

Распределение и накопление тяжелых металлов в ландшафтной катене водосбора и донных отложениях водоема на урбанизированной территории

Андреан Анатольевич СЕЛЕЗНЕВ^{1*}
Татьяна Геннадьевна ОКУНЕВА^{3**}
Илья Владимирович ЯРМОШЕНКО^{2***}
Георгий Петрович МАЛИНОВСКИЙ^{2****}
Дарья Владимировна КИСЕЛЕВА^{1,3*****}

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Одной из проблем городских территорий является поступление поллютантов в водоемы. Поступление поллютантов с селитебной зоны города с поверхностным стоком может многократно превышать поступление поллютантов с промышленных и рекреационных зон, а также от точечных источников.

Цель работы: 1) оценить распределение химических элементов в водосборах водоемов на урбанизированной территории, 2) накопление химических элементов в твердом веществе донных отложений поверхностных водоемов, у которых водосборами являются территории функциональных зон города, 3) выявить основные механизмы переноса элементов в твердом веществе с водосборов в водоемы. Исследование проведено на примере г. Екатеринбурга.

Материал для исследования составили результаты ландшафтного эколого-геохимического исследования, проведенного на территории города в 2019–2021 гг.

Результаты исследования. Получены распределения содержания элементов между функциональными ландшафтными зонами в катенах водосборов водоемов Харитоновского сада (искусственное озеро) и Юго-Западного лесопарка (озеро Чемоданчик) в г. Екатеринбурге. Распределения концентраций металлов в компонентах водосбора показывают тенденцию переноса вещества различного происхождения из компонентов ландшафта латеральными миграционными потоками в локальный базис денудации (бессточный поверхностный водоем). При этом в донных отложениях водоема происходит многократное накопление как поллютантов, так и элементов типоморфной ассоциации. Пылевые фракции являются основной транспортирующей веществом средой в водосборах.

Ключевые слова: урбанизированная среда, водоем, водосбор, катена, металлы.

Введение

Большая часть населения планеты проживает в городах. Россия является страной, где численность городского населения составляет более 70 %. В искусственно созданной среде городов происходят постоянные процессы геохимической трансформации. Антропогенная нагрузка на компоненты городского ландшафта приводит к нагрузке на объекты окружающей природной среды, в первую очередь на поверхностные водные объекты.

Донные отложения поверхностных водоемов, являясь одним из геохимических барьеров, могут выступать в качестве индикатора длительного загрязнения водных объектов от урбанизированных территорий [1–7]. Процессы формирования и изменения геохимических условий поверхностных водных объектов напрямую зависят от геохимических условий в водосборе. В водном объекте, у которого в водосборе есть урбанизированная террито-

рия, геохимические условия формируются в результате наложения антропогенного воздействия на природные особенности его формирования.

В мире накоплен большой объем исследований стока различных поллютантов с водосборов урбанизированной территории. Исследования направлены на оценку экологического состояния водных объектов, оценку экологического риска для водных организмов [8, 9], изучение закономерностей загрязнения донных отложений и поверхностных вод поллютантами [10]. Одной из значимых проблем городских территорий является поступление поллютантов в водоемы от рассредоточенных, диффузных, источников загрязнения антропогенного характера помимо стоков от точечных источников [2, 11]. Неточечные (площадные) источники загрязнения представляют собой сток с территории города талых, дождевых и по-

✉sandrian@rambler.ru
**okunevatatjana@mail.ru
***ivy@ecko.uran.ru
****georgy@ecko.uran.ru
****podarenka@mail.ru

ливомоечных вод, внутрипочвенный сток и грунтовый сток. Сточные воды, поступающие в городские водотоки, являются существенным источником техногенных наносов [12]. От неточечных источников поллютанты могут поступать в поверхностные водоемы урбанизированной территории как в растворенном виде, так и на твердых и взвешенных частицах, а также в виде выпадений из атмосферы [13]. Поступление поллютантов и взвешенных веществ с селитебной зоны города с поверхностным стоком многократно превышает поступление поллютантов с промышленных и рекреационных зон, а также от точечных источников [11]. Неточечные источники загрязнения динамичны. Нагрузка от них на водные объекты города напрямую связана с метеорологическими условиями, с выпадением атмосферных осадков. Эти источники загрязнения трудно и зачастую невозможно идентифицировать.

Современное осадконакопление на урбанизированной территории может охарактеризовать диффузное загрязнение города. В результате нарушений в планировке ландшафта, технологий благоустройства, нарушений стока атмосферных осадков, эрозии почв и грунтов, абразии поверхностей тротуаров и асфальта, выпадений из атмосферы образуется рыхлый осадок, который накапливается на поверхностях [14]. Современные отложения и компоненты урбанизированного ландшафта в водосборе часто изучаются отдельно от компонентов водоема в эколого-геохимических и гидрохимических исследованиях на урбанизированных территориях. Различные типы отложений на урбанизированных территориях используют как геоиндикаторный компонент для решения отдельных задач. Дорожную пыль используют для оценки степени загрязнения территорий [15]. Изучается перераспределение и накопление пыли из атмосферы в результате выбросов промышленных предприятий и автотранспорта [16, 17], миграция дорожной пыли с ливневыми стоками и в виде сухих выпадений [18]. Одним из типов современных поверхностных отложений на урбанизированной территории являются поверхностно депонированные наносы в локальных понижениях микрорельефа. Эколого-геохимические исследования на основе опробования наносов позволяют учесть и охарактеризовать загрязнение от неточечных источников [14, 19, 20].

Целью работы было: 1) оценить распределение химических элементов (поллютантов и элементов из типоморфной ассоциации) в водосборах водоемов на урбанизированной территории, 2) накопление химических элементов в твердом веществе донных отложений поверхностных водоемов, у которых водосборами являются территории функциональных зон города, 3) выявить основные механизмы переноса элементов в твердом веществе с водосборов в водоемы. Исследование проводится на примере г. Екатеринбурга.

Материалы и методы

Описание Екатеринбурга. Екатеринбург имеет население примерно 1,5 млн человек и является четвертым по численности населения городом России, центром Свердловской области. Город находится на границе восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности, в зоне умеренного континентального климата. Средняя температура января составляет $-15,3$ °С,

а июля – $+17,4$ °С. Рельеф на территории города крупнохолмистый. Для окрестностей Екатеринбурга характерно умеренно теплое лето и умеренно суровая снежная зима. Холодный период продолжается 151 день – с ноября по март. Высокая антропогенная нагрузка в городе обусловлена большим числом автомобилей, строительных площадок, работой промышленных предприятий.

Характеристики обследуемых водоемов и их водосборов. В г. Екатеринбурге для исследования были выбраны два малых мелководных бессточных водоема: озеро Чемоданчик в Юго-Западном лесопарке ($56,802092^{\circ}$ СШ, $60,538809^{\circ}$ ВД) и озеро в Харитоновском саду ($56,846963^{\circ}$ СШ, $60,613751^{\circ}$ ВД). Водосборы водоемов расположены на сопряжениях разных функциональных зон города: селитебной, рекреационной и зоны автотранспорта (автодороги с интенсивным трафиком).

