

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-84-97>  
УДК 550.4:551.3(476.7)

Поступила в редакцию 10.11.2023  
Received 10.11.2023

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРУДОВ г. НЕСВИЖА

Ю. А. Романкевич

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Представлены результаты геохимических исследований донных отложений русловых прудов г. Несвижа. Рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях и взаимосвязи элементов в системе донные отложения – почва в условиях города.

Установлены приоритетные в обогащении элементы (Cr, Cd и Zn). Выявлены две ассоциации тяжелых металлов (ТМ), характерные для донных отложений города (Cu–Zn–Ni и Cd–Pb). Отмечено образование сильных корреляционных связей в формировании ассоциаций как в донных отложениях, так и в почвах (Cu–Zn). Определена связь ассоциации Cu–Zn–Ni и зольности.

Рассчитаны факторные нагрузки. Установлены факторы, ответственные за формирование техногенной обстановки: выбросы от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде, а также от дорожного транспорта и передвижных источников. Построена картосхема факторных нагрузок.

**Ключевые слова:** донные отложения; тяжелые металлы; геохимические коэффициенты; непараметрические методы исследований.

**Для цитирования.** Романкевич Ю. А. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 84–97.

## DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN BOTTOM SEDIMENTS OF PONDS OF NESVIZH CITY

J. A. Ramankevich

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The results of geochemical studies of bottom sediments of riverbed ponds in the city of Nesvizh are presented. The features of the distribution of heavy metals (HM) in bottom sediments and the relationship of elements in the bottom sediments – soil system in urban conditions are considered.

Characteristic of the city's bottom sediments (Cu–Zn–Ni and Cd–Pb) have been identified. The formation of strong correlations in the formation of associations in both sediments and soils (Cu–Zn) was noted. The association of Cu–Zn–Ni and ash content is determined.

Factor loads are calculated. The factors responsible for the formation of a man-made environment have been identified: emissions from non-industrial combustion plants in residential buildings, as well as from road transport and mobile sources. A cartographic diagram of factor loads has been constructed. The interpretation of geochemical data has been performed.

**Keywords:** urban soils; heavy metals; geochemical data; nonparametric research methods.

**For citation.** Ramankevich J. A. Distribution of heavy metals in bottom sediments of ponds of Nesvizh city. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 84–97.

**Введение.** Основные закономерности условий, протекания процессов и формирования продуктов аллювиального литогенеза с геохимических позиций были сформулированы в 1960–70-е годы и освещены в работах В. А. Кузнецова, А. А. Лазаренко, Б. С. Лунева и Н. М. Страхова, Ю. В. Шумилова и др. [1–5 и др.]. Процессы аллювиальной миграции и аккумуляции вещества изложены также в работах М. А. Глаголевой, Г. С. Коновалова, Н. Т. Кузнецова, А. И. Перельмана, С. Л. Шиманович и др. Авторами установлено, что масштабы переноса вещества в различных состояниях (в растворенном, взвешенном и влекомом) и их взаимопереходы определяются гидрологией потока, геологическим и геоморфологическим строением, климатом, а также характером распространения растительного и почвенного покровов [1–5 и др.].

В. А. Кузнецовым, А. А. Лазаренко и др. установлено, что закономерности аллювиального литогенеза определяют степень концентрации, формы нахождения и парагенезисы химических элементов в связи с их миграцией в речных водах и взвесах, с осаждением и накоплением в осадках, ходом природных химических реакций, а также с геохимическими факторами и условиями литогенеза [1, 2, 4].

Н. М. Страховым сформулированы положения теории литогенеза в направлении понимания процессов миграции и аккумуляции химических элементов в речных долинах. Отмечается значительная роль миграции элементов в соединениях с органическим веществом. Показано, что формы миграции химических элементов определяются их физико-химическими свойствами, а также физико-географическими условиями водосборной территории.

Большой вклад в изучение естественных закономерностей аллювиального литогенеза на территории Беларуси в этот период внесли В. А. Кузнецов, Л. И. Матрунчик и многие другие исследователи [1, 2 и др.]. Были описаны аллювиальные отложения Беларуси, выявлены геохимические различия между бассейнами крупнейших рек (Днепр, Припять, Неман, Западная Двина) и др. Изучены аллювиальные комплексы отложений земной коры Беларуси в контексте их металлоносности. Велись исследования в направлении изучения форм нахождения, миграции и распространения микроэлементов в аллювии.

В дальнейшем, в 1980–90-е годы, получило развитие направление в области изучения техногенного воздействия на долинные ландшафты. С геохимических позиций В. К. и К. И. Лукашёвыми, а также К. П. Воскресенским классифицируются техногенные источники и факторы, влияющие на процессы седиментогенеза и геохимические аспекты литогенеза в речных долинах: сооружение водохранилищ и прудов, перераспределение речного стока между бассейнами, мелиорация земель, урбанизация, горные выработки, агротехнические и лесомелиоративные мероприятия, тепловые загрязнители, транспорт, промышленные предприятия [5, 6].

В числе геохимических последствий проявлений урбанизации В. К. и К. И. Лукашёвы выделяют увеличение минерализации речных вод, рост концентрации в водах поверхностного стока кислот, органических веществ, солей, металлов, нефтепродуктов и др. [5, 6]. Авторами установлена связь между формированием техногеохимических ореолов рассеяния и аномалий с залповыми сбросами в речную сеть промышленных и бытовых отходов; постепенным накапливанием химических элементов и соединений, поступающими в речную сеть в малых концентрациях и аккумулируемых в осадках; концентрированием элементов в долине веществами, являющимися активными адсорбентами и органоминералообразователями. Отличительными чертами таких ореолов и аномалий являются пространственная связь с городами, промышленными центрами и другими местами техногенной активности, наличие химических элементов и соединений, не свойственных природной окружающей среде [5, 6].

Ю. Е. Саёт и др. выделяют по речным донным осадкам техногеохимические ореолы для крупных (Cr, Ni, Be, Sr, V и Hg, Cu, Zn, Bi) и малых городов (Zn, Sn, B, Br), а также поселков (Bi, Sr, Mn, Mo, Ag) и свалок (Pb, Ni, Sr, Be и Co, Sn). Показано, что ассоциации элементов зависят от характера промышленного производства, положения места опробования в речной долине при максимальных концентрациях техногенных элементов в донных осадках замкнутых водоемов и тыловой части поймы [7].

Известны работы Е. П. Янина, посвященные роли техногенеза в формировании состава речных отложений. Автором изучены источники и пути поступления загрязняющих веществ в реки и речные илы урбанизированных районов, среди важнейший из которых отмечен поверхностный сток [8]. Отдельные публикации посвящены поведению в окружающей среде тяжелых металлов (ТМ), также скандия, ртути и фтора. Кроме того, в качестве загрязнителей изучены платиновые металлы, органические поллютанты, асбест, тальк, радионуклиды и др.

Вопросам техногенного загрязнения донных осадков и речных долин в целом посвящены работы О. В. Лукашёва, В. В. Савченко и др. [9–11]. С помощью многомерных статистических методов этими авторами выделены естественные ассоциации химических элементов. Установлена связь между составом ассоциаций донных отложений с гранулометрической дифференциацией вещества, органическим веществом и вхождением элементов в одни и те же минералы [9, 10].

Эколого-геохимическое изучение заповедных территорий Беларуси – еще одно направление для исследования процессов миграции и аккумуляции химических элементов в условиях природного эталона, которое активно развивалось в 1980-е годы под руководством К. И. Лукашёва. В 2007–2010 гг. результаты исследований пяти разновременных этапов программы комплексного геохимического мониторинга Березинского биосферного заповедника были обобщены О. В. Лукашёвым, В. М. Натаровым, В. В. Савченко и др. Установлено, что антропогенное воздействие на природные системы заповедника продолжает оставаться на уровне фонового загрязнения. Выявленные пространственно-временные вариации химического состава компонентов экосистем заповедника в основном обусловлены естественными причинами и с геохимических позиций могут продолжаться рассматриваться как эталонные [9, 11].

