

УДК 550.4:551.3(476.7)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРУДОВ г. НЕСВИЖА

Ю. А. Романкевич

*Институт природопользования НАН Беларуси, 220076, ул. Ф. Скорины, 10,
г. Минск, Беларусь, yuliya_romankevich@mail.ru*

Рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов 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, 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.

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

FEATURES OF HEAVY METAL DISTRIBUTION IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE PONDS OF NESVIZH

J. A. Ramankevich

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, 220076,
Skoriny st., 10, Minsk, Belarus, yuliya_romankevich@mail.ru*

The features of the distribution of heavy metals in bottom sediments and the relationship of elements in the «sediment-soil system» in urban conditions are considered. Priority elements for enrichment have been established (Cr, Cd and Zn). Two associations of heavy metals characteristic of the city's bottom sediments (Cu–Zn–Ni and Cd–Pb) were identified. The formation of strong correlations was noted in the formation of associations both in bottom sediments and in soils (Cu–Zn). The relationship between the Cu–Zn–Ni association and ash content was determined. Factor loadings were calculated. The factors responsible for the formation of the technogenic situation have been identified.

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

Введение. В последние десятилетия многие авторы обращались к проблеме индикаторной роли донных отложений в оценке загрязнения водных экосистем [1-3]. 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 [4], уровнем продукционно-деструкционных процессов в водоеме, его морфометрическими параметрами. Согласно [1], 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 тяжелых металлов (ТМ) в донных осадках водоемов обусловлен техногенной обстановкой на водосборе и согласуется с результатами изучения почвенного покрова, результаты исследования позволят повысить уровень понимания процессов миграции и аккумуляции веществ в условиях урбанизированных пространств. Выявление особенностей накопления и пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа явилось целью данного исследования, объектом стали донные отложения, представленные илами.

Изученность района исследований. Исследование донных отложений водоемов г. Несвижа (более полно изложены в [5]) является составной частью комплексных эколого-геохимических исследований малого города [6, 7]. Так, изучение распределения ТМ в почвенном покрове г. Несвижа, выполненное ранее [6], определило приоритетные в накоплении элементы (Pb, Cd, Cr и Zn). На основании факторного анализа выявлены две ассоциации: Ni–Cr–Cd и Cu–Zn–Pb. Идентифицированы техногенные источники, ответственные за образование ассоциаций [6]. Согласно [7], приоритетными источниками загрязнения вод русловых прудов на территории г. Несвижа являются воды р. Уши, подземный и поверхностный сток. Доказано, что качество вод в водоемах и водотоках обусловлено техногенной нагрузкой на их водосборы, основным фактором формирования которой является сельскохозяйственный.

Район исследования приурочен к низменным ландшафтам речных долин, основной водной артерией которого является р. Уша — левый приток р. Неман. В г. Несвиже и его окрестностях на р. Уше созданы речные (русловые) пруды: Дикий, Замковый, Бернардинцев, Девичий и Альбянский, созданные в XVI в. путем перегораживания русла р. Уши. Бассейн верхнего течения р. Уши находится в зоне сочленения Столбцовской моренной равнины и Копыльской конечно-моренной возвышенности, в составе покровных отложений преобладают моренные и конечно-моренные супеси и суглинки сожского оледенения (*g,gtIIs*), перекрываемые на отдельных участках флювиогляциальными песками и

супесями (*fIIIsz*^s). Значительная часть водосборной территории приходится на городскую территорию (113, 5 га; 84 %).

В соответствии с основными литолого-геохимическими особенностями современных аллювиальных отложений Центральной провинции, район исследований представлен преимущественно моренными и лёссовыми отложениями, находящимися в разнообразных сочетаниях с осадками флювиогляциального, болотного и другого генезиса. Значительно распространение также имеют торфяные накопления. Согласно геохимическому индексу, аллювиальные отложения района характеризуются среднекларковыми концентрациями Cr (0,95) и Cu (0,94), среди накапливающихся элементов — Ni (1,35) [8].

Методика исследований. В ходе исследований отобраны пробы донных отложений в русловых прудах города, представленных илами, в количестве 37 шт. Точки отбора закладывались по поперечным профилям, а также в верхних и приплотинных частях водоемов. 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.

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

Обработка данных включала вычисление статистических параметров; разделение многомерных данных на выборки по геохимическим параметрам; выделение ассоциаций химических элементов на основании многомерных статистических методов; выдвижение и проверку гипотез о связи конкретного техногенного фактора с выделяемой ассоциацией; интерпретацию полученных результатов. Факторный анализ выполняли на основе корреляционной матрицы, методом главных компонент с последующим варимакс-вращением [9]. Статистические анализы, проверку гипотез, построение картосхем осуществляли с использованием языка программирования R в среде Rstudio.

