на примере города Уфа, Республика Башкортостан) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – Том 1. – С. 224-225.
10. **Гончаров Г.А.,** Кузина Д.М., Соктоев Б.Р. Оценка магнитной восприимчивости почвогрунтов на территории города Уфа // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы VII Всероссийской молодежной научной конференции. – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2024. – С. 37-39.
11. **Гончаров Г.А.,** Соктоев Б.Р. Влияние металлообрабатывающих предприятий на эколого-геохимическое состояние почвенного покрова на примере урбанизированной территории города Уфа // Актуальные проблемы экологической геохимии: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – М.: ИМГРЭ, 2024. – С. 71-74.
12. **Гончаров Г.А.,** Кузина Д.М. Корреляционный анализ компонент магнитной восприимчивости и порообразующих оксидов в почвенном покрове (Республика Башкортостан, г. Уфа) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIX Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова. Том 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2025. – Том 1. – С. 178-180.
13. **Гончаров Г.А.,** Соктоев Б.Р. Биологическое поглощение химических элементов в системе «почва-растение» (на примере тополя бальзамического, г. Уфа) //

Проблемы геохимической экологии в условиях техногенеза биосферы: материалы XIV Международной Биогеохимической школы-конференции. – Томск: STT, 2025. – С.188-191.