

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья



УДК 504.054

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-61-69><https://elibrary.ru/trxgml>

**Формирование геохимической ситуации под влиянием упорядоченных антропогенных и природно-антропогенных потоков веществ в условиях урбанизации**

**Андрей Александрович Белогубкин**

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

[andrey.belogubkin@mail.ru](mailto:andrey.belogubkin@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлен критический обзор современных исследований, посвященных влиянию упорядоченных потоков веществ (малых рек и автодорог) на геохимическую ситуацию прилегающих территорий и формирование специфических геохимических аномалий в условиях урбанизированных территорий. Рассматриваются закономерности накопления и распределения микроэлементов, железа и титана в донных отложениях, пойменных почвах и почвах придорожных полос. На основе анализа данных по России и двум группам стран (развитые и развивающиеся) проведен сравнительный анализ геохимических аномалий, формирующихся под воздействием урбанизации и транспортной инфраструктуры. Систематизированы данные о влиянии различных факторов на интенсивность и характер техногенной трансформации геохимических ландшафтов. Особое внимание уделено факторам, контролирующим интенсивность и характер техногенной трансформации геохимических ландшафтов, включая климатические условия, интенсивность трафика и гидрологический режим. Обзор подтверждает необходимость использования комплексных методов мониторинга для оценки экологического риска, связанного с техногенным загрязнением, и предлагает подходы к типизации геохимических аномалий, формирующихся в зоне влияния упорядоченных потоков.

**Ключевые слова:** геохимия, упорядоченные потоки, малые реки, автодороги, донные отложения, пойменные почвы, придорожные почвы, микроэлементы

**Для цитирования:** Белогубкин А.А. Формирование геохимической ситуации под влиянием упорядоченных антропогенных и природно-антропогенных потоков веществ в условиях урбанизации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 61-69. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-61-69>. EDN TRXGML.

## SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

**Formation of the geochemical environment under the influence of linear anthropogenic and natural-anthropogenic substance flows in urban areas**

**Andrei A. Belogubkin**

Perm State University, Perm, Russia

[andrey.belogubkin@mail.ru](mailto:andrey.belogubkin@mail.ru)

**Abstract.** The article presents a critical review of contemporary research focused on the influence of linear flows (small rivers and roads) on the geochemical environment of adjacent territories and the formation of specific geochemical anomalies within urbanized areas. The study examines the patterns of accumulation and distribution of microelements, iron, and titanium in bottom sediments, floodplain soils, and roadside soils. Based on the analysis of data from Russia and two groups of countries (developed and developing), a comparative analysis is conducted on geochemical anomalies shaped by the impact of urbanization and transport infrastructure. Data on the influence of various factors on the intensity and nature of technogenic transformation of geochemical landscapes are systematized. Particular attention is paid to the factors controlling the intensity and character of technogenic transformation, including climatic conditions, traffic intensity, and hydrological regime. The review confirms the necessity of using integrated monitoring methods for assessing the ecological risk associated with technogenic pollution and proposes approaches for the typification of geochemical anomalies forming in the zone of influence of linear flows.

**Keywords:** geochemistry, ordered flows, small rivers, roads, stream sediments, floodplain soils, roadside soils, microelements

**For citation:** Belogubkin, A., 2025. Formation of the geochemical environment under the influence of linear anthropogenic and natural-anthropogenic substance flows in urban areas. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 11(2), pp. 61-69. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-61-69>. EDN TRXGML. (in Russian)

## **Введение**

Современная урбанизация и стремительное развитие транспортной инфраструктуры являются одними из наиболее значимых факторов, определяющих трансформацию природных ландшафтов и формирование специфических техногенных геохимических аномалий [22, 42, 47]. Эти процессы приводят к изменению естественных циклов химических элементов, их перераспределению и накоплению в различных компонентах окружающей среды. В условиях городской среды особую роль в этих трансформациях играют так называемые упорядоченные потоки – линейные элементы ландшафта, которые выступают в качестве активных каналов миграции, аккумуляции и перераспределения химических элементов. К таким потокам относятся, прежде всего, малые реки, протекающие через урбанизированные территории, и автомагистрали [44, 54].

Изучение влияния этих упорядоченных потоков на геохимическую обстановку прилегающих территорий представляет собой актуальную научную задачу. Это обусловлено не только необходимостью понимания фундаментальных геохимических процессов, происходящих под антропогенным воздействием, но и острой потребностью в разработке эффективных мер по оценке экологического состояния урбанизированных территорий и снижению негативного воздействия на окружающую среду [13, 36].

Антропогенные геохимические аномалии, формирующиеся в результате деятельности человека, могут оказывать долгосрочное негативное влияние на почвенный покров, водные объекты, растительность и, в конечном итоге, на здоровье человека. В условиях постоянно растущего населения и расширения городских агломераций, проблема загрязнения окружающей среды становится все более острой, требуя комплексного подхода к ее изучению и решению [14, 30, 48].

Малые реки, протекающие через города, становятся естественными коллекторами для широкого спектра загрязняющих веществ, поступающих с поверхностным стоком с селитебных территорий, промышленных зон и транспортных магистралей. Эти реки аккумулируют загрязнители в донных отложениях и пойменных почвах, а также способствуют их дальнейшему распространению по водосборному бассейну. Геохимические процессы в речных системах, такие как сорбция, осаждение, комплексообразование, играют ключевую роль в трансформации загрязняющих веществ, определяя их подвижность и биодоступность [32, 45, 46].