Водоем Чемоданчик расположен в Академическом районе на территории Юго-Западного лесопарка, вблизи пересечения объездной автодороги и улицы Серафимы Дерябиной. Берега водоема песчаные, с плавным заходом в воду, восточная часть водоема заболочена, в западной располагается насыпная дамба высотой около 1,8 м над уровнем воды. По берегам водоема обустроены беседки для отдыха.

Водоем в Харитоновском саду располагается в центре г. Екатеринбурга и представляет собой искусственный пруд с двумя насыпными островами. Берега островов заболочены. Сад вместе с прудом был заложен в 1826 г. Водоем был вырыт для осушения болота на реке Пеньковке, впадавшей в реку Мельковку, которая, в свою очередь, впадала в городской пруд. С южной стороны в водосборе водоема располагается Вознесенский холм, перепад высот до 13 м.

Эколого-геохимическое опробование и подготовка образцов. Исследования водоемов и их водосборов проводили с помощью подхода трансект-катен [21, 22]. Водоем и его водосбор рассматриваются как геосистема, в которой взаимодействуют гидрохимические процессы и процессы поверхностного латерального сноса вещества. В основе подхода лежит бассейновый принцип. Трансект-катена представляет собой трехмерное тело, в котором сочетаются линейная и катенарная характеристики вместе с площадной формой ландшафта в трансекте. Водосбор расчленен по трансект-катене на латеральные сопряженные участки ландшафта, последовательно сменяющие друг друга в направлении от локального водораздела к локальному базису эрозии (водоему) и имеющие функциональное назначение.

В теплый сезон года отбирались на водосборах:

- пробы дорожной пыли (или дорожного смета) с проезжей части улицы;
- грунт из верхнего слоя (5 см) на озелененном участке;
- отложения из понижений микрорельефа, поверхностные наносы.

Проба отложений локальных понижений микрорельефа и почвы отбиралась лопатой или совком [19, 20]. Пробы отложений локальных понижений микрорельефа и почвы представляют собой объединенные из проб, отобранных по 3–5 локализациям на данном ландшафтном участке.

На водосборе озера Чемоданчик отбирались:

- три пробы прибрежного грунта на песчаном берегу со стратификацией по 10 см до глубины 30 см; отбирались три параллельных керна на участке берега водоема до глу-

бины 30 см, затем керны разделялись по стратификации по горизонтам 0–10, 10–20 и 20–30 см, пробы из горизонтов объединялись и перемешивались (одна проба представляет собой материал из объединенных трех параллельно отобранных проб из данного горизонта);

- три пробы почвы из придорожного лесопарка объездной автодороги со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы прибрежного грунта на берегу, заросшем травой, со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы грунта из канавы в водосборе на опушке лесопарка со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы почвы из лесопарка в водосборе со стратификацией по 10 см до глубины 30 см,

- одна объединенная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки на дамбе водоема Чемоданчик;

- одна объединенная проба рыхлых наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в кемпинге;

- одна сборная проба наносов из горизонта 0–5 см на обочине объездной дороги;

- одна сборная проба дорожного смета (дорожной пыли) с проезжей части объездной автодороги.

На водосборе озера в Харитоновском саду отбирались:

- три пробы почвы в парке на холме со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- три пробы почвы в парке на склоне со стратификацией по 10 см до глубины 30 см;

- одна сборная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в парке;

- одна сборная проба рыхлых поверхностных наносов из горизонта 0–5 см на участке тропинки в парке вдоль берега водоема;

- одна сборная проба дорожного смета (дорожной пыли) с проезжей части улицы с наружной стороны парка, со стороны селитебной территории;

- одна сборная проба рыхлых наносов из горизонта 0–5 см из локальных понижений микрорельефа в жилом квартале на селитебной территории.

Схема распределения точек геохимического опробования на водосборах представлена в ранее опубликованной работе [22].

Пробы, отобранные на водосборах, сушились при комнатной температуре. Из проб извлекались: бытовой и строительный мусор, крупные ветки, корни, листья, обломки породы. Пробы с водосборов измельчались пестиком с резиновым наконечником, просеивались через сито с диаметром ячеек 3 мм (фракция > 3 мм в анализе не участвовала, поскольку представлена в основном облом-

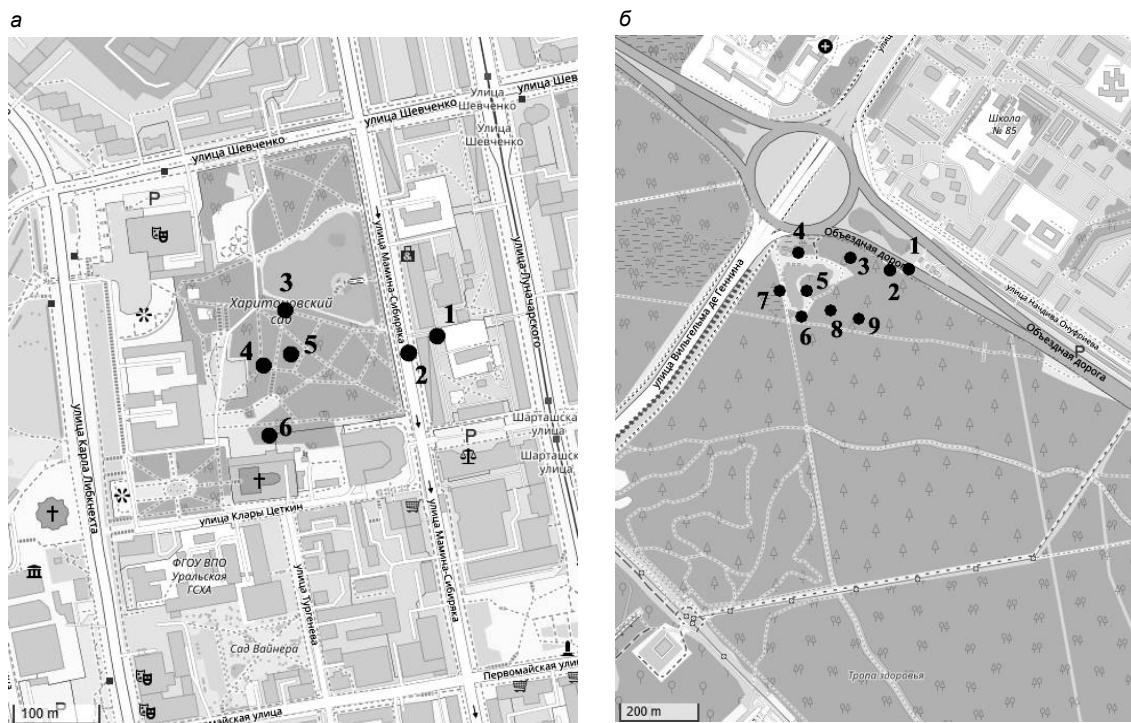


Рисунок 1. Картограммы водосборов с расположением точек отбора проб: а – водосбор водоема в Харитоновском саду (отбирались: 1 – наносы из локальных понижений микрорельефа в жилом квартале на селитебной территории; 2 – дорожная пыль с проезжей части улицы; 3 – наносы с тропинки в парке вдоль берега водоема; 4 – наносы на тропинке в парке; 5 – почва в парке на склоне; 6 – почва в парке на холме); б – водосбор водоема Чемоданчик (отбирались: 1 – дорожная пыль с проезжей части объездной автодороги; 2 – наносы с обочины объездной дороги; 3 – почвы в лесопарке вблизи объездной автодороги; 4 – наносы на тропинке в кемпинге; 5 – прибрежный грунт на берегу, заросшем травой; 6 – прибрежный грунт на песчаном берегу; 7 – наносы с тропинки на дамбе; 8 – грунт из канавы на опушке лесопарка; 9 – почва в лесопарке)