Таким образом, в последние десятилетия многие авторы обращались к проблеме индикаторной роли донных отложений в оценке загрязнения водных экосистем [8, 11, 12 и др.]. Современные донные осадки рассматриваются как депонирующая среда для микроэлементов, накопление которых связано с изменением механических, физико-химических и биологических условий седиментации, а также поступлением техногенных веществ. Формирование микроэлементного состава осадков водоемов определяется ландшафтной структурой и освоенностью водосбора, литолого-петрографическими и геохимическими особенностями его пород, уровнем продукционно-деструкционных процессов в водоеме, его морфометрическими параметрами, т. е. всеми факторами, контролирующими седиментацию органического и минерального веществ. Загрязняющие компоненты поступают в водные системы в растворенной форме и в виде взвешенных частиц с локальными сбросами, а также в составе стока с водосборных территорий.

Представляется, что анализ накопления микроэлементов в донных осадках водоемов обусловлен техногенной обстановкой на водосборе и согласуется с результатами исследования почвенного покрова, что позволит повысить уровень понимания процессов миграции и аккумуляции веществ в условиях урбанизированных пространств.

Цель работы – выявить особенности накопления и пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа. Объектом изучения стали донные отложения, представленные илами.

Исследования донных отложений водоемов г. Несвижа являются составной частью комплексных эколого-геохимических исследований малого города [13, 14]. Ранее было установлено, что приоритетными источниками загрязнения вод русловых прудов на территории г. Несвижа являются воды р. Уши, подземный и поверхностный сток, в меньшей степени влияют воды мелиоративных каналов, ручьев и технологических водоемов. На основании анализа данных за 50-летний период установлен факт ухудшения качества поверхностных вод, проявившийся в обогащении их макрокомпонентами, а также загрязнении биогенными веществами. Доказано, что качество вод в водоемах и водотоках обусловлено техногенной нагрузкой на их водосборы, основным фактором формирования которой является сельскохозяйственный [13]. Концентрации в водах прудов Ni (0,8–1,8 мкг/л), Cr (<2,00–2,00 мкг/л), Pb (3,3–8,8 мкг/л), Zn (2,6–9,7 мкг/л) и Cd (0,6–1,1 мкг/л) свидетельствуют об их обогащении данными металлами. Концентрация Cu (0,9–2,8 мкг/л) в отдельных точках отбора указывает на загрязнение илов, которое связано с подземным и поверхностным стоком.

Согласно распределению ТМ в почвенном покрове г. Несвижа [14], определены приоритетные в накоплении элементы: Pb, Cd, Cr и Zn. На основании пространственного распределения показателей  $Z_c$  прослежена закономерность в распределении нагрузок: центр – периферия, когда точки со значениями, соответствующими незагрязненным участкам, тяготеют к окраинам города, а показатели, соответствующие умеренно опасному и опасному уровню загрязнения, – к центральной части города. Установлено достоверное распределение Cr, Cu и Zn при разделении выборок данных в соответствии с функциональным зонированием.

На основании факторного анализа выявлены две ассоциации, а также идентифицированы техногенные источники, ответственные за их образование. Так, ассоциация по первому фактору (Ni–Cr–Cd) образована в результате эмиссии выбросов ТМ от дорожного транспорта и других передвижных источников, при этом распределение нагрузок от выбросов автотранспорта в пространстве города представлено более контрастно в диапазоне положительных и отрицательных значений, тяготеет к основным дорогам. Ассоциация по второму фактору (Cu–Zn–Pb) связана с непромышленными установками в жилом фонде, которые, в свою очередь, формируют менее контрастную нагрузку, при этом имеют выраженное площадное распространение. Анализ радиального распределения ТМ по профилю почвы позволил сделать вывод о роли загрязненных грунтов в качестве третьего значимого фактора в формировании техногенной нагрузки на почвенный покров города [14].

**Характеристика района исследований.** Район исследования приурочен к низменным ландшафтам речных долин, основной водной артерией которого является р. Уша – левый приток р. Неман, с истоком у западной окраины д. Качановичи Несвижского района Минской области. В г. Несвиже и его окрестностях на р. Уше созданы речные (русловые) пруды. Систему прудов образуют общающиеся водоемы с перепадом высот в один метр: Дикий, Замковый, Бернардинцев, Девичий и Альбянский, созданные в XVI в. путем перегораживания русла р. Уши [15] (рис. 1).

**Водосбор.** Протяженность каскада Несвижских прудов составляет 6,5 км. Площадь водосборной территории – 17 км<sup>2</sup>. Значительная ее часть приходится на городскую территорию (113, 5 га; 84 %). Поверхность водосборной территории представляет собой всхолмленную, сильнопересеченную равнину, характеризующуюся залесенностью, около 10 %, заболоченностью на уровне 4–11 % и распаханностью около 50 %.

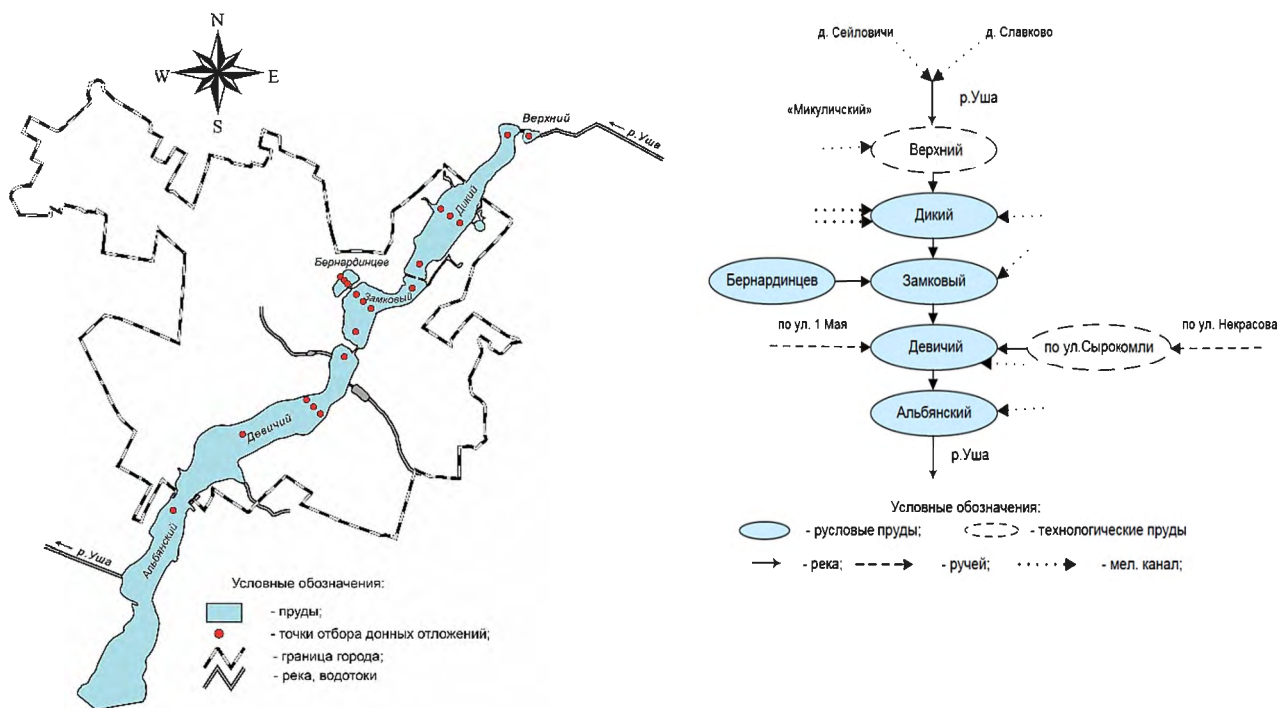


Рис. 1. Объект исследований – пруды г. Несвижа

Fig. 1. Object of the research – ponds of Nesvizh

Бассейн верхнего течения р. Уши находится в зоне сочленения Столбцовской моренной равнины и Копыльской конечно-моренной возвышенности. Согласно геоморфологической карте, в составе покровных отложений здесь преобладают моренные и конечно-моренные супеси и суглинки сожского оледенения (g,gtlls), перекрываемые на отдельных участках флювиогляциальными песками и супесями (flIsz<sup>s</sup>). Выше города расположен крупный болотный массив «Каролино» площадью 2,1 тыс. га, северная его часть осушена и используется под пашню и сенокосы.