Автомобильные дороги, в свою очередь, являются постоянными источниками эмиссии поллютантов, таких как тяжелые металлы (Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cr), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и серы ( $\text{SO}_x$ ), а также различные органические соединения и противогололедные реагенты. Эти вещества накапливаются в придорожных почвах и могут мигрировать в сопредельные экосистемы, оказывая негативное воздействие на почвенную биоту и растительность [25, 40].

## **Формирование геохимической обстановки**

Под геохимической обстановкой в урбанизированных территориях понимается комплекс факторов, определяющих содержание, формы нахождения, миграцию и распределение химических элементов (включая антропогенные поллютанты, такие как тяжелые металлы и нефтепродукты) в компонентах ландшафта: почве, донных отложениях и воде [1, 11].

Геохимическая обстановка территории формируется под влиянием сложного взаимодействия природных и антропогенных факторов. В условиях урбанизированных ландшафтов антропогенное воздействие зачастую становится доминирующим, приводя к глубокой трансформации естественных геохимических циклов и формированию специфических техногенных геохимических аномалий [1, 11, 17]. Эти аномалии характеризуются повышенными концентрациями определенных химических элементов, часто токсичных, в различных компонентах окружающей среды – почвах, донных отложениях, водах и биоте.

Ключевую роль в процессах перераспределения и концентрирования химических элементов играют геохимические барьеры – зоны, где происходит резкое изменение миграционной способности элементов вследствие изменения физико-химических условий (рН, Eh, температуры, сорбционной емкости, концентрации лигандов) [2, 9, 18]. В условиях городов такими барьерами могут выступать границы раздела сред (атмосфера-почва, почва-вода, вода-донные отложения), зоны изменения гидродинамического режима, а также участки с высокой сорбционной способностью почв и донных отложений. Например, органическое вещество почв и глинистые минералы являются мощными сорбентами для многих тяжелых металлов, образуя геохимические барьеры аккумуляции [10, 31].

Изучение геохимической обстановки в урбанизированных территориях требует комплексного подхода, включающего не только полевые исследования и отбор проб, но и лабораторный химический анализ, а также последующую статистическую обработку и интерпретацию данных. Для определения содержания микроэлементов, железа и титана в образцах почв и донных отложений используются различные высокоточные аналитические методы. Среди них наиболее распространены атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), масс-спектрометрия с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), а также атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанный плазмой (ИСП-АЭС) [3, 19, 20, 51].

Важным аспектом является также оценка форм нахождения элементов (валовые, подвижные, биодоступные, связанные с различными фракциями), что позволяет прогнозировать их потенциальную опасность для экосистем и человека. Например, подвижные формы тяжелых металлов представляют наибольшую экологическую опасность, так как легко усваиваются растениями и животными [4, 33].

## Влияние автодорог на геохимическую обстановку

Автомобильные дороги являются одним из наиболее значимых источников антропогенного воздействия на геохимическую обстановку прилегающих территорий, оказывая влияние на почвенный покров, растительность, поверхностные и грунтовые воды. Комплекс загрязняющих веществ, поступающих от автотранспорта и дорожной инфраструктуры, чрезвычайно разнообразен и включает как газообразные, так и твердые компоненты [24, 37].

Можно выделить несколько основных источников загрязнения:

- Выхлопные газы, которые содержат оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), угарный газ ( $\text{CO}$ ), углеводороды, а также твердые частицы, включающие сажу и микрэлементы.
- Износ шин и тормозных колодок является источником цинка ( $\text{Zn}$ ), меди ( $\text{Cu}$ ), свинца ( $\text{Pb}$ ), кадмия ( $\text{Cd}$ ), никеля ( $\text{Ni}$ ), хрома ( $\text{Cr}$ ), а также различных органических соединений и микропластика.
- Коррозия металлических частей автомобилей и дорожных конструкций приводит к поступлению железа ( $\text{Fe}$ ), цинка ( $\text{Zn}$ ), меди ( $\text{Cu}$ ) и других металлов.
- При утечки технических жидкостей, таких как моторные масла, антифризы, тормозные жидкости в почву попадают нефтепродукты, тяжелые металлы и органические соединения.
- Использование противогололедных реагентов. В зимний период дороги обрабатываются солями (хлориды натрия, кальция, магния), которые увеличивают подвижность тяжелых металлов в почвах и водах, а также изменяют их  $\text{pH}$  [15].

Эти источники приводят к поступлению в окружающую среду широкого спектра поллютантов, включая тяжелые металлы ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cr}$ ), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), нефтепродукты, хлориды и сульфаты [41].

Распределение загрязняющих веществ в придорожных полосах характеризуется четко выраженным градиентом: максимальные концентрации наблюдаются непосредственно у края дороги и экспоненциально снижаются с удалением от нее. Ширина зоны загрязнения может варьироваться от нескольких метров до десятков метров в зависимости от интенсивности движения, климатических условий, рельефа и типа почв [14, 52].

$\text{Pb}$  исторически был одним из основных загрязнителей придорожных почв из-за использования этилированного бензина. Несмотря на постепенный отказ от этилированного топлива,  $\text{Pb}$  продолжает обнаруживаться в высоких концентрациях в придорожных почвах, что объясняется его низкой подвижностью и длительным периодом полураспада в почвенном покрове [15]. Основными механизмами накопления  $\text{Pb}$  являются сорбция на глинистых минералах и органическом веществе, а также образование нерастворимых соединений. Высокие концентрации  $\text{Pb}$  могут оказывать токсическое действие на почвенную микрофлору, растительность и животных, включая человека [5, 8, 16].