Figure 1. Schematic maps of catchment areas with the location of sampling points: а – catchment area in the Kharytonovskiy garden (the following were selected: 1 – sediments from local microrelief depressions in a residential area; 2 – road dust from the roadway; 3 – sediments from a path in the park along the shore of the reservoir; 4 – sediment on the path in the park; 5 – soil in the park on the slope; 6 – soil in the park on the hill); б – catchment area of the Chemodanchik reservoir (the following were selected: 1 – road dust from the roadway of the bypass road; 2 – sediments from the side of the bypass road; 3 – soils in the forest park near the bypass road; 4 – sediments on the path in the campsite; 5 – coastal soil on the shore, overgrown with grass; 6 – soils at the sandy edge of the pond; 7 – sediment from the path on the dam; 8 – soil from the ditch at the edge of the forest park; 9 – soil in the forest park)

ется до нескольких раз относительно компонентов ландшафтной катены водосбора.

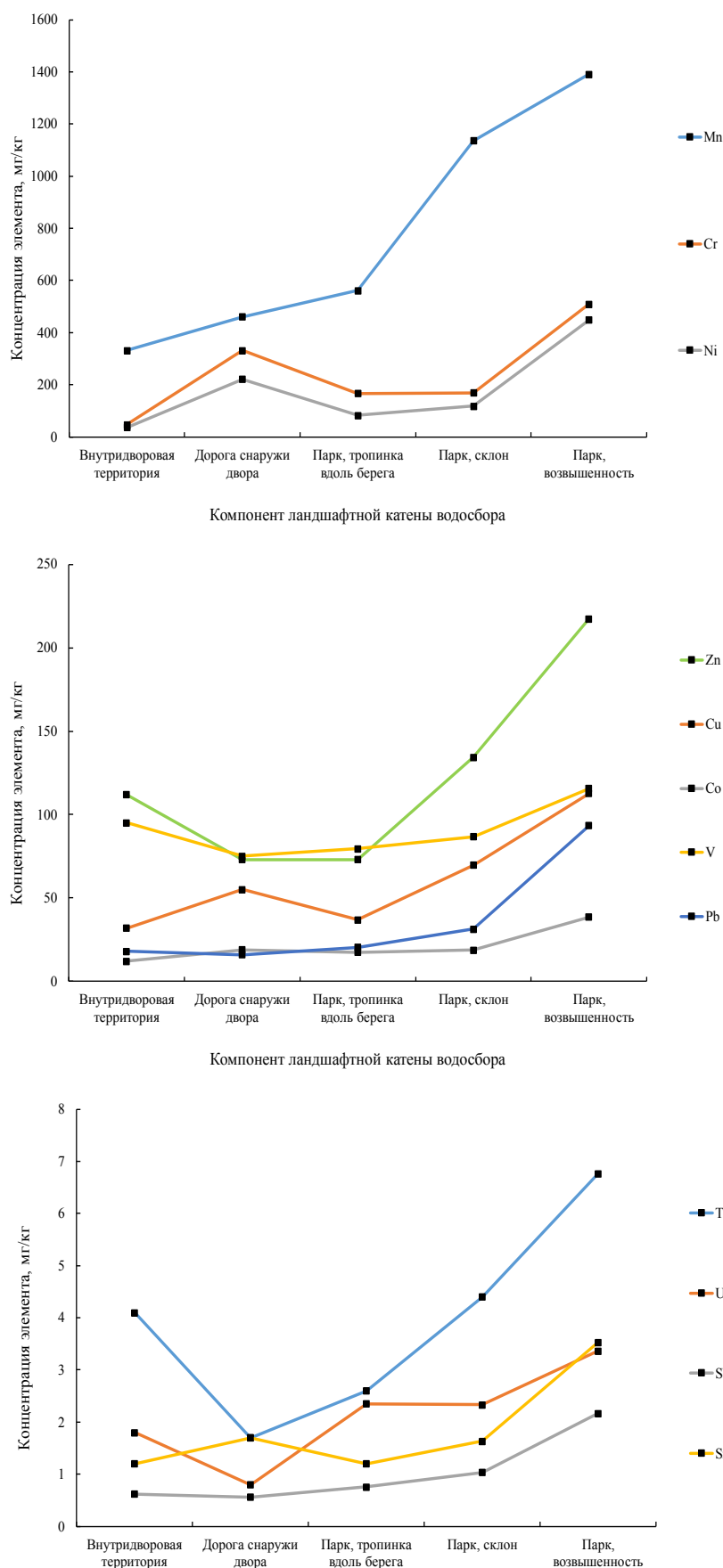


Рисунок 2. Содержание элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера в Харитоновском саду (средняя концентрация)

Figure 2. The content of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of the lake in the Kharitonovsky garden (average concentration)