**Почвы.** Согласно созданной ретроспективной карте [16], естественный почвенный покров водосбора представлен:

– дерново-подзолистыми местами эродированными почвами преимущественно супесчаными на связных супесях, с глубины 0,4–1,0 м подстилаемыми моренными связными, реже рыхлыми песками или моренными суглинками;

– дерново-подзолистыми заболоченными преимущественно суглинистыми, реже супесчаными на легких пылеватых суглинках, местами с намытым верхом, реже на связных песчанисто пылеватых водно-ледниковых супесях, местами с намытым верхом, с глубины 0,3–0,9 м подстилаемые моренными суглинками, редко водно-ледниковыми рыхлыми песками.

Менее распространенными являются дерновые заболоченные почвы, представленные одной почвенной разновидностью, а также торфяно-болотные низинные почвы.

**Аллювиальные отложения.** В соответствии с основными литолого-геохимическими особенностями современных аллювиальных отложений Центральной провинции, к которой приурочен бассейн р. Уши, район исследований расположен в пределах Белорусской гряды и прилегающей к ней Копыльской возвышенности. Состоит он преимущественно из моренных и лёссовых отложений, находящихся в разнообразных сочетаниях с осадками флювиогляциального, болотного и другого генезиса. Значительное распространение имеют также торфяные накопления. Согласно геохимическому индексу, они характеризуются среднекарбонными концентрациями Cr (0,95), Cu (0,94), среди накапливающихся элементов – Ni (1,35) [5].

Основную нагрузку на водосбор формирует аэротехногенный фактор, обеспечиваемый выбросами от сжигания топлива; также важным фактором загрязнения городской среды является агротехногенный [14].

**Методика.** В ходе исследований были отобраны пробы донных отложений в русловых прудах города – Верхнем, Диком, Замковом, Бернардинцев, Девичьем и Альбянском – в количестве 37 шт. Основное внимание было сосредоточено на прудах, водосборы которых расположены преимущественно в пределах городских территорий. Точки отбора закладывались по поперечным профилям (1 проба в центральной части пруда и 2 пробы в прибрежных зонах), а также в верхних и приплотин-

ных частях водоемов (см. рис. 1). Отбор проб производили с лодки ручной драгой. Объединенную пробу донных отложений формировали из трех индивидуальных проб, отобранных на расстоянии 5–10 м друг от друга. Глубина отбора составляла 0–20 см. Донные отложения представлены илами, в разной степени обогащенными органическим веществом – от 4,2 до 30,7 %.

Анализ валового содержания химических элементов Cd, Zn, Pb, Cu, Ni и Cr в пробах донных отложений выполняли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в аккредитованной лаборатории. Определение подвижных форм металлов проводили из вытяжки ацетатно-аммонийного буфера (рН 4,8). В пробах донных отложений также определяли рН и зольность в процентах к воздушно-сухому веществу.

Обработка данных включала вычисление статистических параметров; разделение многомерных данных на выборки по геохимическим параметрам; построение моделей пространственного отображения факторов (карты факторов); выделение ассоциаций химических элементов на основании многомерных статистических методов; выдвижение и проверку гипотез о связи конкретного техногенного фактора с выделяемой ассоциацией; интерпретацию полученных результатов [6, 17–21].

Статистическая обработка данных также включала вычисление основных параметров содержания микроэлементов в донных отложениях; среднее арифметическое; стандартное отклонение; непараметрический дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса (Kruskal – Wallis Test).

Факторный анализ выполняли на основе корреляционной матрицы, методом главных компонент с последующим варимакс-вращением. Критическое значение уровня значимости принимали равным 5 %. Статистические анализы, проверку гипотез, построение картосхем осуществляли с использованием языка программирования R в среде Rstudio [17–20].

В качестве регионального геохимического фона ( $C_{\text{пер.}}$ ) принимали результаты опробования донных отложений Березинского заповедника (БЗ) [9]. Критерием аномальности послужила минимально аномальная концентрация, рассчитываемая по формуле:  $C_a \geq C + 3\sigma$  или  $C_a \geq C + 3\epsilon$ .

Для оценки эколого-геохимического состояния донных отложений использовали коэффициент аномальности ( $K_a$ ), представляющий собой отношение содержания элемента в почве к фоновому значению ( $C_{\text{пер.}}$ ), а также суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ), который также рассчитывали относительно фоновых значений ( $C_{\text{пер.}}$ ) [6].

Для вычленения техногенной составляющей в происхождении загрязнения использовали геоаккумуляционный индекс (Geo-accumulation Index), для которого выделяют семь классов (от 0-го до 6-го) с соответствующим уровнем загрязнения (от незагрязненных до экстремально загрязненных). Геоаккумуляционный индекс рассчитывали по формуле

$$I_{\text{geo}} = \frac{\log_2(C_n)}{1,5(B_n)}$$

где  $I_{\text{geo}}$  – геоаккумуляционный индекс;  $C_n$  – измеренная концентрация элемента; 1,5 – коэффициент, который минимизирует эффект от возможной вариации фона;  $B_n$  – фоновое содержание элемента [12]. Соответствие значения  $I_{\text{geo}}$  классу и уровню загрязнения донных отложений приведено в табл. 1.

**Таблица 1.** Градация геоаккумуляционного индекса и классификация уровней загрязнения

**Table 1.** Gradation of geoaccumulation index and classification of pollution levels

Значение $I_{\text{geo}}$	Класс $I_{\text{geo}}$	Уровень загрязнения донных отложений
Менее 0	0	Незагрязненные
0–1	1	Между незагрязненными и умеренно загрязненными
1–2	2	Умеренно загрязненные
2–3	3	Между умеренно и сильно загрязненными
3–4	4	Сильно загрязненные
4–5	5	Между сильно и экстремально загрязненными
Более 5	6	Экстремально загрязненные

**Результаты и их обсуждение.** Основные статистические параметры распределения исследуемых элементов в донных отложениях и почвах приведены в табл. 2. Выборки, характеризующие содержание всех исследуемых элементов в донных отложениях, согласно коэффициенту аномальности, являются однородными ( $C_v < 33\%$ ). Обогащение донных отложений относительно почв исследуемого города составило: Cr – в 1,3 раза, Ni – в 1,2, Cu и Cd – в 1,1, при этом обогащения Zn и Pb не выявлено. При сравнении данных, характеризующих донные отложения, с нормированными величинами (ПДК/ОДК) установлено загрязнение Zn и Cd, при максимальных значениях 1,5 и 3,2 соответственно,

что также актуально для почв (3,7 и 2,7 соответственно). Обращает на себя внимание содержание Pb в донных отложениях, концентрации которого ниже фоновых значений в 2 раза, при этом 36 % проб почв загрязнены данным элементом (68,25; 5,4 ПДК) (см. табл. 2).

**Таблица 2. Основные статистические параметры распределения тяжелых металлов в донных отложениях водоемов и почвах г. Несвижа**

**Table 2. Main statistical parameters of the distribution of heavy metals in bottom sediments of reservoirs and soils of Nesvizh**

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Минимум	6,8	21,8	10,0	1,6	18,0	0,7
	6,5	15,0	18,0	5,9	26,1	0,6
Максимум	14,7	43,9	20,2	22,8	80,5	1,6
	15,5	43,2	171,7	174,8	203,3	1,4
Среднее, С	10,8	34,4	14,9	11,0	49,1	1,0
	9,5	26,9	31,5	10,6	53,2	0,9
Стандартное отклонение $\sigma$	2,25	5,82	2,56	4,38	14,08	0,27
	1,74	5,97	1,55	1,73	1,66	0,18
Коэффициент вариации $C_v$	0,20	0,18	0,17	0,39	0,30	0,26
	18,37	22,23	68,25	168,04	65,07	19,07
Верхний предел аномальных значений	17,4	51,8	22,7	24,2	91,4	1,9
	14,7	44,8	116,2	54,7	241,7	1,5
Встречаемость значений выше ПДК/ОДК, %	–	–	36	2	25	100
	–	–	–	–	38	100
Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК	–	–	5,4	5,3	1,5	3,2
	–	–	–	–	3,7	2,7
Фактор обогащения*	1,2	1,3	0,5	1,1	0,9	1,1
ПДК/ОДК	20	100	32	33	55	0,5
Донные отложения в БЗ	12,0	12,0	20,0	15,0	31,0	0,5

\* Отношение среднего содержания параметра в донных отложениях к среднему в почвах.

*Примечание.* В числителе приведены параметры, определенные для донных отложений, в знаменателе – для почв.