$\text{Zn}$  и  $\text{Cu}$  являются другими распространенными загрязнителями, связанными с износом шин, тормозных

колодок и коррозией металлических частей автомобилей.  $\text{Zn}$  используется в качестве вулканизирующего агента в производстве шин, а  $\text{Cu}$  в тормозных колодках. Эти элементы также накапливаются в придорожных почвах, но, в отличие от  $\text{Pb}$ , обладают большей подвижностью и могут мигрировать на большие расстояния [5, 30].

$\text{Fe}$  и  $\text{Ti}$  также являются важными индикаторами техногенного воздействия.  $\text{Fe}$ , хотя и является распространенным элементом в земной коре, может накапливаться в придорожных почвах в результате коррозии автомобилей и дорожных конструкций.  $\text{Ti}$ , в свою очередь, используется в качестве белого пигmenta в красках, пластиках и дорожной разметке, а также в составе некоторых сплавов. Его повышенные концентрации в придорожных почвах могут свидетельствовать о поступлении загрязняющих веществ из этих источников [11, 12].

Влияние автодорог на геохимическую обстановку проявляется не только в накоплении загрязняющих веществ, но и в изменении физико-химических свойств почв. Уплотнение почв, изменение их  $\text{pH}$ , засоление в результате применения противогололедных реагентов – все это приводит к нарушению почвенных процессов и снижению их плодородия. Кроме того, загрязнение придорожных почв может приводить к миграции поллютантов в грунтовые воды, создавая угрозу для качества питьевой воды [15].

## Влияние малых рек на геохимическую обстановку

Малые реки, протекающие через урбанизированные территории, играют роль естественных коллекторов для широкого спектра загрязняющих веществ, поступающих с поверхностным стоком с селитебных территорий, промышленных зон и транспортных магистралей. Эти реки аккумулируют загрязнители в донных отложениях и пойменных почвах, а также способствуют их дальнейшему распространению по водосборному бассейну. Геохимические процессы в речных системах, такие как сорбция, осаждение, комплексообразование, играют ключевую роль в трансформации загрязняющих веществ, определяя их подвижность и биодоступность [32, 45, 46].

Основные источники загрязнения малых рек три:

- Поверхностный сток с урбанизированных территорий. Он включает в себя смыв загрязняющих веществ с дорог (тяжелые металлы, нефтепродукты, противогололедные реагенты), с жилых и промышленных зон (бытовые отходы, промышленные стоки, строительный мусор).
- Несанкционированные сбросы неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод от промышленных предприятий и жилищно-коммунального хозяйства.
- Загрязненные атмосферные осадки. Загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферу промышленными предприятиями и автотранспортом, оседают на поверхности водосбора и затем смываются в реки [38].

Донные отложения и пойменные почвы являются основными депонирующими средами для загрязняющих веществ в речных системах. Благодаря высокой сорбционной способности (обусловленной наличием

глинистых минералов, органического вещества, оксидов и гидроксидов железа и марганца), они способны аккумулировать значительные количества тяжелых металлов, радионуклидов, нефтепродуктов и других поллютантов. Эта аккумуляция может приводить к формированию геохимических аномалий, которые служат вторичными источниками загрязнения при изменении физико-химических условий (например, при изменении pH, Eh, или при механическом нарушении донных отложений) [14, 30, 49].

Подвижность и биодоступность загрязняющих веществ в речных системах зависят от множества факторов, включая pH воды, окислительно-восстановительный потенциал, содержание органического вещества, наличие комплексообразующих лигандов и активность микроорганизмов [23]. Например, в условиях кислой среды и восстановительных условий многие тяжелые металлы становятся более подвижными и могут переходить из донных отложений в водную fazу, представляя угрозу для водной биоты и человека [16, 25].

### **Влияние на экосистемы**

Загрязнение малых рек оказывает негативное воздействие на водные и прибрежные экосистемы. Это проявляется в снижении биоразнообразия, изменении структуры и функций сообществ гидробионтов, накоплении токсичных веществ в пищевых цепях. В конечном итоге, это может привести к деградации экосистем и потере их способности к самоочищению [26, 36, 44].

Особое внимание было уделено изучению форм нахождения тяжелых металлов в донных отложениях реки Егошихи. Было установлено, что значительная часть металлов находится в подвижных и биодоступных формах, что создает потенциальную угрозу для водной биоты. Корреляционный анализ показал сильную положительную связь между содержанием органического вещества и тяжелых металлов, что указывает на важную роль органического вещества в их аккумуляции [10].

На глобальном уровне проблема загрязнения малых рек в городах также является чрезвычайно острой. В США и Канаде большое внимание уделяется изучению влияния ливневых стоков (stormwater runoff) на качество воды и донных отложений, а также на биодоступность загрязнителей для водной биоты. Исследования в таких городах, как Ванкувер (Канада) и Нью-Орлеан (США), показывают значительное накопление тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Cd) в донных отложениях и пойменных почвах, что связано с урбанизацией, промышленной деятельностью и интенсивным транспортным потоком [41]. В этих странах активно разрабатываются и внедряются технологии по управлению ливневыми стоками, такие как создание дождевых садов, биофильтрационных систем и других элементов зеленой инфраструктуры [2, 15, 37].

В Европе, особенно в странах с высокой плотностью населения и развитой промышленностью, таких как Германия, Великобритания и Франция, исследования сосредоточены на влиянии сточных вод и промышленных выбросов на качество речных вод и донных отложений. Отмечается повышенное содержание тяжелых металлов, фармацевтических препаратов, пестицидов и других микрополлютантов в городских реках,

что представляет угрозу для водных экосистем и здоровья человека [1, 49].