В качестве регионального геохимического фона ($C_{\text{рег.}}$) принимали результаты опробования донных отложений Березинского заповедника (БЗ) [2]. Для оценки эколого-геохимического состояния донных отложений использовали коэффициент аномальности (K_a), а также суммарный показатель загрязнения (Z_c), которые рассчитывали относительно фоновых значений ($C_{\text{рег.}}$) [2]. Для выделения техногенной составляющей в происхождении загрязнения использовали геоаккумуляционный индекс (I_{geo}) согласно [3].

Результаты и обсуждение. Статистические параметры выборки и рассчитанные коэффициенты, выраженные через геохимические ряды, позволили выявить порядок накопления и определить приоритетные загрязняющие вещества.

Так, для наглядного представления полученных результатов были сформированы геохимические ряды, характеризующие содержание ТМ в порядке убывания величин (мг/кг): в донных отложениях г. Несвижа – $Zn_{49}Cr_{34}Pb_{15}Cu_{11}Ni_{11}Cd_{1,0}$; в донных отложениях фоновых территорий – $Zn_{31}Pb_{20}Cu_{15}Cr_{12}Ni_{12}Cd_{0,5}$; в почвенном покрове г. Несвижа – $Zn_{53}Pb_{30}Cr_{27}Cu_{10}Ni_9Cd_{0,9}$. Данные последовательности демонстрируют близкие концентрации, не различающиеся между собой более чем в 2 раза (Cd, Pb, Cr). Интенсивность обогащения донных отложений г. Несвижа относительно его почв слабо выражена: $Cr_{1,3}Ni_{1,2}Cd_{1,1}Cu_{1,1}Zn_{0,9}Pb_{0,5}$ [5].

На основании коэффициента аномальности K_a выявлены приоритетные по степени обогащения элементы – Cr, Cd и Zn с уровнем превышения фона $C_{рег.}$ в 2-4 раза. Сравнение фактических значений приоритетных в обогащении элементов с гигиеническими нормативами для почв позволяет рассматривать их в качестве загрязнителей. Так, зафиксировано загрязнение Cd и Zn – в 100 и 38 % случаев, при максимальных превышениях ПДК/ОДК в 1,5 и 3,2 раза соответственно. Установлены уровни загрязнения согласно геоаккумулятивному индексу I_{geo} : для Cr и Cd – «умеренно загрязненные», для Zn – «между незагрязненными и умеренно загрязненными», для остальных – преимущественно «незагрязненные» [5].

Таким образом, обогащение Ni и Cu, а также Pb находится на уровне фоновых вариаций, а уровень накопления Cr, Cd и Zn – несколько выше, очевидно имеет техногенную природу и может быть соотнесен, согласно I_{geo} , с уровнем загрязнения от «между незагрязненными и умеренно загрязненными» до «умеренно загрязненные».

Коэффициент суммарного загрязнения Z_c изменялся от 2,6 до 6,3 ($Z_c < 10$), что указывает на отсутствие значимой дифференциации и слабый уровень техногенного загрязнения [5]. Корреляционный анализ содержания элементов выполняли для донных отложений и почв на территории города с целью оценки характера связей между исследуемыми компонентами. Так, обобщенная корреляционная матрица, характеризующая донные отложения, показывает, что значимые корреляционные связи образует Cu (с Zn) – 0,8, а также Ni (с Zn, Cu и Cr) – 0,5-0,6, что характерно и для почв [5, 6].

Факторный анализ 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 выделены две главные компоненты

(главных фактора): фактор 1 (44,1 %) от общей дисперсии) указывает на ассоциацию Cu-Zn-Ni, а фактор 2 (28,6 %) – на Cd-Pb [5].

Ответственность за образование ассоциации Cu-Zn-Ni по фактору 1 возложена на выбросы от основных источников воздействия, которые в результате эмиссии поступают в почву, далее, в результате вымывания, попадают в пруды и накапливаются в донных отложениях. В пользу данного вывода свидетельствует доля от суммарных объемов выбросов, поступающих от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде, и от дорожного транспорта и передвижных источников, на которую приходится 87 % (1,34 т) и 90 % (2,51 т) элементов данной ассоциации соответственно. Кроме того, ранее доказана связь между выбросами от этих источников и образованием ассоциаций в почвах города [5, 6].