Коэффициент аномальности ( $K_a > 1,0$ ) свидетельствует об обогащении донных отложений всеми элементами, за исключением Pb. Установлены уровни загрязнения согласно геоаккумулятивному индексу: для Cr и Cd – умеренно загрязненные, для Zn – между незагрязненными и умеренно загрязненными, для остальных – преимущественно незагрязненные. Таким образом, в соответствии с особенностями геохимической провинции уровень накопления Ni и Cu находится на уровне фоновых вариаций, а уровень накопления Cr, Cd и Zn – несколько выше и имеет техногенную природу (см. табл. 2, 3).

**Таблица 3. Коэффициент аномальности и геоаккумулятивный индекс, рассчитанные для тяжелых металлов в донных отложениях водоемов г. Несвижа**

**Table 3. Pollution coefficient and geoaccumulative index calculated for heavy metals in bottom sediments of reservoirs in the city of Nesvizh**

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
<i>Коэффициент загрязнения</i>						
Для средних значений, $K_a = C / C_{\text{пер}}$	0,9	2,9	0,7	0,7	1,6	2,1
Для максимальных значений, $K_{a \text{ max}} = C_{\text{max}} / C_{\text{пер}}$	1,2	3,7	1,0	1,5	2,6	3,2
<i>Геоаккумуляционный индекс</i>						
Для средних значений, $I_{\text{geo}} = \frac{\log_2(C_n)}{1,5(B_n)}$	–0,3(0)	0,9(1)	–0,6(0)	–1,2(0)	0,0(1)	0,4(1)
Для максимальных значений	–0,8(0)	1,3(2)	–1,0(0)	0,0(1)	0,8(1)	1,1(2)

*Примечание:* светло-серым фоном выделены значения на уровне  $I_{\text{geo}} = 1$ , темно-серым фоном –  $I_{\text{geo}} = 2$ .

Для наглядного представления полученных результатов были сформированы геохимические ряды. Если порядок осредненных содержаний тяжелых металлов выразить некоторой условной последовательностью и представить в порядке убывания величин (мг/кг), то донные отложения г. Несвижа характеризует ряд  $Zn_{49} Cr_{34} Pb_{15} Cu_{11} Ni_{11} Cd_{1,0}$ ; донные отложения фоновых территорий –

Zn<sub>31</sub> Pb<sub>20</sub> Cu<sub>15</sub> Cr<sub>12</sub> Ni<sub>12</sub> Cd<sub>0,5</sub>; почвенный покров г. Несвижа – Zn<sub>53</sub> Pb<sub>30</sub> Cr<sub>27</sub> Cu<sub>10</sub> Ni<sub>9</sub> Cd<sub>0,9</sub>. Данные последовательности демонстрируют близкие концентрации, не различающиеся между собой более чем в 2 раза (Cd, Pb, Cr).

Для отображения интенсивности обогащения донных отложений тяжелыми металлами в сравнении с фоновыми показателями использовали коэффициенты аномальности, рассчитанные на основании средних содержаний тяжелых металлов в донных отложениях г. Несвижа и выстроенные в порядке убывания: Cr<sub>2,9</sub> Cd<sub>2,1</sub> Zn<sub>1,6</sub> Ni<sub>0,9</sub> Cu<sub>0,7</sub> Pb<sub>0,7</sub>, а также максимальных значений – Cr<sub>3,7</sub> Cd<sub>3,2</sub> Zn<sub>2,6</sub> Cu<sub>1,5</sub> Ni<sub>1,2</sub> Pb<sub>1,0</sub>. Отмечается выраженная контрастность в интенсивности обогащения донных отложений Cr, Cd и Zn согласно средним и максимальным значениям – в 2–3 и 3–4 раза соответственно. Для сравнения приведен ряд, демонстрирующий интенсивность обогащения донных отложений г. Несвижа относительно его почв: Cr<sub>1,3</sub> Ni<sub>1,2</sub> Cd<sub>1,1</sub> Cu<sub>1,1</sub> Zn<sub>0,9</sub> Pb<sub>0,5</sub>.

Представленные ряды показывают обогащение донных отложений изучаемыми элементами в 2–4 раза, что, в основном, соответствует природным вариациям. Приоритетные по степени обогащения – Cr, Cd и Zn. Уровень накопления Ni обеспечен геохимической специализацией провинции, Pb находится на уровне фона и ниже.

Также рассчитывали коэффициент суммарного загрязнения Z<sub>c</sub>, его значения изменялись от 2,6 до 6,3 (Z<sub>c</sub> < 10), что указывает на низкие значения, отсутствие значимой дифференциации и слабый уровень техногенного загрязнения.

Таким образом, из широкого спектра инструментов, используемых для оценки донных отложений малого города с низкой техногенной нагрузкой, дифференциация выявлена на основании K<sub>a</sub>. При этом значения K<sub>a</sub> хорошо согласуются с I<sub>geo</sub> (см. табл. 3), оба показателя демонстрируют поэлементную дифференциацию на уровне города, во многом повторяют порядок, характеризующий донные отложения Березинского заповедника и почвы г. Несвижа.

Выводы, сделанные для общей выборки данных, хорошо согласуются с результатами по отдельным прудам. Различия в содержаниях ТМ в донных отложениях прудов показаны на рис. 2, особенности обогащения представлены на рис. 3.

Таким образом, рис. 2 наглядно демонстрирует, что пространственное распределение данных, в целом, однородное, распределение ТМ в донных отложениях прудов существенно не различается.

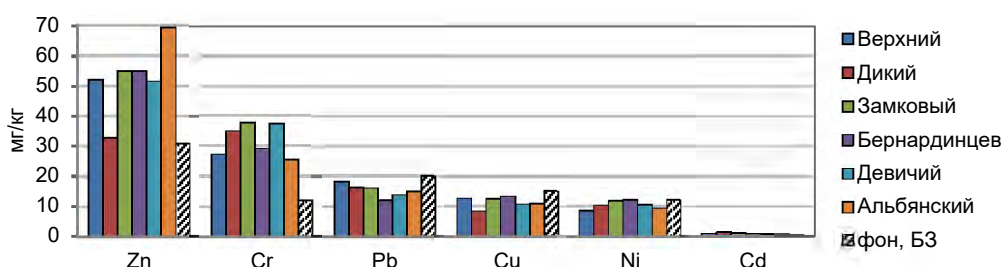


Рис. 2. Среднее содержание тяжелых металлов в донных отложениях русловых прудов г. Несвижа

Fig. 2. Average content of heavy metals in bottom sediments of riverbed ponds in Nesvizh

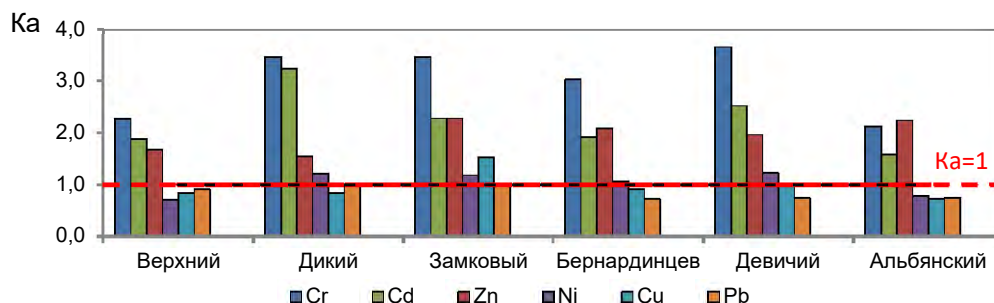


Рис. 3. Коэффициенты аномальности содержания донных отложений прудов г. Несвижа

Fig. Pollution coefficients of bottom sediments of ponds in Nesvizh

Оценку значимости различий в содержании ТМ по прудам проводили с помощью рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса (Kruskal – WallisTest) (табл. 4).

Таблица 4. Результаты рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса

Table 4. Results of the Kruskal – Wallis test

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
$\chi^2$	2,4135	3,7964	7,4582	5,4772	8,6538	6,0741
<i>df</i>	3	3	3	3	3	3
<i>p</i>	0,4911	0,2843	0,05864	0,1400	0,03427	0,1081

Результаты теста свидетельствуют о том, что влияние группировки элементов по прудам статистически достоверно в отношении Zn ( $p < 0,05$ ) (см. табл. 3) и, напротив, недостоверно для Ni, Cr, Pb, Cu, Cd. При этом, согласно [14], в почвенном покрове города распределение Zn, а также Cu и Cr было статистически достоверно.