В Африке, где урбанизация идет быстрыми темпами, а инфраструктура водоочистки часто недостаточно развита, малые реки страдают от сбросов неочищенных сточных вод, промышленных отходов и несанкционированных свалок. Это приводит к экстремально высоким концентрациям загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы и органические поллютанты, в речных системах, что имеет серьезные последствия для здоровья населения и окружающей среды [35, 50].

В России, как и во многих других странах, малые реки в городах подвержены значительному антропогенному воздействию. Исследования показывают, что в донных отложениях и пойменных почвах городских рек накапливаются тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы и другие загрязняющие вещества, источниками которых являются промышленные предприятия, ливневые стоки и коммунально-бытовые отходы. Например, в долине реки Егошихи в Перми наблюдается комплексное загрязнение, связанное с исторической промышленной деятельностью и современным городским воздействием [22, 42, 47].

Донные отложения являются важным компонентом речных экосистем, играющим роль как детонирующего, так и вторичного источника загрязнения. В зависимости от физико-химических условий (pH, Eh), содержания органического вещества и глинистых минералов, загрязняющие вещества могут быть прочно связаны с донными отложениями или, наоборот, легко высвобождаться в водную толщу при изменении условий [30].

Пойменные почвы формируются в условиях периодического затопления и осаждения наносов,носимых рекой. В результате этого процесса в них накапливаются как природные, так и антропогенные химические элементы. В урбанизированных районах пойменные почвы часто содержат повышенные концентрации тяжелых металлов, ПАУ и других загрязнителей, что обусловлено поступлением этих веществ с речными водами и донными отложениями [2, 15].

### **Сравнительный анализ**

Автодороги и малые реки являются мощными факторами формирования техногенных геохимических аномалий. Сравнительный анализ характера их воздействия на геохимическую обстановку и пространственное распределение загрязняющих веществ необходим для поиска общих особенностей и различий.

Можно выделить три общие особенности, которые связаны с токсическим влиянием малых потоков на прилегающие территории:

- Для геохимической обстановки придорожных почв и донных отложений характерна аккумуляция тяжелых металлов. Они поступают из антропогенных источников, таких как транспорт, объекты промышленности и бытовые отходы. Для придорожных почв характерно накопление Pb, как остатка от этилированного бензина, Zn, который выделяется при износе шин, Cu от износа тормозных систем и трения накладок, и элементов платиновой группы (Pt, Pd, Rh) из катализаторов. В свою очередь, пойменные почвы и донные отложения малых рек аккумулируют

элементы, мобилизованные водным стоком и атмосферными осадками с городской территории. В них наблюдается повышенное содержание Cu, Zn, Cd, Ni и Cr. Cu и Zn выступают индикаторами загрязнения, а Cd, Ni и Cr могут указывать на вклад локальных промышленных или коммунальных источников [24, 53].

– Для загрязняющих веществ из двух типов малых потоков характерно градиентное распределение. Концентрации загрязняющих веществ, как правило, максимальны в непосредственной близости от источника (дороги или русла реки) и экспоненциально снижаются с удалением от него. Это связано с механизмами расщепления и миграции поллютантов [8, 30].

– Отмечается токсическое влияние на биоту. Высокие концентрации тяжелых металлов, например, цинка, меди и кадмия, ингибируют ферменты и вызывают окислительный стресс у почвенной микрофлоры и растений [43]. Это приводит к нарушению естественных циклов углерода и азота, что вызывает общее снижение плодородия почвы [16, 25].

#### Различия в характере воздействия:

– Различия наблюдаются в основном источнике загрязнения. Для автодорог таковыми являются выхлопные газы, износ шин и тормозных колодок, коррозия металлических частей и противогололедные реагенты. К выхлопным газам относятся оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и оксид углерода (CO), а также тонкодисперсные частицы, содержащие сажу и тяжелые металлы. Износ шин и тормозных колодок служит главным источником твердых частиц, обогащенных Zn из шин и Cu. Для малых рек – ливневые стоки, несущие взвешенные вещества и нефтепродукты, промышленные и бытовые сточные воды, которые содержат N, P и тяжелые металлы, такие как Cd, Cr и Ni. Также происходит постоянный смыв загрязнителей с неорганизованных городских территорий и свалок, которые затем попадают в речную сеть [25].

– Отличается и механизм миграции. В придорожных почвах преобладают процессы сорбции на глинистых минералах и органическом веществе, которые обеспечивают прочное связывание Pb и Cu, а также миграция с поверхностным и подповерхностным стоком. В речных системах ключевую роль играют сорбция и осаждение загрязнителей на взвешенных частицах и последующее накопление в донных отложениях. Там загрязнители могут связываться с оксидами Fe и Mn или органическим веществом. Важны процессы комплексообразования – взаимодействие металлов с растворенным органическим веществом (гуминовыми и фульвокислотами). Такой комплекс обладает более высокой мобильностью в водной толще [32, 45, 46].

– Пространственные масштабы различны у разных малых потоков. Зона влияния автодорог обычно ограничена несколькими десятками метров от полотна дороги. В пределах первых 5-10 м от края проезжей части наблюдается максимальная концентрация загрязнителей, которая затем экспоненциально снижается. Влияние малых рек может распространяться на значительно большие территории, охватывая весь водосборный бассейн и пойменные ландшафты. Поэтому масштаб загрязнения может достигать нескольких километров [2, 15].