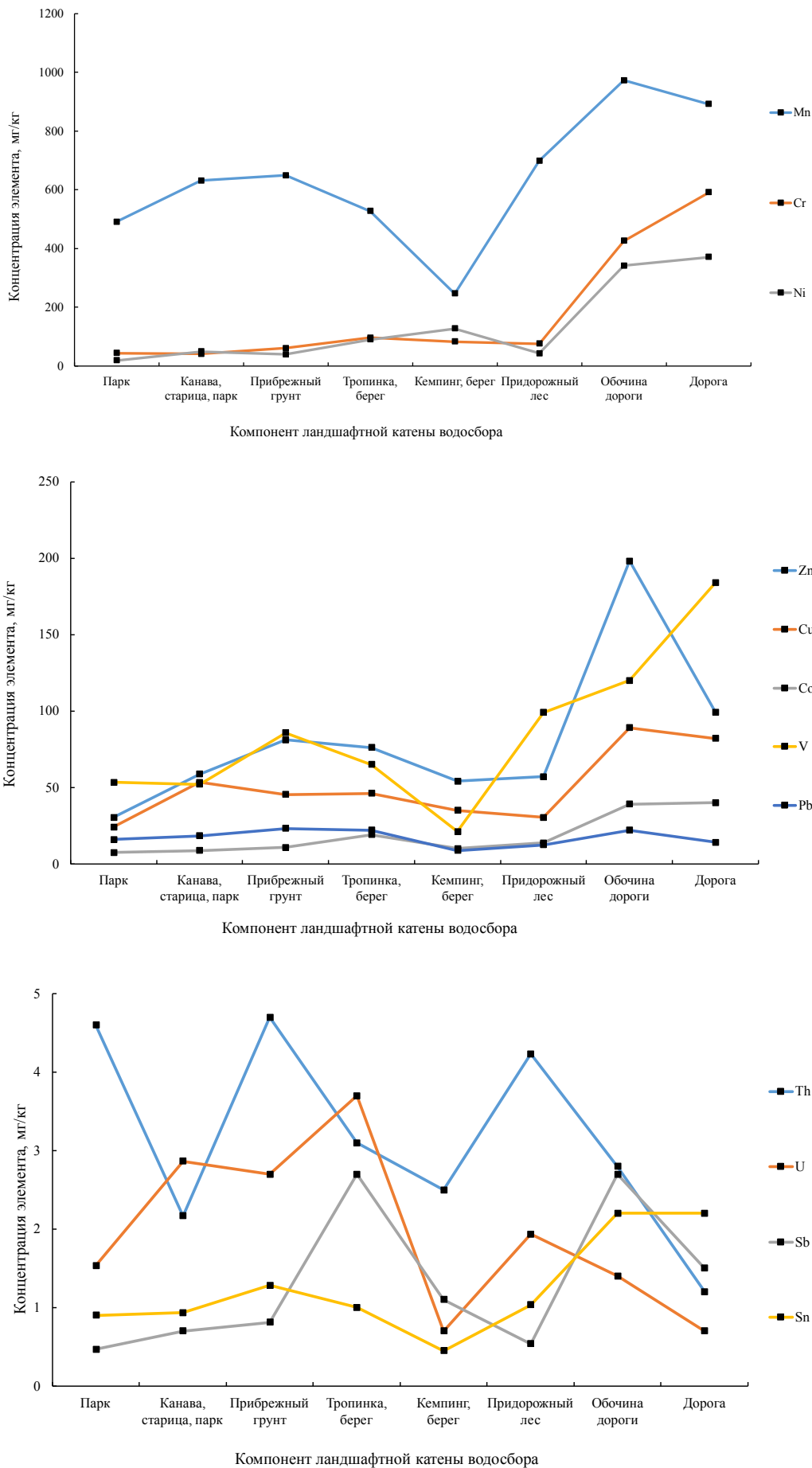


Рисунок 3. Содержание элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера Чемоданчик (средняя концентрация)

Figure 3. The content of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of Lake Chemodanchik (average concentration)

ками породы). Из отобранных проб методом квартования получены представительные: навеска для гранулометрического анализа массой 250 г; навеска для определения элементного состава массой до 50 г.

В зимний период на водоеме в Харитоновском саду и на оз. Чемоданчик отбирались колонки донных отложений. Отбор колонок проводился пробоотборником по типу желонки [22]. Пробы донных отложений отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.01–80, Методике изучения биогеоценозов внутренних водоемов и Методическим рекомендациям по

геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. Колонка донных отложений нарезалась на пробы со стратификацией по 4 см, пробы упаковывались в полиэтиленовые пакеты с исключением поступления воздуха. Образцы донных отложений высушивались при комнатной температуре.

Вещественный анализ проб. Гранулометрический анализ проб с водосборов проводился сухим ситовым разделением материала на фракции: < 0,04 мм, 0,04–0,1 мм, 0,1–1 мм и 1–3 мм (соответственно мелкая и средняя

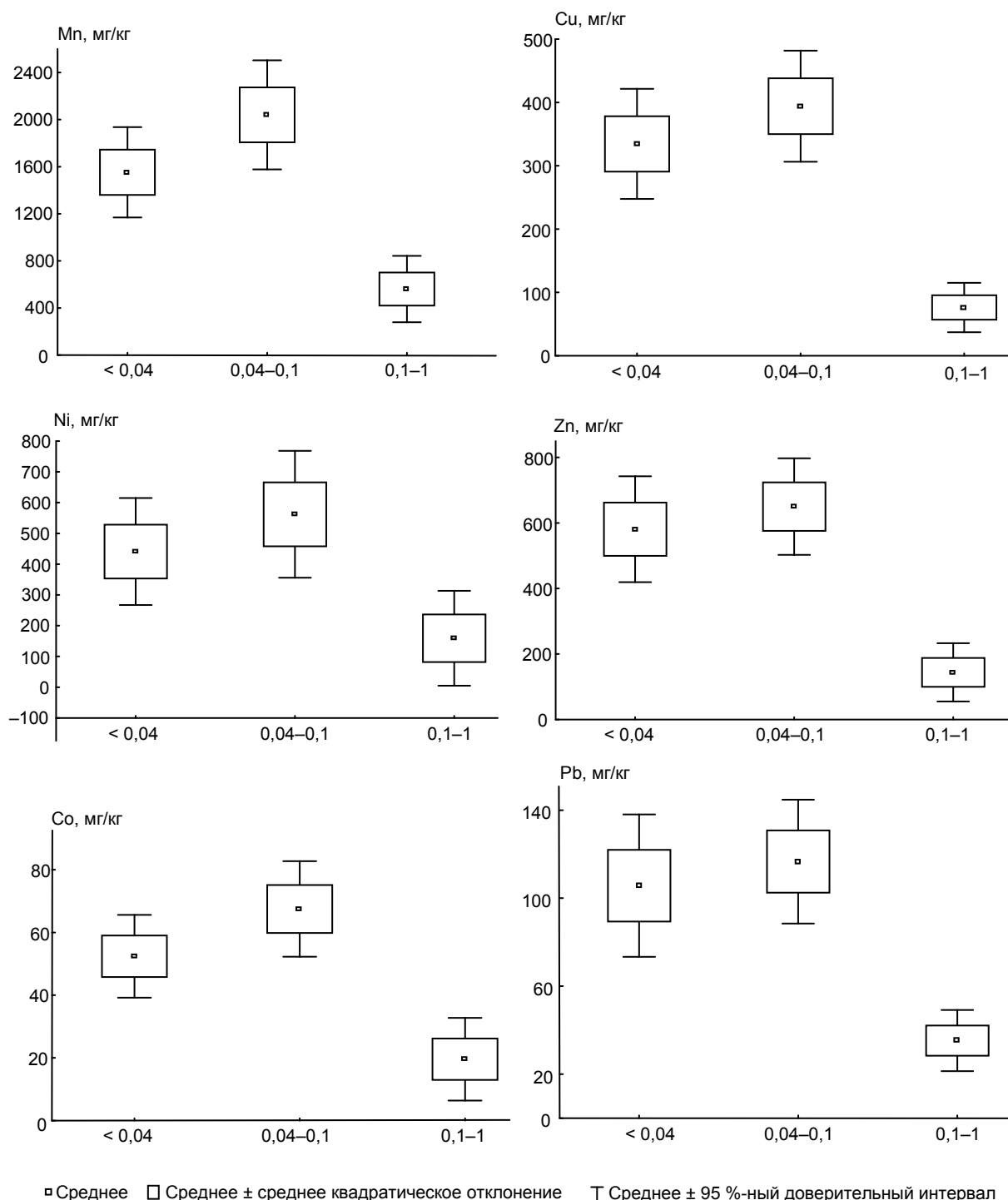


Рисунок 4. Распределение концентрации элементов в компонентах ландшафтной катены водосбора озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик по гранулометрическим фракциям