Ввиду статистически недостоверных различий, выявленных при распределении большинства исследуемых элементов по прудам, были изучены нагрузки для каждой точки в отдельности и городской среды в целом.

Статистические параметры выборки и рассчитанные коэффициенты, выраженные через геохимические ряды, позволили выявить порядок накопления и определить приоритетные загрязняющие вещества. Корреляционный анализ содержания элементов, выполняемый для донных отложений и почв на территории города с целью оценки характера связей между исследуемыми компонентами.

**Корреляционный анализ.** Обобщенная корреляционная матрица, рассчитанная по совокупности данных, характеризующих донные отложения ( $n = 20$ ), приведенная на рис. 4, а показывает, что значимые корреляционные связи образует Cu (с Zn), а также Ni (с Zn, Cu и Cr), что характерно и для почв (рис. 4, б). Сильные связи характерны для пар: Cu–Zn, средние – для Zn–Ni–Cu и Ni–Cr. При этом, Pb и Cd не образуют значимых корреляционных связей (см. рис. 4, а).

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn
Cr	0,51				
Pb	0,15	0,27			
Cu	0,57	0,17	0,23		
Zn	0,62	0,17	0,16	0,81	
Cd	0,16	0,13	0,45	0,30	0,27

а (а)

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn
Cr	0,88				
Pb	0,30	0,22			
Cu	0,55	0,58	0,58		
Zn	0,50	0,52	0,47	0,84	
Cd	0,71	0,59	0,25	0,54	0,54

б (б)

Рис. 4. Корреляционные матрицы содержания микроэлементов в донных отложениях (а) и почвах (б). Фоном выделены значимые корреляционные связи, полужирным шрифтом – наиболее значимые из них

Fig. 4. Correlation matrices of trace element content in bottom sediments (a) and soils (b). Significant correlations are highlighted in background, the most significant ones are in bold

Согласно [14] рис. 4, б для почвенного покрова г. Несвижа характерно наличие двух устойчивых ассоциаций коррелирующих между собой элементов, обе из которых обусловлены длительным техногенным воздействием: Ni–Cr–Cd и Cu–Zn–Pb. Показано [14], что обе ассоциации формируются при осаждении выбросов автотранспорта и теплоэнергетических установок, в данном случае котельных. При изучении корреляционной матрицы донных отложений очевидно, что связи в парах Cu–Zn и Ni–Cr также значимы.

**Факторный анализ** был выполнен для проверки гипотезы о двух наиболее значимых факторах в числе основных, а также выявления их вклада в формирование ассоциаций химических элементов в донных отложениях водоемов г. Несвижа. В результате были выделены две главные компоненты (главных фактора), на долю которых приходится более 70 % суммарной дисперсии, что демонстрирует матрица факторных нагрузок (табл. 5). Также для сравнения приведена матрица, отражающая распределение нагрузок, характеризующих почвы.

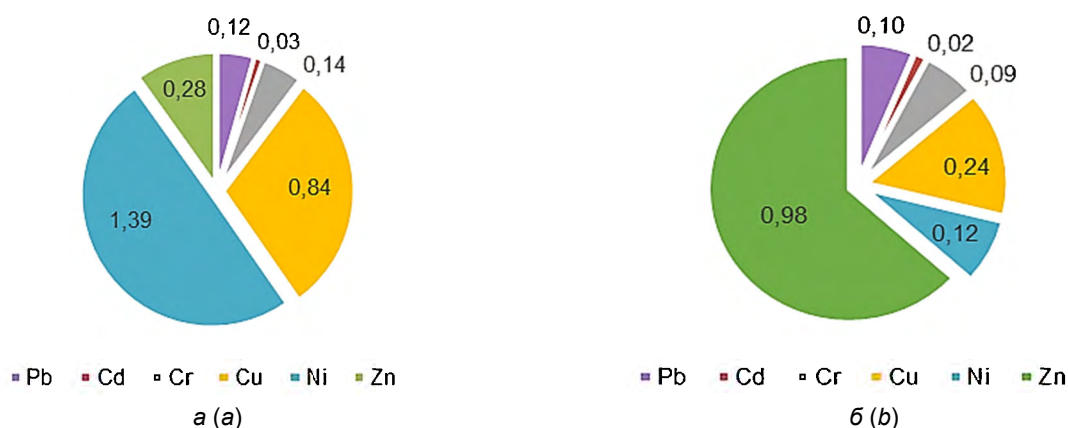
Первая главная компонента (фактор 1) (см. табл. 4) отражает общую закономерность распределения элементов в донных отложениях города. Вторая главная компонента (фактор 2) уточняет общие закономерности с учетом особенностей распределения отдельных элементов. Так, фактор 1, предоставляющий наибольший вклад в общую дисперсию – 44,1 %, указывает на ассоциацию Cu–Zn–Ni. Фактор 2 вносит в дисперсию 28,6 % и представляет ассоциацию Cd–Pb.

**Таблица 5. Матрицы значений факторных нагрузок главных компонент, описывающие различия распределения элементов в донных отложениях и почвах****Table 5. Matrices of factor loadings of the principal components, describing differences in the distribution of elements in bottom sediments and soils**

Донные отложения							Почвы						
Фактор/ вклад, %	Ni	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	Фактор/ вклад, %	Ni	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn
1 / 44,1	0,61*	–	–	–	0,91	0,84	1 / 62,3	0,97	0,83	0,65	–	–	–
2 / 28,6	–	–	0,92	0,55	–	–	2 / 18,0	–	–	–	0,56	0,94	0,77

\* Фоном выделены ведущие компоненты для каждой переменной; нагрузки, не являющиеся достоверными, опущены.

Геохимический смысл выделения двух ассоциаций и обоснованность выводов подтверждают данные по выбросам ТМ на территории Беларуси от автотранспорта и непромышленных установок в жилом фонде (рис. 5).



**Рис. 5. Объемы выбросов тяжелых металлов на территории Беларуси, т: а – от дорожного транспорта и других передвижных источников; б – от непромышленных установок в жилом фонде (2018 г.) [10]**

**Fig. 5. Volumes of heavy metal emissions on the territory of Belarus, t: a – from road transport and other mobile sources; b – from non-industrial installations in the housing stock (2018) [10]**

Так, *фактор 1*, предоставляющий наибольший вклад в общую дисперсию (44,1 %), указывает на ассоциацию Cu–Zn–Ni. На долю компонентов данной ассоциации приходится 87 % (1,34 т) и 90 % (2,51 т) от суммарных объемов выбросов от основных источников воздействия: от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде и от дорожного транспорта и передвижных источников соответственно. Согласно [14], значимая нагрузка на Cu и Zn, а также сильная корреляционная связь между компонентами, в большей степени указывает на непромышленные установки для сжигания в жилом фонде как источников техногенного воздействия в г. Несвиже. И хотя в настоящее время используется преимущественно газовое отопление, тем не менее длительное воздействие продуктов горения на почвенный покров города остается значимым фактором, формирующим актуальную техногенную нагрузку на донные отложения.

Коэффициент ранговой корреляции использовали в качестве показателя оценки тесноты связи и отражения зависимости вариации результивного признака от вариации признака-фактора. Так, в качестве результивного признака определяли зависимость вариации зольности от вариации признака фактора 1. Качественную характеристику тесноты связи коэффициента ранговой корреляции оценивали по шкале Чеддока. В результате была установлена заметная прямая корреляционная связь между фактором 1 и содержанием органического вещества в донных отложениях ( $\rho = 0,56$ ,  $p < 0,012$ ) (рис. 6, а).

Геохимический смысл результата применения коэффициента ранговой корреляции можно интерпретировать следующим образом: концентрация элементов ассоциации Cu–Zn–Ni предопределяется содержанием органического вещества. При повышении зольности в диапазоне от 75 до 96 % наблюдается положительная связь между фактором 1 и зольностью (см. рис. 6, а).