Установлена заметная прямая корреляционная связь между фактором 1 и содержанием органического вещества в донных отложениях ($r = 0,56$, $p < 0,012$). Геохимический смысл результата применения коэффициента ранговой корреляции интерпретирован следующим образом: концентрация элементов ассоциации Cu-Zn-Ni определяется содержанием органического вещества. При повышении зольности в диапазоне от 75 до 96 % наблюдается положительная связь между фактором 1 и зольностью. Диапазон зольности, характеризующий донные отложения г. Несвижа, изменяется от 69,3 до 95,8 % при среднем значении 83,4 %. Следовательно, положительная связь между фактором 1 и зольностью характерна для прудов Дикого (88 %), Замкового (81,2 %), Девичьего (82,3 %) и Альбянского (86,5 %) и не проявляется для Бернардинцев (71,6 %) [5].

Геохимическая природа образования ассоциации Cd-Pb по фактору 2, как и по фактору 1, очевидно, имеет техногенный характер. На долю элементов ассоциации приходится 5–8 % (0,12–0,15 т) в объеме выбросов от основных источников загрязнения. Однако уровень обогащения и загрязнения данными ТМ почв, участие в образовании ассоциаций, характеризующих почвенный покров (Ni-Cr-Cd и Cu-Zn-Pb), а также выявленная ранее связь с выбросами позволяют акцентировать внимание на выбросах, как на наиболее вероятном источнике, ответственном за поступление Cd и Pb в окружающую среду города, включая донные отложения. Кроме того, помимо вымывания из почв, в пруды Cd может поступать со стоком с сельскохозяйственных угодий с водами р. Уши и мелиоративных каналов, дренирующих осушенный массив «Каролино» выше города, а также накапливаться в донных отложениях в результате разложения различных организмов и водной растительности [5, 6].

Изучались подвижные формы ТМ. Установлено, что Cd и Pb характеризуются наибольшей подвижностью среди изучаемых элементов

донных отложений водоемов исследуемого города — 62,4-97,6 и 39,0-93,2 % от валовых форм соответственно. Согласно [10], высокие доли подвижных форм Cd и Pb с одной стороны, свидетельствуют об интенсивном накоплении данных элементов и росте загрязнения, а с другой — могут указывать на аккумуляцию Cd и Pb в донных отложениях, связанную с процессами соосаждения металлов с гидроксидами железа и марганца в глинистой фракции.

По результатам проведения факторного анализа изучали пространственное распределение нагрузки отдельно по двум факторам в разрезе точек опробования. Так, наименьшее значение факторов в обоих случаях, характеризующих наименьшей нагрузкой, были характерны для прудов Дикого и Замкового. Это закономерно, принимая в расчет, с одной стороны, техногенную природу обеих ассоциаций, а с другой — отсутствие выраженной техногенной нагрузки на водосборы данных прудов, занятые преимущественно парками. 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 [5].

Таким образом, если на основании применения геохимических коэффициентов был выявлен спектр элементов, характеризующихся 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 и проследить их связь с источником — воздействием определенных аэротехногенных факторов; выявить и оценить связи между компонентами выделенных ассоциаций, а также определить предопределяющие в накоплении факторы — связь фактора 1 с зольностью, а также предположить связь фактора 2 с содержанием глинистой фракции [5].

Сделаны выводы об особенностях распределения Zn в депонирующих средах г. Несвижа. Установлено достоверное распределение Zn в донных отложениях и почвах города. Отмечено образование сильных корреляционных связей Zn в формировании ассоциаций в донных отложениях и почвах, что согласуется с представлениями о распределении Zn в почвах городов [11], а также в речных донных осадках согласно выделенным Саеком Ю. Е. техногеохимическим ореолам, где именно Zn является характерным технофильным ТМ, отличительно характеризующим среду малого города.

Библиографические ссылки

1. *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.
2. *Натаров В. М., Лукашёв О. В., Савченко В. В.* Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике. Минск : Белорус. Дом печати, 2013. 213 с.
3. 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.
4. *Кузнецов В. А.* Геохимия аллювиального литогенеза. Минск : Наука и техника, 1973. 276 с.
5. *Романкевич Ю. А.* Распределение тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа // Природопользование. 2023. № 2. С. 97–110.
6. *Романкевич Ю. А.* Распределение тяжелых металлов в почвах на территории малого города (на примере г. Несвижа) // Природопользование. 2022. № 1. С. 56–70.
7. *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.
8. Геохимические провинции покровных отложений БССР / под ред. К. И. Лукашёва. Минск : Наука и техника, 1969. 470 с.
9. *Лукашёв О. В., Жуковская Н. В.* Ретроспективная оценка загрязнения почв и растительности г. Кобрина металлами // Природные ресурсы. 2009. № 1. С. 15–21.
10. *Головатый С. Е.* Тяжелые металлы в агроэкосистемах. Минск : Институт почвоведения и агрохимии, 2002. С. 239.
11. *Хомич В. С., Кухарчик Т. И., Какарека С. В.* Цинк в почвах городов Белоруссии // Почвоведение. 2004. № 4. С. 430–439.