Figure 4. Distribution of the concentration of elements in the components of the landscape catena of the catchment area of the lake in the Kharitonovsky Garden and Lake Chemodanchik by granulometric fractions

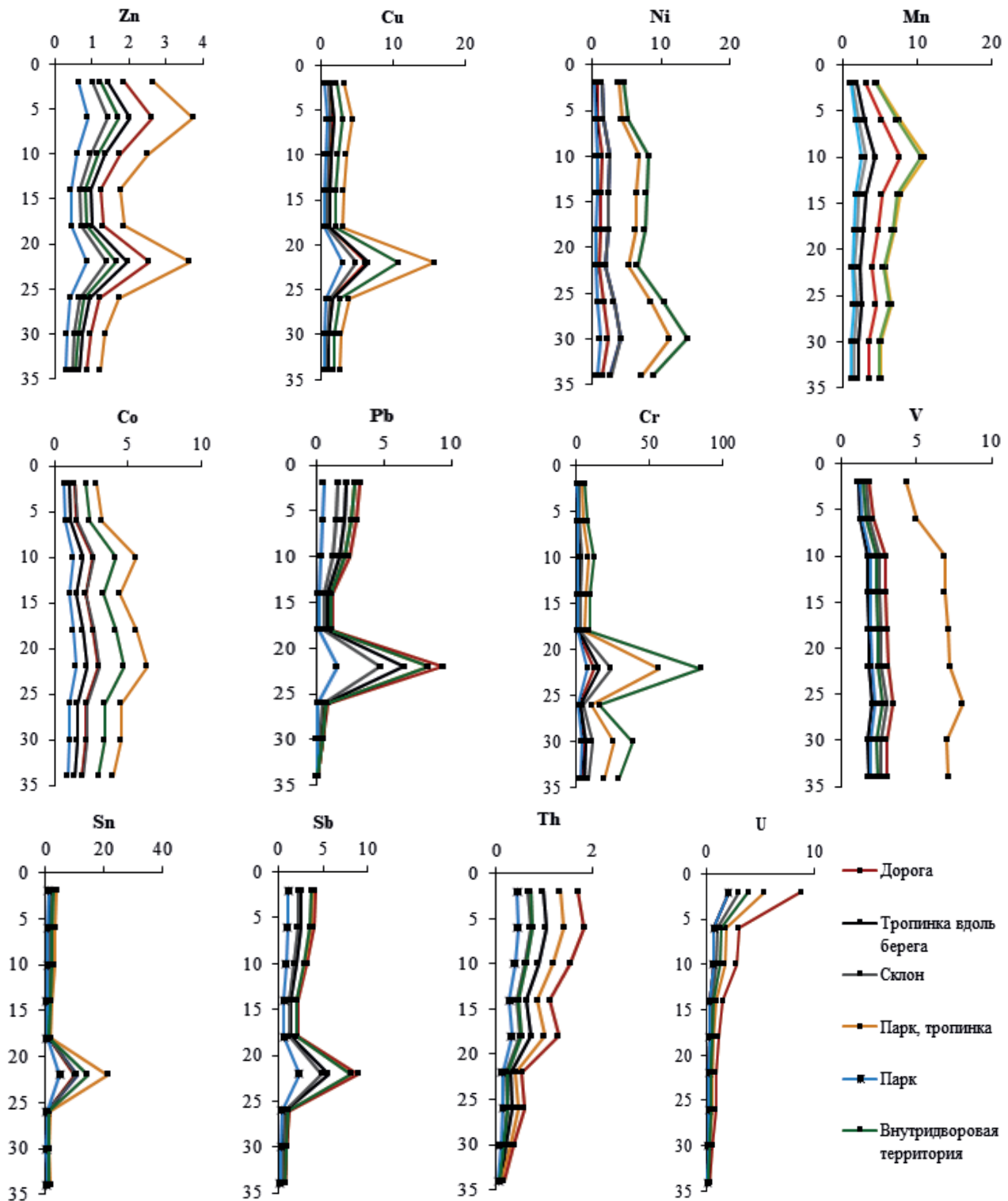


Рисунок 5. Обогащение элементами донных отложений водоема Харитоновского сада относительно транзитных компонентов катены водосбора. По оси абсцисс показана кратность обогащения элементом (количество раз), по оси ординат – глубина донных отложений (сантиметры)
Figure 5. Enrichment in elements of bottom sediments of the Kharitonovsky Garden reservoir relative to the transit components of the catchment area catena. The abscissa shows the enrichment ratio of the element (number of times), the ordinate shows the depth of bottom sediments (centimeters)

пыль, крупная пыль и мелкий песок, песчаная и грубая фракция, представленная в основном обломками породы). Химический анализ проводился на базе ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Определение элементного состава проб проводилось методом масс-спектрометрии с ин-

дуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer (США) согласно Методике определения элементного состава почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами анализа НСАМ № 499-Х.