Таким образом автодороги и малые реки являются

техногенными коллекторами тяжелых металлов, однако их влияние различается по масштабу и механизмам миграции. Загрязнения от автодорог являются первичными (износ шин и тормозов), локальными (5-50 м) и характеризуются иммобилизацией загрязнителей в почвенном покрове. Малые реки формируют вторичные, широкомасштабные аномалии (смык со всего водосбора), где элементы накапливаются в донных отложениях, оставаясь более мобильными и потенциально вовлекаясь в биоаккумуляцию. Понимание этих различий важно для экологического управления и разработки методов очистки почв.

Помимо особенностей, связанных с происхождением и накоплением загрязнителей, выделим региональные особенности. Они также влияют на методы очистки почв от загрязнений [28].

В промышленно развитых странах (США, Канада, Европа) основное внимание уделяется управлению ливневыми стоками через внедрение передовых практик и зеленых инфраструктурных решений (например, биофильтрационных канав), а также разработке технологий тонкой очистки для снижения остаточных эmissions от транспорта и промышленности. Исследования фокусируются на долгосрочных экологических эффектах и оценке биодоступности загрязнителей – той доли, которая действительно способна нанести токсическое воздействие, что позволяет перейти к более точному риску-ориентированному управлению [2, 15].

В развивающихся странах (Африка, Азия) проблемы усугубляются критическим отсутствием адекватной инфраструктуры для водоочистки и эффективного контроля за промышленными выбросами. Неочищенные бытовые и промышленные сточные воды часто сбрасываются напрямую, что приводит к чрезвычайно высоким уровням загрязнения малых рек, включающим не только тяжелые металлы, но и патогены, создавая острые экологические и социальные проблемы, связанные с деградацией водных ресурсов и здоровьем населения [35, 50].

Понимание этих общих закономерностей и региональных различий позволяет разрабатывать более эффективные стратегии управления геохимической обстановкой в урбанизированных территориях, учитывая специфику каждого типа упорядоченных потоков и особенности локальных условий.

Методология исследования включает обязательную статистическую обработку данных. Применяются такие методы, как корреляционный анализ для выявления взаимосвязей между элементами и факторами, факторный анализ для определения основных источников загрязнения, кластерный анализ для группировки проб по сходству геохимических характеристик [27, 39]. Для оценки степени загрязнения и экологического риска используются различные геохимические индексы, такие как коэффициент концентрации ( $K_c$ ), индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ), фактор обогащения (EF), суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ), потенциальный экологический риск (PERI) [6, 34]. Эти индексы позволяют количественно оценить уровень антропогенного воздействия и сравнить его с фоновыми значениями или допустимыми нормативами. Кроме того, для визуализации пространственного распределения элементов часто используются геоинформационные

системы (ГИС), позволяющие создавать карты загрязнения и выявлять аномальные зоны [7, 21, 29].

### Заключение

Исследование влияния упорядоченных потоков, таких как малые реки и автодороги, на геохимическую обстановку урбанизированных территорий является критически важным для понимания и управления экологическими рисками. Оба типа потоков выступают в качестве мощных источников и каналов перераспределения загрязняющих веществ, формируя специфические антропогенные геохимические аномалии.

Автодороги вносят значительный вклад в загрязнение придорожных почв тяжелыми металлами (Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cr), полихлорированными ароматическими углеводородами (ПАУ) и другими поллютантами, которые поступают от выхлопных газов, износа шин и тормозных колодок, а также использования противогололедных реагентов. Характерной особенностью является градиентное распределение загрязнителей с максимальными концентрациями у края дороги и их экспоненциальным снижением с удалением. Низкая подвижность некоторых элементов, таких как свинец, приводит к их длительному накоплению в почвенном покрове, создавая долгосрочные экологические угрозы.

Малые реки, протекающие через города, аккумулируют широкий спектр загрязняющих веществ из ливневых стоков, промышленных и бытовых сбросов. Донные отложения и пойменные почвы речных систем становятся депо для тяжелых металлов и органических поллютантов, которые могут высвобождаться в водную толщу при изменении физико-химических условий. Глобальный анализ показывает, что проблемы загрязнения малых рек актуальны для всех регионов мира, но их проявления и подходы к решению варьируются в зависимости от уровня экономического развития и инфраструктурных возможностей.

Комплексный подход к изучению геохимической обстановки, включающий полевые исследования, лабораторные анализы, статистическую обработку данных и ГИС-картирование, позволяет выявлять закономерности формирования аномалий, оценивать их масштабы и прогнозировать экологические последствия. Разработка эффективных стратегий управления требует учета специфики каждого типа упорядоченных потоков, а также региональных и локальных особенностей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на более глубокое понимание механизмов трансформации и миграции загрязняющих веществ, оценку их биодоступности и разработку инновационных методов ремедиации и мониторинга для обеспечения устойчивого развития урбанизированных территорий.