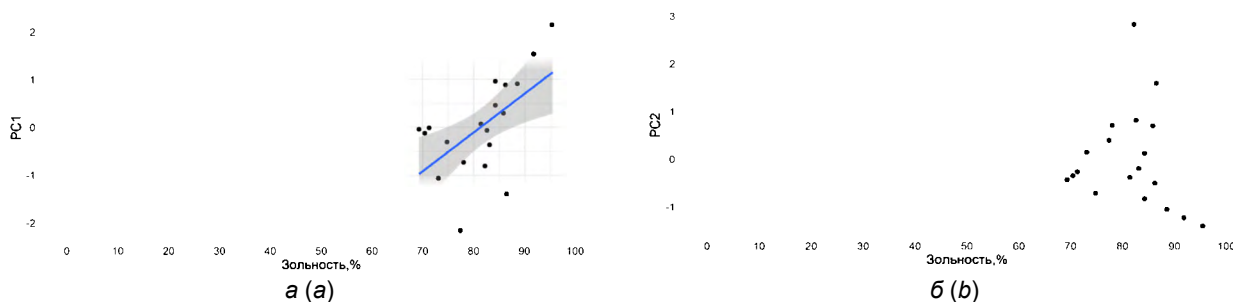


Рис. 6. Зависимость факторов 1 (PC1) (а) и 2 (PC2) (б) от зольности донных отложений

Fig. 6. Dependence of factors 1 (PC1) (a) and 2 (PC2) (b) on ash content of bottom sediments

В табл. 6 представлены данные о распределении показателя зольности по прудам. Показано, что средние показатели по прудам находятся на уровне фоновых. Наибольшей зольностью характеризуются донные отложения пруда Дикого, принимающего воды мелиоративных каналов с осушенного болотного массива, а также поверхностный сток с водосбора, в пределах которого распространены преимущественно торфяно-болотные почвы. Следовательно, положительная связь между фактором 1 и зольностью характерна в большей мере для прудов Дикого, а также Девичьего и Альбянского, в меньшей степени – для Замкового и не проявляется для Бернардинцев (зольность >75 %).

Таблица 6. Зольность в донных отложениях водоемов г. Несвижа, %

Table 6. Ash content in bottom sediments of reservoirs in Nesvizh, %

Пруд	Диапазон (среднее значение) зольности, %	Пруд	Диапазон (среднее значение) зольности, %
Верхний	–	Девичий	77,3–90,6 (82,3)
Дикий	81,4–95,8 (88,0)	Альбянский	86,5
Замковый	69,3–86,9 (81,2)	Все пруды	69,3–95,8 (83,4)
Бернардинцев	70,4–73,1 (71,6)	Донные отложения, БЗ	84,0

Фактор 2 вносит 28,6 % в общую дисперсию и демонстрирует вторую ассоциацию Cd–Pb. На долю этих компонентов приходится 5–8 % (0,12–0,15 т) в объеме выбросов от основных источников загрязнения (см. рис. 5). Значимой связи между фактором 2 и зольностью не установлено (рис. 6, б).

Уровень накопления элементов данной ассоциации в почвах, а также выявленная ранее связь их с выбросами [14] позволяют акцентировать внимание на техногенной природе поступления Cd и Pb в окружающую среду изучаемого города. Помимо вымывания из почв, в пруды Cd может поступать со стоком с сельскохозяйственных угодий, а также в результате разложения различных организмов и водной растительности.

Обращает на себя внимание тот факт, что Cd и Pb характеризуются наибольшей подвижностью среди изучаемых элементов донных отложений водоемов исследуемого города: 62,4–97,6 и 39,0–93,2 % соответственно (рис. 7).

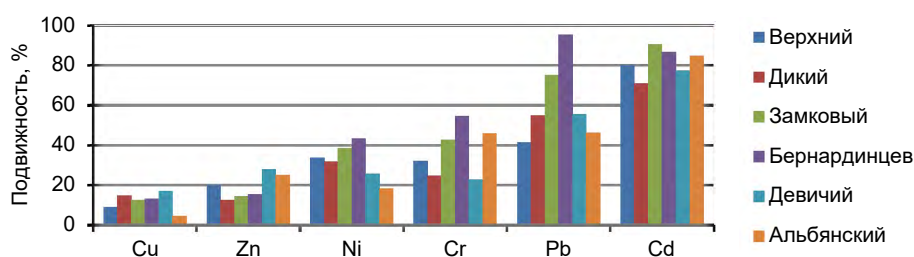


Рис. 7. Подвижность тяжелых металлов в донных отложениях водоемов г. Несвижа

Fig. 7. Mobility of heavy metals in bottom sediments of reservoirs in Nesvizh

Согласно [22], в незагрязненной почве, на долю фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, приходится 31,7 % Cd и 37,6 % Pb от общего их содержания. По мере роста уровня загрязнения наблюдается интенсивное накопление Cd (до 72,9 %) и Pb (до 82–88 %) в данной фракции. Кроме того, отмечается, что роль органического вещества в связывании Cd в загрязненной почве невелика (0,9–1,9 %).

Таким образом, высокий показатель подвижности Cd и Pb, характеризующий донные отложения прудов изучаемого города на фоне очевидной техногенной природы поступления данных элементов, может указывать на аккумуляцию Cd и Pb в донных отложениях, связанную с процессами соосаждения металлов с гидроксидами железа и марганца.

По результатам проведения факторного анализа были выполнены боксплоты (рис. 8), наглядно отображающие масштабы варьирования выделенных факторов в донных отложениях г. Несвижа, а также картосхемы, отражающие пространственное распределение нагрузки отдельно по двум факторам в разрезе точек отбора (рис. 9).

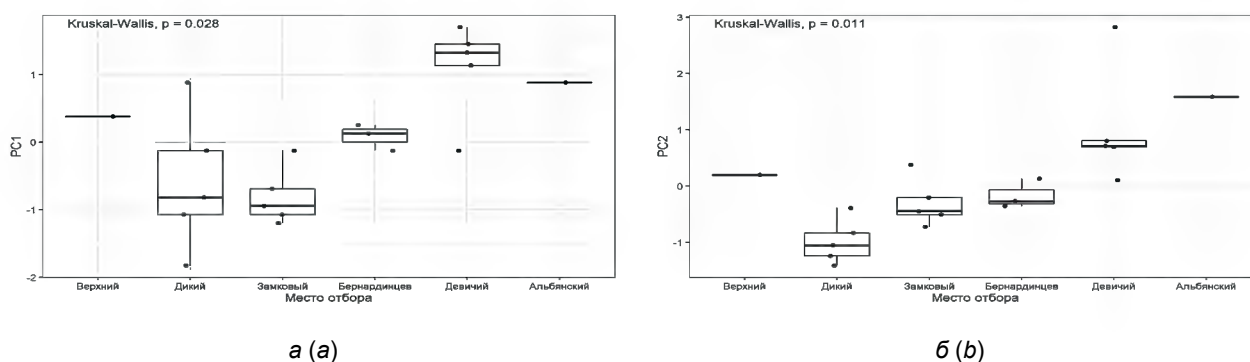


Рис. 8. Масштабы варьирования факторов 1 (PC1) (а) и 2 (PC2) (б) в донных отложениях водоемов г. Несвижа

Fig. 8. The scale of variation of factors 1 (PC1) (a) and 2 (PC2) (b) in bottom sediments of reservoirs in the city of Nesvizh

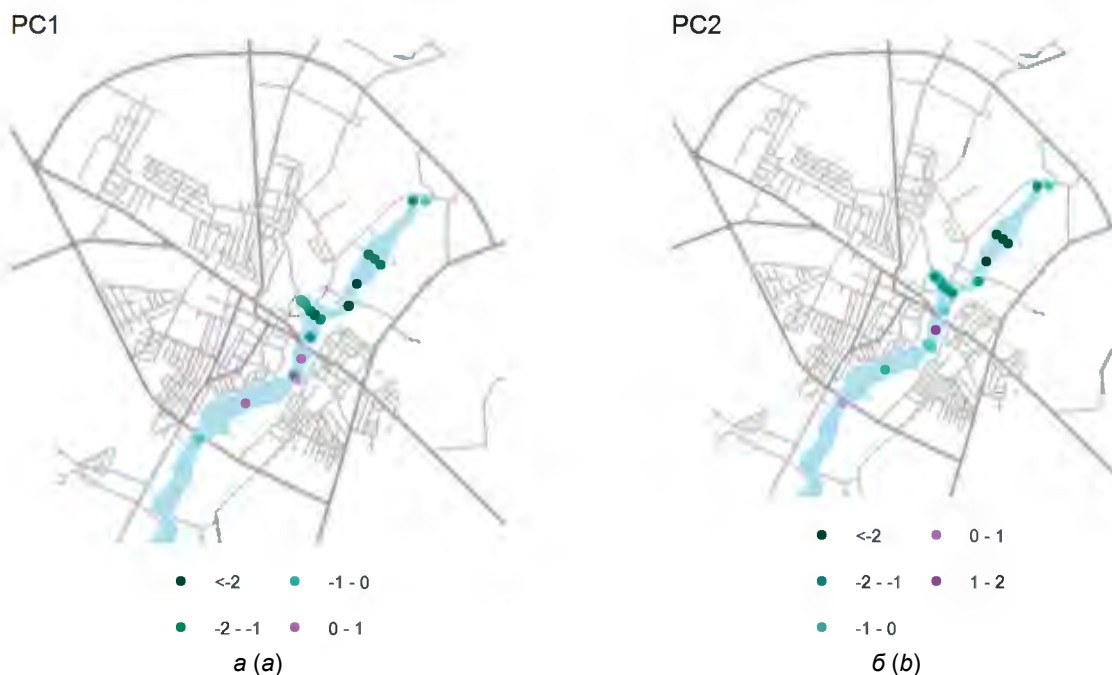


Рис. 9. Картосхемы распределения факторных нагрузок в донных отложениях при формировании ассоциаций с учетом преобладающей роли факторов 1 (а) и 2 (б)