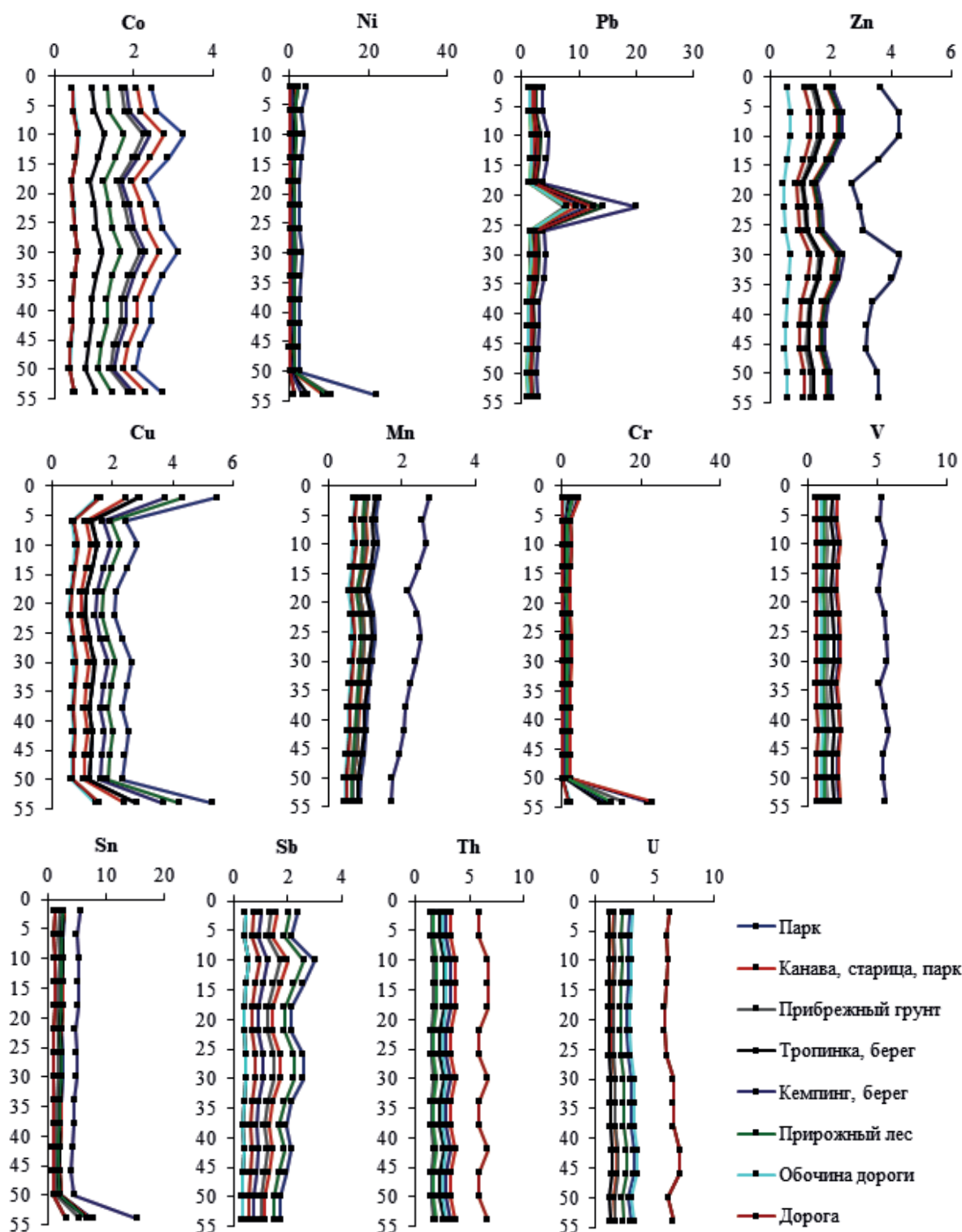


Рисунок 6. Обогащение элементами донных отложений водоема Чегоданчик относительно транзитных компонентов катены водосбора. По оси абсцисс показана кратность обогащения элементом (количество раз), по оси ординат – глубина донных отложений (сантиметры)

Figure 6. Enrichment with elements of bottom sediments of the Chemodanchik reservoir in relation to the transit components of the catchment area catena. The abscissa shows the enrichment ratio of the element (number of times), the ordinate shows the depth of bottom sediments (centimeters)

Результаты

Результаты опробования. На водосборе озера Чегоданчик отобрано 19 проб. На водосборе озера в Харитоновском саду 10 проб. Точки отбора проб на водосборах показаны на картах-схемах на рис. 1. На водоемах было

отобрано 13 колонок с донными отложениями, при разделении по стратификации по 4 см получено 123 пробы донных отложений.

Распределение концентрации элементов в катене водосбора. На рис. 2, 3 представлены распределения

содержания элементов между функциональными ландшафтными зонами в катенах водосборов озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик соответственно. Для элементов из разных ассоциаций (например, поллютантов Pb, Zn и Cu или петрогенной) наблюдаются разные виды распределения концентраций в трансект-катене от внутриводосборной территории к прибрежным грунтам в парке. В водосборах наибольшие концентрации Pb, Zn и Cu наблюдаются в почвах на озелененных участках газонов, в парках и придорожной зоне. Схожий паттерн показывают распределения концентраций Pb, Zn и Cu (относящихся к главным потенциально опасным металлам-загрязнителям в городской среде). Однако паттерн распределения Co, Ni и Mn в компонентах ландшафтной катены водосборов отличается от паттерна потенциально опасных элементов.

Распределение концентраций металлов по гранулометрическому составу в компонентах катены. Распределение концентраций металлов по гранулометрическим фракциям показано на рис. 4. Наблюдается значимое обогащение пылевых фракций < 0,1 мм элементами типоморфной и антропогенной ассоциаций в компонентах водосборов озера Чемоданчик и озера в Харитоновском саду относительно мелкопесчаной фракции 0,1–1 мм. В компонентах катен обогащение достигает для Pb, Zn и Cu до 4 раз, для Ni Mn и Co до 6 раз.

Накопление металлов в донных отложениях. Кратность накопления элементов в слоях донных отложений относительно ландшафтных участков катен водосборов озера в Харитоновском саду и озера Чемоданчик соответственно показана на рис. 5, 6. Величина рассчитывалась как отношение средней концентрации элемента в донных отложениях к средней концентрации в ландшафтном участке. Накопление Pb, Zn и Cu в донных отложениях наблюдается до нескольких раз относительно компонентов ландшафтной катены водосбора.

Обсуждение

Распределение концентрации элементов в катене водосбора. По результатам анализа проб компонентов окружающей среды концентрации элементов имеют высокую вариабельность среди ландшафтных участков водосборов в городе. Вариабельность обусловлена связанностью ландшафтных функциональных зон, неоднородностью поверхностей в трансект-катене. Значительное накопление Zn и Cu происходит в придорожных почвах и грунтах, в материале дорожной пыли, что может говорить об автотранспорте как основном источнике поступления этих элементов. Источником Zn и Cu могут быть трущиеся детали и механизмы автомобилей (тормозные колодки и диски), а источником Pb в компонентах ландшафта – продукты сгорания этилированного бензина, до сих пор остающиеся в грунтах и почвах со времен его использования (этилированный бензин запретили в 1997 г.). После запрета этилированного бензина поступление свинца практически прекратилось, современное распределение концентраций свинца по функциональным участкам ландшафта отражает процесс миграции свинца в окружающей среде.

Следует отметить, что концентрации металлов Pb, Zn и Cu в большинстве компонентов окружающей среды трансект-катен ниже или сопоставимы с фоновыми, определенными для селитебных зон Екатеринбурга ранее [23]; тем не менее

остаются ландшафтные участки, которые имеют высокие концентрации элементов. С помощью подхода трансект-катен можно наблюдать градиент накопления в компонентах окружающей среды и латерального смыва металлов на функциональных участках водосбора. Более высокие концентрации петрогенных элементов (Ni, Co и Mn) наблюдаются в ненарушенных компонентах ландшафта (почвы парковой зоны) и антропогенно сформированных (дорога и ее обочина). Источники элементов типоморфной ассоциации в компонентах ландшафта естественного происхождения и искусственно сформированных на территории г. Екатеринбурга одни и те же. Материал литогенного субстрата Екатеринбурга и окрестностей используется в строительстве, в том числе в дорожном. При латеральном смыве вещества происходит обеднение компонентов ландшафта элементами типоморфной и антропогенной ассоциаций и перенос их в локальный базис эрозии.