### Список литературы

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 627 с.
2. Алексеенко В.А., Алексеенко Л.П. Геохимические барьеры. Учебное пособие. М.: Логос, 2003. 144 с.
3. Большаков В.А., Гальпер Н.Я., Клименко Г.А., Лычко Т.И., Башта Е.В. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами. М.: ВНИИИТЭСХ, 1978. 52 с.
4. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
5. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
6. Ермаков В.В., Карпова Е.А., Корж В.Д., Островумов С.А. Инновационные аспекты биогеохимии М.: ГЕОХИ РАН, 2012. 340 с.
7. Кабата-Пендас А., Пандас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: МИР, 1989. 439 с.
8. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
9. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
10. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: МГУ, 1999. 610 с.
11. Протасова Н.А. Геохимия техногенных ландшафтов. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2009. 37 с.
12. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
13. Смирнова М.А. Геннадьев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2017. № 4. С. 3-11.
14. Фортескью Д.А.К. Геохимия окружающей среды. М.: Прогресс, 1985. 360 с.
15. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 51 с.
16. Adewumi A.J., Ogundele O.D. Hidden hazards in urban soils: A meta-analysis review of global heavy metal contamination (2010-2022), sources and its Ecological and health consequences // Sustainable Environment. 2024. Vol. 10. Iss. 1. Article: 2293239. <https://doi.org/10.1080/27658511.2023.2293239>
17. Allan J.D., Castillo M.M. Stream ecology: structure and function of running waters. Ann Arbor, The University of Michigan publ., 2007. 436 p.
18. Alloway B. (ed.). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Reading, The University of Reading, 2012. 614 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
19. Angon P.B., Islam Md.S., Kc S., Das A., Anjum N., Poudel A., Suchi S.A. Sources, effects and present perspectives of heavy metals in agricultural soils and their management strategies // Heliyon. 2024. Vol. 10. Iss. 7. e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
20. Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L., Folkeson L., Lind B. 2004. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. Water Research, Vol. 38, Iss. 3, P. 720-732. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.006>
21. Burrough P.A., McDonnell R.A. Principles of geographical information systems. Oxford, Oxford University Press publ., 1998. 333 p.
22. Essington M.E. Soil and water chemistry: An Integrative Approach. Boca Raton, CRC Press publ., 2003. 552 p. <https://doi.org/10.1201/b12397>
23. Kemp R. (ed.). Handbook of thermal analysis and calorimetry. Amsterdam, Elsevier Science publ., 1999.

- 1032 p.
24. *Forman R.T., Sperling D., Bissonette J.A., Clevenger A.P., Cutshall C.D., Dale V.H., Fahrig L., France R., Goldman C.R., Heanue K., Jones J.A., Swanson F.J., Turrentine T., Winter T.C.* Road ecology: science and solutions. Washington, Island Press publ., 2003. 481 p.
25. *Hamelink J.L., Landrum P.F., Bergman H., Benson W.H.* Bioavailability: physical, chemical, and biological interactions. Boca Raton, CRC press publ., 1994. 256 p. <https://doi.org/10.1201/9781003578895>
26. *Harrison R.M. (ed.)*. Pollution: causes, effects and control. Cambridge, Royal society of chemistry. 2001. 579 p.
27. *Hengl T.* A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 2007. 270 p.
28. *Horowitz A.J.* A primer on sediment-trace element chemistry. Chelsea, Lewis Publishers publ., 1991. 136 p.
29. *Hosseini N.S., Sobhanardakani S.* Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamedan metropolitan, west of Iran // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2022. Vol. 104, Iss. 17. P. 5962-5985. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2135997>
30. *Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arienzio M., Stanzione D., Violante P.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) // Environmental Pollution. 2003. Vol. 124. Iss. 2. P. 247-256. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00478-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00478-5)
31. *Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N.* Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // Interdisciplinary Toxicology. 2014. Vol. 7. Iss. 2. P. 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
32. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton, CRC Press, 2010. 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
33. *Keith L.H. (ed.)*. Principles of environmental sampling. 2nd ed. Washington, DC, American Chemical Society. 1996. 848 p.
34. *Kicińska A., Pomykała R., Izquierdo-Díaz M.* Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils // European Journal of Soil Science. 2021. Vol. 73. Iss. 1. e13203. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
35. *Lema M.W.* Contamination of urban waterways: A mini-review of water pollution in the rivers of East Africa's major cities // HydroResearch. 2025. Vol. 8. P. 307-315 <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.11.004>
36. *Li D., Shao Z.* The new era for geo-information. // Science in China Series F: Information Sciences. 2009. Vol. 52. Iss. 7. P. 1233-1242. <https://doi.org/10.1007/s11432-009-0122-9>
37. *Mielke H.W., Wang G., Gonzales C.R., Powell E.T., Le B., Quach V.N.* PAHs and metals in the soils of inner-city and suburban New Orleans, Louisiana, USA // Environmental Toxicology and Pharmacology. 2004. Vol. 18. Iss. 3. P. 243-247. <https://doi.org/10.1016/J.EATP.2003.11.011>
38. *Mohiuddin K.M., Zakir H.M., Otomo K., Sharmin S., Shikazono N.* Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river // International Journal of Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 7. Iss. 1. P. 17-28. <https://doi.org/10.1007/BF03326113>
39. *Müller G.* Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // Geojournal. 1969. Vol. 2. Iss. 3. P. 108-118.
40. *Müller A., Österlund H., Marsalek J., Viklander M.* The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 709. Article: 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>
41. *Nazzal Y., Rosen M.A., Al-Rawabdeh A.M.* Assessment of metal pollution in urban road dusts from selected highways of the Greater Toronto Area in Canada // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. Vol. 185. Iss. 2. P. 1847-1858. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2672-3>
42. *Paul M.J., Meyer J.L.* Streams in the urban landscape // Annual Review of Ecology and Systematics. 2001. Vol. 32. Iss. 1. P. 333-365. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_12)
43. *Pimental D. (ed.)*. Encyclopedia of pest management. Boca Raton, CRC Press. 2002. 931 p. <https://doi.org/10.1201/NOE0824706326>
44. *Reimann C., Filzmoser P., Garrett R., Dutter R.* Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R. Chichester, John Wiley & Sons, 2008. 368 p. <https://doi.org/10.1002/9780470987605>
45. *Salomons W., Förstner U.* Metals in the hydrocycle. Berlin, Springer Berlin. Heidelberg, 1984. 352 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>
46. *Sparks D.L.* Environmental soil chemistry. Amsterdam: Academic Press, 2003. 352 p.
47. *Taylor H.E.* Inductively coupled plasma-mass spectrometry. Amsterdam. Academic Press. 2001. P. 294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-683865-7.X5000-5>
48. *Thorpe A., Harrison R.M.* Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review // Science of the Total Environment. 2008. Vol. 400. Iss. 1-3. P. 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>
49. *Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1980. Vol. 33. Iss. 1. P. 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
50. UN-Habitat. Making cities sustainable through rehabilitating polluted urban rivers. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2019. 110 p.
51. *Van Loon J.A.* Analytical atomic absorption spectroscopy: selected methods. New York, Academic Press. 1980. 348 p.
52. *Wang X.S.* Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China) // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 98. P. 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.008>
53. World Health Organization. The public health impact of chemicals: knowns and unknowns. Geneva: World Health Organization, 2018. 84 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516910>
54. *Zhang F., Yan X., Zeng C., Zhang M., Shrestha S., Devkota L.P., Yao T.* Influence of Traffic Activity on