Fig. 9. Maps of the distribution of factor loads in bottom sediments during the formation of associations, taking into account the predominant role of factors 1 (a) and 2 (b)

При интерпретации полученных данных (см. рис. 8, 9) отрицательные значения воспринимались как точки с низкой нагрузкой фактора, имеющие тенденцию к уменьшению (от 0 до  $\leq -2$ ), а также положительные – как имеющие наиболее значимую нагрузку, при тенденции к увеличению (от 0 до  $\geq 2$ ).

Наименьшее значение факторов в обоих случаях (см. рис. 7), характеризуемых наименьшей нагрузкой, были характерны для прудов Дикого и Замкового. Это закономерно, принимая в расчет, с одной стороны, техногенную природу обоих ассоциаций, а с другой – отсутствие выраженной техногенной нагрузки на водосборы данных прудов, занятые преимущественно парками [6, 23]. Типичная же нагрузка урбанизированного пространства малого города представлена на водосборе пруда Девичьего, что нашло отражение в наибольших положительных, и вместе с тем наиболее выраженных нагрузках на оба фактора.

Водосбор, как и сам пруд Бернардинцев, занимают наименьшую площадь, находясь в городе, наполняются водами пруда Дикого и водами канала с мелиорированных территорий, расположенных выше города. Техногенная нагрузка проявляется положительно по первому фактору.

Таким образом, использование факторного анализа позволило не только выявить, но и оценить вклад каждого фактора в формирование нагрузки как для отдельно взятой точки, так и для пруда в целом, а также представить полученные результаты в пространственном распределении на территории города.

#### **Выводы.**

1. Выявлено обогащение донных отложений водоемов г. Несвижа Cr, Cd и Zn в 2–4 раза относительно фоновых значений. Выше допустимых уровней (по отношению к гигиеническим нормативам для почв) донные отложения загрязнены Cd и Zn – в 100 и 38 % случаев соответственно. В свою очередь, содержание Ni, Cu и Pb находится на уровне природных вариаций.

2. Установлено обогащение донных отложений относительно почв исследуемого города: Cr – в 1,3 раза, Ni – в 1,2, Cu и Cd – в 1,1 раза, при этом обогащения Zn и Pb – не выявлено.

3. С использованием корреляционного анализа в донных отложениях г. Несвижа выявлены сильные положительные корреляционные связи Cu с Zn, а также средние положительные связи Ni с Zn, при этом Cu и Cr, Pb и Cd не образуют значимых корреляционных связей. Необходимо отметить, что связи Cu–Zn и Ni–Cr также были оценены как значимо положительные для почв города.

4. Посредством применения факторного анализа определены наиболее вероятные источники поступления ТМ в донные отложения водоемов г. Несвижа.

5. Таким образом, если на основании применения геохимических коэффициентов был выявлен лишь спектр элементов, характеризуемых некоторым обогащением в условиях малого города с низкой техногенной нагрузкой, то применение непараметрических методов позволило определить устойчивые ассоциации, образованные технофильными элементами в донных отложениях водоемов (Cu–Zn–Ni и Cd–Pb) и проследить их связь с источником – воздействием определенных аэротехногенных факторов (выбросов от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде и от дорожного транспорта и передвижных источников); выявить и оценить связи между компонентами выделенных ассоциаций, а также определить предопределяющие в накоплении факторы (связь PC1 с зольностью), а также предположить связь PC2 с содержанием глинистой фракции.

6. Выявлены также особенности распределения Zn в окружающей среде малого города. Выборка данного ТМ характеризуется достоверным распределением Zn в донных отложениях. Отмечено также образование сильных корреляционных связей данного компонента в формировании ассоциаций как в донных отложениях, так и в почвах. Полученный результат согласуется с представлениями о распределении Zn в городах [24], а также с представлениями о поведении Zn в речных донных осадках согласно выделенным техногеохимическим ореолам [5], где именно Zn является характерным технофильным ТМ, отличительно характеризующим среду малого города.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность за профессиональные консультации научному руководителю доктору географических наук В. С. Хомичу и кандидату геолого-минералогических наук С. В. Савченко, благодарит кандидата географических наук В. А. Рыжикова за помощь в проведении полевых исследований и кандидата географических наук О. Ю. Круковскую за помощь в интерпретации и представлении геохимических данных с использованием языка программирования R

**Acknowledgments.** The author expresses her sincere gratitude to the supervisor, Dr. Sc. (Geography) V. S. Khomich, Ph. D. (Geology and Mineralogy) S.V. Savchenko for the professional advices, and also thanks to Ph. D. (Geography) V. A. Ryzhikov for his help in conducting field research and Ph. D. (Geography) O. Yu. Krukowskaya for the help in interpreting and presenting geochemical data using the R programming language.

## Список используемых источников

1. Кузнецов, В. А. Геохимия аллювиального литогенеза / В. А. Кузнецов. – Минск : Наука и техника, 1973. – 276 с.
2. Кузнецов, В. А. Геохимия речных долин (научные и прикладные аспекты исследований) / В. А. Кузнецов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 304 с.
3. Страхов, Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории земли / Н. М. Страхов. – М. : Госгеолтехиздат, 1963. – 535 с.
4. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Астрейя-2000, 1999. – 610 с.
5. Геохимические провинции покровных отложений БССР / под ред. К. И. Лукашёва. – Минск : Наука и техника, 1969. – 470 с.
6. Лукашёв В. К., Окунь Л. В. Загрязнение тяжелыми металлами окружающей среды г. Минска / В. К. Лукашёв, Л. В. Окунь. – Минск : Институт геологических наук АН Белоруссии, 1996. – 80 с.
7. Саёт, Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саёт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
8. Янин, Е. П. Поверхностный сток с городских территорий как источник загрязнения речных систем / Е. П. Янин // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2007. – № 4. – С. 2–104.
9. Натаров, В. М. Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике / В. М. Натаров, О. В. Лукашёв, В. В. Савченко. – Минск : Белорус. Дом печати, 2013. – 213 с.
10. Савченко, В. В. Литофациальная дифференциация химических элементов в отложениях речных долин в природных и техногенных условиях // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 6. – С. 690–698.
11. Ассоциации химических элементов в природных компонентах на территории Березинского биосферного заповедника / О. В. Лукашёв [и др.] // Природопользование. – Минск, 2014. – Вып. 25. – С. 115–123.
12. Методические подходы к оценке загрязнения донных отложений реки тяжелыми металлами (на примере р. Свислочи) / Е. П. Овчарова [и др.] // Природопользование. – Минск, 2016. – Вып. 30. – С. 50–59.
13. Романкевич, Ю. А. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния водных объектов малого города Беларуси (на примере г. Несвижа) // Природопользование. – Минск, 2015. – Вып. 27. – С. 85–94.
14. Романкевич, Ю. А. Распределение тяжелых металлов по территории г. Несвижа // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 56–70.
15. Кирвель, И. И. Пруды Беларуси как антропогенные водные объекты, их обслуживание и режим / И. И. Кирвель. – Минск : Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, 2005. – 234 с.
16. Романкевич, Ю. А. Ретроспективная карта почвенного покрова г. Несвижа (Беларусь) для изучения трансформации городских почв / Ю. А. Романкевич // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXI Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М. И. Кучина / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – Т. 1. – С. 812–813.
17. Лукашёв, О. В. Ретроспективная оценка загрязнения почв и растительности г. Кобрин металлами / О. В. Лукашёв, Н. В. Жуковская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1 – С. 15–21.
18. Зинкоте, Р. Факторный анализ при выделении ассоциаций и методические разработки подсчета геохимического фона / Р. Зинкоте // Природные ресурсы. – 1999. – № 4. – С. 97–108.
19. Савельев, А. А. Использование языка R для статистической обработки данных / А. А. Савельев, С. С. Мухарамова, А. Г. Пилюгин. – Казань : Казанский государственный университет, 2007. – 29 с.
20. Многомерное отображение структуры региональных геохимических полей (факторный анализ) / А. В. Кирюшин [и др.] // Изв. РАН. Сер. геогр. – 1996. – № 4. – С. 24–45.
21. Тютюнник, Ю. Г. Факторный анализ геохимических особенностей почв городов Украины / Ю. Г. Тютюнник, Б. А. Горлицкий // Почвоведение. – 1998. – № 1. – С. 100–109.
22. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск : Институт почвоведения и агрохимии, 2002. – С. 239.
23. Кадацкая, О. В. Геохимическая индикация ландшафтной обстановки водосборов / О. В. Кадацкая. – Минск : Наука и техника, 1987. – 134 с.
24. Хомич, В. С. Цинк в почвах городов Белоруссии / В. С. Хомич, Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека // Почвоведение. – 2004. – № 4. – С. 430–439.