Гранулометрический состав. Функциональные участки трансект-катены на водосборах связаны друг с другом, вследствие этого происходит поступление на один участок ландшафта седиментационного материала с соседних. Значительное количество пылевого материала формируется в водосборе на участках с плохим покрытием: внутри кварталов это участки грунтов, кучи стройматериалов, газоны с низким проективным покрытием травами и незапечатанные почвы. Пылевой материал формируется на автодорогах и затем переносится на колесах автотранспорта. Также пылевые частицы переносятся в результате стока атмосферных осадков в результате склоновых процессов в парковой зоне города. Распределение по гранулометрическим фракциям концентраций элементов в водосборах урбанизированной территории соответствует полученному ранее распределению металлов по гранулометрическим фракциям в компонентах селитебной зоны города [24]. На пылевых частицах в водоем попадает значительная часть седиментационного материала с водосбора.

Накопление металлов в донных отложениях. Максимальные кратности накопления элементов Pb, Zn и Cu в водоеме Харитоновского парка наблюдаются в горизонте донных отложений 20–24 см. Этот горизонт примерно соответствует времени формирования около чернобыльских выпадений, что может быть подтверждено по содержанию техногенного радиоактивного изотопа цезий-137 в отложениях [22]. Cs-137, Pb, Zn и Cu поступали в виде атмосферных выпадений, а также в составе материала наносов при эрозии верхнего слоя грунта в водоем. Накопление элементов различных ассоциаций в донных отложениях происходило в разное время их формирования.

Обогащение донных отложений петрогенными элементами (в частности Ni) показательно. В более низких горизонтах донных отложений обогащение Ni увеличивается в обоих водоемах, по-видимому, это связано с тем, что там отложения представлены в основном материалом литогенного субстрата, или же в случае искусственного формирования водоемов дно отсыпалось строительными материалами (что подтверждается визуально при отборе проб донных отложений).

Анализ кратности накопления элементов позволяет заключить, что основным механизмом переноса элементов в системе «водоем и его водосбор» является очищение склоновых ландшафтов за счет современных седимента-

ционных процессов и плоскостного смыва частиц (эрозия верхнего слоя грунтов), а также выпадения из атмосферы. При этом в системе «водоем и его водосбор» кратность накопления элементов в отдельных горизонтах донных отложений водоемов может достигать десяти раз относительно разных участков водосбора.

Заключение

Проведенное эколого-геохимическое исследование системы «водоем и его водосбор» с использованием бассейнового принципа показало различные виды распреде-

ления концентраций элементов техногенной и петрогенной ассоциаций в компонентах водосбора. Распределения концентраций показывают тенденцию переноса вещества различного происхождения из компонентов ландшафта латеральными миграционными потоками в локальный базис денудации (бессточный поверхностный водоем). При этом в донных отложениях водоема происходит многократное накопление как поллютантов, так и элементов типоморфной ассоциации. Пылевые фракции являются основной транспортирующей веществом средой в водосборах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-35-60011. Лабораторные анализы проведены с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 075-15-2021-680. Работа Окуновой Т. Г. поддержана государственным заданием ИГГ УрО РАН, тема № ААА-А-А18-118053090045-8.

Вклад авторов: Окунова Т. Г. и Киселева Д. В. – проведение элементного анализа; Селезнев А. А. – концептуализация, обработка и анализ данных, разработка методологии, полевые исследования, написание текста статьи, подготовка рисунков и таблиц; Ярошенко И. В. и Малиновский Г. П. – полевые исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area // *Journal Soils & Sediments*. 2004. № 4 (4). P. 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
2. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода–взвешенное вещество–донные отложения речных экосистем: аналит. обзор. Новосибирск: ИВЭП СО РАН, 2001. 58 с.
3. Янин Е. П. Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка). М.: ВИНТИ, 2013. 196 с.
4. Слукковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // *Труды Карельского научного центра РАН*, 2017. № 10. С. 45–63. <https://doi.org/10.17076/lim618>
5. Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Mercury Pollution of Lake Imandra Sediments, the Murmansk Region, Russia // *International Journal of Environmental Research*. 2018. Vol. 12(6). P. 939–953. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0149-0>
6. Павлова А. С., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Терентьев П. М., Кашулина Т. Г., Даувальтер В. А. Распределение химических элементов между компонентами экосистемы арктического озера Большой Вудъявр (Хибины, Мурманская область) // *Сибирский экологический журнал*. 2019. № 3. С. 348–366. <https://dx.doi.org/10.15372/SEJ20190311>
7. Remor M. B., Sampaio S. C., de Rijk S., Boas M. A. V., Gotardo J. T., Pinto E. T., Schardong F. A. Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski // *International Journal of Sediment Research*. 2018. Vol. 33. Issue 4. P. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.04.009>
8. Shi X., Sang L., Wang X. C., Jin P. Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 351. P. 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.096>
9. Wang W., Bai J., Zhang G., Jia J., Wang X., Liu X., Cui B. Occurrence, sources and ecotoxicological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment cores from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China // *Chemosphere*. 2019. Vol. 218. P. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.046>
10. Янин Е. П. Формы нахождения тяжелых металлов в техногенных речных илах // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 11. С. 54–59.
11. Дрюпина Е. Ю., Эйрих А. Н., Эйрих С. С., Папина Т. С. Пространственно-временная динамика содержания загрязняющих веществ в коммунальных и смешанных сточных водах Барнаула // *Известия Алтайского государственного университета*. 2014. № 3-1(83). С. 182–187. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2014\)3.1-33](https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.1-33)
12. Шешнев А. С. Сезонная динамика химического состава вод овражно-балочных систем городских территорий (на примере Саратова) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 7. С. 7–14. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2714>
13. Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context // *Geomorphology*. 2006. Vol. 79. Issues 3–4. P. 460–487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
14. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment // *Environmental Technology & Innovation*. 2014. Vol. 1–2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.08.001>
15. Crosby C. J., Fullen M. A., Booth C. A., Searle D. E. A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK) // *Journal of Applied Geophysics*. 2014. Vol. 105. P. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.006>
16. Amato F., Pandolfi M., Escrig A., Querol X., Alastuey A., Pey J., Perez N., Hopke P.K. Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2 // *Atmospheric Environment*. 2009. Vol. 43. Issue 17. P. 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
17. Chen J., Wang W., Liu H., Ren L. Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2012. Vol. 184. P. 1693–1709. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2071-1>
18. Varrica D., Dongarrà G., Sabatino G., Monna F. Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy // *Environmental Geology*. 2003. Vol. 44. P. 222–230. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0748-Z>
19. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 1. P. 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062>
20. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge // *Environmental Processes*. 2019. Vol. 6. P. 581–595. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w>
21. Устинов М. Т. Катенография и эколого-мелиоративная оценка почвенного покрова методом трансект-катен // *Сибирский экологический журнал*. 2001. Т. 8. № 3. С. 285–291.
22. Селезнев А. А., Рянская А. Д., Окунова Т. Г., Ярошенко И. В., Малиновский Г. П. Геохимические характеристики компонентов окружающей среды водосборов и малых водоемов урбанизированной среды // *Геология, география и глобальная энергия*. 2022. № 3(86). С. 137–156. https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_137
23. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Sergeev A. P. ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 142. P. 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.01.001>
24. Селезнев А. А. Тяжелые металлы в поверхностном грязевом осадке города Екатеринбурга // *Известия УГГУ*. 2018. Вып. 1(49). С. 46–54. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-46-54>