Heavy Metal Concentrations of Roadside Farmland Soil in Mountainous Areas // Environmental Research and Public Health. 2012. Vol. 9. Iss. 5. P. 1715-1731.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph9051715>

### References

1. Alekseenko, V., 2000. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Logos publ. 627 p. (in Russian)
2. Alekseenko, V. and Alekseenko, L., 2003. *Geokhimicheskie bar'ery* [Geochemical Barriers]. Moscow, Logos publ. 144 p. (in Russian)
3. Bolshakov, V., Galper, N., Klimenko, G., Lychkina, T. and Bashta, E., 1978. *Zagryaznenie pochy i rastitel'nosti tyazhelymi metallami* [Soils and Vegetation Pollution by Heavy Metals]. Moscow, VNIIiT-ESKh publ. 52 p. (in Russian)
4. Glazovskaya, M., 1988. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogenykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of Natural and Technogenic Landscapes of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola publ. 328 p. (in Russian)
5. Dobrovolsky, V., 1998. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola publ. 413 p. (in Russian)
6. Ermakov, V., Karpova, E., Korzh, V. and Ostroumov, S., 2012. *Innovatsionnye aspekty biogeokhimii* [Innovative Aspects of Biogeochemistry]. Moscow, GEOKhI RAN publ. 340 p. (in Russian)
7. Kabata-Pendias, A. and Pandias, Kh., 1989. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace Elements in Soils and Plants]. Moscow, Mir publ. 439 p. (in Russian)
8. Kasimov, N., 2013. *Ekogeokhimiya landshaftov* [Ecogeochemistry of Landscapes]. Moscow, IP Filimonov M.V. publ. 208 p. (in Russian)
9. Perel'man, A., 1975. *Geokhimiya landshafta* [Landscape Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola publ. 341 p. (in Russian)
10. Perel'man, A. and Kasimov, N., 1999. *Geokhimiya landshafta* [Landscape Geochemistry]. Moscow, MGU publ. 610 p. (in Russian)
11. Protasova, N., 2009. *Geokhimiya tekhnogenykh landshaftov* [Geochemistry of Technogenic Landscapes]. Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta publ. 37 p. (in Russian)
12. Saet, Yu., Revich, B., Yanin, E., Smirnova, R., Basharkovich, I., Onishchenko, T., Pavlova, L., Trefilova, N., Achkasov, A. and Sarkisyan, S., 1990. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Nedra publ. 335 p. (in Russian)
13. Smirnova, M. and Gennadiev, A., 2017. Kolichestvennaya otsenka pochyennogo raznoobraziya: teoriya i metody issledovaniya [Quantitative assessment of soil diversity: theory and research methods]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, (4), pp. 3–1. (in Russian)
14. Fortesk'y, D., 1985. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Progress publ. 360 p. (in Russian)
15. Yanin, E., 2002. *Tekhnogenye geokhimicheskie assotsiatii v donnykh otlozheniyakh malykh rek* [Technogenic Geochemical Associations in Bottom Sediments of Small Rivers]. Moscow, IMGRE publ. 51 p. (in Russian)
16. Adewumi, A., Ogundele, O. and Villasenor, M., 2024. Hidden hazards in urban soils: A meta-analysis review of global heavy metal contamination (2010–2022), sources and its ecological and health consequences. *Sustainable Environment*, 10(1), Article: 2293239. <https://doi.org/10.1080/27658511.2023.2293239>
17. Allan, J. and Castillo, M., 2007. *Stream ecology: structure and function of running waters*. Ann Arbor, The University of Michigan publ. 436 p.
18. Alloway B. (ed.), 2012. *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Reading, The University of Reading publ. 614 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
19. Angon, P., Islam, Md., Kc, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A. and Suchi, S. 2024. Sources, effects and present perspectives of heavy metals in agricultural soils and their management strategies: A review. *Heliyon*. 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
20. Bäckström, M., Karlsson, S., Bäckman, L., Folkeson, L. and Lind, B. 2004. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Research*, 38(3), pp. 720–732. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.006>
21. Burrough, P. and McDonnell, R., 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford, Oxford University Press publ. 333 p.
22. Essington, M., 2003. *Soil and water chemistry: An Integrative Approach*. Boca Raton, CRC Press publ. 552 p. <https://doi.org/10.1201/b12397>
23. Kemp R. (ed.), 1999. *Handbook of thermal analysis and calorimetry*. Amsterdam, Elsevier Science publ. 1032 p.
24. Forman, R., Sperling, D., Bissonette, J., Clevenger, A., Cutshall, C., Dale, V., Fahrig, L., France, R., Goldman, C., Haneau, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T. and Winter, T., 2003. *Road ecology: science and solutions*. Washington, Island Press publ. 481 p.
25. Hamelink, J., Landrum, P., Bergman, H. and Benson, W., 1994. *Bioavailability: physical, chemical, and biological interactions*. Boca Raton, CRC Press publ. 256 p. <https://doi.org/10.1201/9781003578895>
26. Harrison R. (ed.), 2001. *Pollution: causes, effects and control*. Cambridge, Royal Society of Chemistry publ. 579 p.
27. Hengl, T., 2007. *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities publ. 270 p.
28. Horowitz, A., 1991. *A primer on sediment-trace element chemistry*. Chelsea, Lewis Publishers publ. 136 p.
29. Hosseini, N. and Sobhanardakani, S., 2022. Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamadan metropolitan, west of Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(17), pp. 5962–5985. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2135997>
30. Imperato, M., Adamo, P., Naimo, D., Arienzio, M., Stanzione, D. and Violante, P., 2003. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 124(2), pp. 247–256. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00478-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00478-5)
31. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. and Beeregowda, K., 2014. Toxicity, mechanism and