## References

1. Kuznecov V. A. *Geokhimiya allyuvial'nogo litogeneza* [Geochemistry of alluvial lithogenesis]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1973, 276 p. (in Russian)
2. Kuznecov V. A. *Geokhimiya rechnyh dolin (nauchnye i prikladnye aspekty issledovaniy)* [Geochemistry of river valleys (scientific and applied aspects of research)]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1986, 303 p. (in Russian)
3. Strahov N. M. *Tipy litogeneza i ih evolyuciya v istorii zemli* [Types of lithogenesis and their evolution in the history of the earth]. Moscow, State Geological Technical Publ., 1963, 535 p. (in Russian)
4. Perelman A. I., Kasimov N. S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000, 1999, 610 p. (in Russian)
5. Lukashyov K. I. (ed.) *Geokhimicheskie provincii pokrovnyh otlozhenij BSSR* [Geochemical provinces of the cover deposits of the BSSR]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1969, 473 p. (in Russian)

6. Lukashev V. K., Okun L. V. *Zagryazneniye tyazhelymi metallami okruzhayushchey sredy g. Minska* [Heavy metal pollution of the environment in Minsk]. Minsk, Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of Belarus, 1996, 80 p. (in Russian)
7. Sayet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
8. Yanin E. P. *Poverhnostnyy stok s gorodskih territorij kak istochnik zagryazneniya rechnyh sistem* [Surface runoff from urban areas as a source of pollution of river systems]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchey sredy = Scientific and technical aspects of environmental protection*, 2007, no. 4, pp. 2–104. (in Russian)
9. Natarov V. M., Lukashyov O. V., Savchenko V. V. *Kompleksnyy geohimicheskij fonovyy monitoring v Berezinskom biosfernom zapovednike* [Integrated geochemical background monitoring in the Berezinsky Biosphere Reserve]. Minsk, Belarus. Dom pechati Publ., 2013, 213 p. (in Russian)
10. Savchenko V. V. *Litofacial'naya differenciatsiya himicheskikh elementov v otlozheniyah rechnyh dolin v prirodnykh i tekhnogennykh usloviyakh* [Lithofacies differentiation of chemical elements in sediments of river valleys under natural and technogenic conditions]. *Vodnye resursy = Water resources*, 1996, vol. 23, no. 6, pp. 690–698. (in Russian)
11. Lukashev O. V. *Assotsiatsii khimicheskikh elementov v prirodnykh komponentakh na territorii Berezinskogo biosfernogo zapovednika* [Associations of chemical elements in natural components on the territory of the Berezinsky Biosphere Reserve]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2014, no. 25, pp. 115–123. (in Russian)
12. Ovcharova E. P., Homich V. S., Kadackaya O. V., Sanec E. V., Sarkar S. K., Dashkevich M. M., Tishchikov I. G. *Metodicheskie podhody k ocenke zagryazneniya donnykh otlozhenij reki tyazhelymi metallami (na primere r. Svisloch)* [Methodological approaches to assessing the pollution of river bottom sediments with heavy metals (using the example of the Svisloch River)]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2016, no. 30, pp. 50–59. (in Russian)
13. Romankevich Yu. A. *Kompleksnaya ekologo-geohimicheskaya ocenka sostoyaniya vodnykh ob'ektov malogo goroda Belarusi (na primere g. Nesvizha)* [Comprehensive ecological and geochemical assessment of the state of water bodies of a small town in Belarus (using the example of the city of Nesvizh)]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2015, no. 27, pp. 85–94. (in Russian)
14. Romankevich Yu. A. *Raspredelenie tyazhelykh metallov po territorii g. Nesvizha* [Distribution of heavy metals across the territory of Nesvizh]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 56–70. (in Russian)
15. Kirvel' I. I. *Prudy Belarusi kak antropogennyye vodnye ob'ekty, ih obsluzhivanie i rezhim* [Ponds of Belarus as anthropogenic water bodies, their maintenance and regime]. Minsk, Maxim Tank Belarusian State Pedagogical University Publ., 2005, 234 p. (in Russian)
16. Romankevich Yu. A. *Retrospektivnaya karta pochvennogo pokrova g. Nesvizha (Belarus') dlya izucheniya transformatsii gorodskih pochv* [A retrospective map of the soil cover of the city of Nesvizh (Belarus) for studying the transformation of urban soils]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy Mezhdunar. simpoz.* [Proc. of the int. symp. "Problems of geology and subsoil development"]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2017, vol. 2, pp. 812–813. (in Russian)
17. Lukashev O. V., Zhukovskaya N. V. *Retrospektivnaya otsenka zagryazneniya pochv i rastitelnosti g. Kobrina metallami* [Retrospective assessment of contamination of soils and vegetation in the city of Kobrin with metals]. *Prir. Resursy = Natural Resources*, 2009, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
18. Zinkute R. *Faktornyy analiz pri vydelenii assotsiatsiy i metodicheskiye razrabotki podscheta geokhimicheskogo fona* [Factor analysis in identifying associations and methodological developments for calculating the geochemical background]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 1999, no. 4, pp. 97–108. (in Russian)
19. Savelyev A. A., Mukharamova C. C., Pilyugin A. G. *Ispolzovaniye yazyka R dlya statisticheskoy obrabotki dannykh* [Using the R Language for Statistical Data Processing]. Kazan, Kazan State University, 2007, 29 p. (in Russian)
20. *Mnogomernoye otobrazheniye struktury regionalnykh geokhimicheskikh poley (faktornyy analiz)*. [Multidimensional mapping of the structure of regional geochemical fields (factorial analysis)]. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proc. of the RAS. Geographic series*, 1996, no. 4, pp. 24–45. (in Russian)
21. Tyutyunnik Yu. G. *Faktornyy analiz geokhimicheskikh osobennostey pochv gorodov Ukrainy* [Factor analysis of geochemical features of soils in Ukrainian cities]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 1998, no. 1, pp. 100–109. (in Russian)
22. Golovatyj S. E. *Tyazhelye metally v agroekosistemah* [Heavy metals in agroecosystems]. Minsk, 2002, 239 p. (in Russian)
23. Kadackaya O. V. *Geohimicheskaya indikatsiya landshaftnoj obstanovki* [Geochemical indication of the landscape conditions of watersheds]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1987, 134 p. (in Russian)
24. Homich V. S., Kuharchik T. I., Kakareka S. V. *Cink v pochvah gorodov Belorussii* [Zinc in the soils of Belarusian cities]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 2004, no. 4, pp. 30–439. (in Russian)

#### Информация об авторе

Романкевич Юлия Александровна – научный сотрудник, Институт природопользования, НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yulia\_romankevich@mail.ru

#### Information about the author

Julia A. Ramankevich – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220014, Minsk, Belarus). E-mail: yulia\_romankevich@mail.ru