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2022 года

Distribution and accumulation of heavy metals in the catchment catenary complex and bottom sediments of the water body in an urban environment

Andrian Anatol'evich SELEZNEV^{1*}

Tat'yana Gennad'evna OKUNEVA^{3**}

Il'ya Vladimirovich YARMOSHENKO^{2***}

Georgiy Petrovich MALINOVSKIY^{2****}

Gar'ya Vladimirovna KISELEVA^{1,3*****}

¹Ural Federal University name after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

³The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Problem Statement. The pollutant intake into water bodies is one of the issues of urban areas. The pollutant input from the residential area of the city with surface runoff can many times exceed the input of pollutants from industrial and recreational areas, as well as from point pollutant sources.

The objective of the study is 1) assess the distribution of chemical elements in catchments of water bodies in an urbanised area, 2) accumulation of chemical elements in solid matter of bottom sediments of surface water bodies with catchments in the functional areas of the city, 3) identify the main mechanisms of transfer of elements in solid matter from catchments to water bodies. The study was conducted on the example of Ekaterinburg (Russia).

The material for the study consisted of the results of a landscape environmental and geochemical survey carried out in the city area in 2019–2021.

Results. The distributions of element concentrations between functional landscape zones in the catenaries of the Kharitonovsky Garden and Chemodanchik reservoir catchments in Ekaterinburg were obtained. The distributions of metal concentrations in the catchment components show a tendency for the transfer of substance of different origin from the landscape components by lateral migration flows to the local basis of denudation (a drainless surface water body). At the same time in the bottom sediments of the reservoir there is a multiple accumulation of both pollutants and elements of typomorphic association. Dust fractions are the main carrier of contaminants in catchments.

Keywords: urban environment, waterbody, catchment, catena, metals.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 19-35-60011. Laboratory analyzes were carried out using the equipment of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences. The retrofitting and comprehensive development of the Common Use Center Geoanalyst of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2021-680. The work of T. G. Okuneva was supported by the state task of the IGG UB of the Russian Academy of Sciences, topic No. AAAA-A18-118053090045-8.

REFERENCES

1. Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. 2004, Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. *Journal Soils & Sediments*, no. 4 (4), pp. 247–260. <https://doi.org/10.1007/BF02991121>
2. Papina, T. S. 2001, Transport and features of the distribution of heavy metals in the series: water–suspended matter–bottom sediments of river ecosystems: analyt. review. Novosibirsk, 58 p. (*In Russ.*)
3. Yanin E. P. 2013, Technogenic river silts (material composition, geochemical features, environmental assessment). Moscow, 196 p. (*In Russ.*)
4. Slukovsky Z. I., Ilmast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. 2017, The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small lake Lamba under technogenic impact. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 10, pp. 45–63. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.17076/lm618>
5. Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. 2018, Mercury Pollution of Lake Imandra Sediments, the Murmansk Region, Russia. *International Journal of Environmental Research*, vol. 12 (6), pp. 939–953. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0149-0>
6. Pavlova A. S., Kashulin N. A., Denisov D. B., Terentiev P. M., Kashulina T. G., Dauval'ter V. A. 2019, Distribution of chemical elements between the components of the ecosystem of arctic lake Bolshoy Vud'yavr (Khibiny, Murmansk oblast). *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], no. 3, pp. 348–366. (*In Russ.*) <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20190311>
7. Remor M. B., Sampaio S. C., de Rijk S., Boas M. A. V., Gotardo J. T., Pinto E. T., Schardong F. A. 2018, Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski. *International Journal of Sediment Research*, vol. 33, issue 4, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.04.009>

✉ sandrian@rambler.ru

**okunevatatjana@mail.ru

***ivy@ecko.uran.ru

****georgiy@ecko.uran.ru

*****podarenka@mail.ru

8. Shi X., Sang L., Wang X. C., Jin P. 2018, Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems. *Chemical Engineering Journal*, vol. 351, pp. 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.096>
9. Wang W., Bai J., Zhang G., Jia J., Wang X., Liu X., Cui B. 2019, Occurrence, sources and ecotoxicological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment cores from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China. *Chemosphere*, vol. 218, pp. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.046>
10. Yanin E. P. 2016, The department of heavy metals in technogenic silts of the river. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 11, pp. 54–59. (In Russ.)
11. Dryupina E. Yu., Eirikh A. N., Eirikh S. S., Papina T. S. 2014, Spatiotemporal dynamics of pollutants content in municipal and mixed wastewaters of Barnaul. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the Altai State University], no. 3-1 (83), pp. 182–187. (In Russ.) [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2014\)3.1-33](https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)3.1-33)
12. Sheshnev A. S. 2020, Seasonal dynamics of chemical composition of waters from gully systems in urban areas (by the example of Saratov). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering], vol. 331, no. 7, pp. 7–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2714>
13. Chin A. 2006, Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, vol. 79, issues 3–4, pp. 460–487. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.033>
14. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V. 2014, Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment. *Environmental Technology & Innovation*, vol. 1–2, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.08.001>
15. Crosby C. J., Fullen M. A., Booth C. A., Searle D. E. 2014, A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK). *Journal of Applied Geophysics*, vol. 105, pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.006>
16. Amato F., Pandolfi M., Escrig A., Querol X., Alastuey A., Pey J., Perez N., Hopke P.K. 2009, Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, vol. 43, issue 17, pp. 2770–2780. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
17. Chen J., Wang W., Liu H., Ren L. 2012, Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 184, pp. 1693–1709. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2071-1>
18. Varrica D., Dongarrà G., Sabatino G., Monna F. 2003, Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy. *Environmental Geology*, vol. 44, pp. 222–230. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0748-Z>
19. Seleznev A., Rudakov M. 2019, Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062>
20. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. 2019, Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge. *Environmental Processes*, vol. 6, pp. 581–595. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w>
21. Ustinov M. T. 2001, Catenography and ecological and reclamation assessment of the soil cover by the transect-caten method. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], vol. 8, no. 3, pp. 285–291. (In Russ.)
22. Seleznev A. A., Ryanskaya A. D., Okuneva T. G., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. 2022, Geochemical characteristics of the environmental components of catchments and small water bodies in an urban environment. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, geography and global energy], no. 3 (86), pp. 137–156. (In Russ.) https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_137
23. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Sergeev A. P. 2015, ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 142, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.01.001>
24. Seleznev A. A. 2018, Heavy metals in surface mud sediment in Ekaterinburg (Russia). *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], issue 1 (49), pp. 46–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-46-54>

The article was received on November 22, 2022