- health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), pp. 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
32. Kabata-Pendias, A., 2010. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton, CRC Press publ. 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
33. Keith L. (ed.), 1996. *Principles of environmental sampling*. 2nd ed. Washington, DC, American Chemical Society publ. 848 p.
34. Kicińska, A., Pomykała, R. and Izquierdo-Diaz, M., 2021. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13203. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
35. Lema, M., 2025. Contamination of urban waterways: A mini-review of water pollution in the rivers of East Africa's major cities. *HydroResearch*, 8, pp. 307-315 <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.11.004>
36. Li, D. and Shao, Z., 2009. The new era for geo-information. *Science in China Series F: Information Sciences*, 52(7), pp. 1233-1242. <https://doi.org/10.1007/s11432-009-0122-9>
37. Mielke, H., Wang, G., Gonzales, C., Powell, E., Le, B. and Quach, V., 2004. PAHs and metals in the soils of inner-city and suburban New Orleans, Louisiana, USA. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 18(3), pp. 243-247. <https://doi.org/10.1016/J.ETAP.2003.11.011>
38. Mohiuddin, K., Zakir, H., Otomo, K., Sharmin, S. and Shikazono, N., 2010. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(1), pp. 17-28. <https://doi.org/10.1007/BF03326113>
39. Müller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2(3), pp. 108-118.
40. Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J. and Viiklander, M., 2020. The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment*, 709, Article: 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>
41. Nazzal, Y., Rosen, M. and Al-Rawabdeh, A., 2013. Assessment of metal pollution in urban road dusts from selected highways of the Greater Toronto Area in Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(2), pp. 1847-1858. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2672-3>
42. Paul, M. and Meyer, J., 2001. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), pp. 333-365. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-1715-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-0-387-1715-1_12)
- [73412-5\\_12](#)
43. Pimental D. (ed.), 2002. *Encyclopedia of pest management*. Boca Raton, CRC Press publ. 931 p. <https://doi.org/10.1201/NOE0824706326>
44. Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. and Dutter, R., 2008. *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. Chichester, John Wiley & Sons publ. 368 p. <https://doi.org/10.1002/9780470987605>
45. Salomons, W. and Förstner, U., 1984. *Metals in the hydrocycle*. Berlin, Springer Berlin Heidelberg publ. 352 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>
46. Sparks, D., 2003. *Environmental soil chemistry*. Amsterdam, Academic Press publ. 352 p.
47. Taylor, H., 2001. *Inductively coupled plasma-mass spectrometry*. Amsterdam, Academic Press publ. 294 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-683865-7.X5000-5>
48. Thorpe, A. and Harrison, R., 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), pp. 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>
49. Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C. and Jeffrey, D., 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1), pp. 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
50. UN-Habitat, 2019. *Making cities sustainable through rehabilitating polluted urban rivers*. Nairobi, United Nations Human Settlements Programme publ. 110 p.
51. Van Loon, J., 1980. *Analytical atomic absorption spectroscopy: selected methods*. New York, Academic Press publ. 348 p.
52. Wang, X., 2013. Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China). *Journal of Applied Geophysics*, 98, pp. 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.008>
53. World Health Organization, 2018. *The public health impact of chemicals: knowns and unknowns*. Geneva, World Health Organization publ. 84 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516910>
54. Zhang, F., Yan, X., Zeng, C., Zhang, M., Shrestha, S., Devkota, L. and Yao, T., 2012. Influence of Traffic Activity on Heavy Metal Concentrations of Roadside Farmland Soil in Mountainous Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(5), pp. 1715-1731. <https://doi.org/10.3390/ijerph9051715>

Статья поступила в редакцию 02.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 17.11.2025.

The article was submitted 02.10.2025; approved after reviewing 10.11.2025; accepted for publication 17.11.2025.