

УДК 504.5:549.25/.29:594.1:556.5(476.2-21Гомель)

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ В ВОДОЕМАХ Г. ГОМЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, А. С. ПАРФЕНКОВА¹⁾

¹⁾Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

В настоящее время особое значение приобретают наблюдения за компонентами водных экосистем – гидробионтами и донными отложениями, обладающими способностью к депонированию загрязняющих веществ. Актуальными являются комплексные исследования поведения тяжелых металлов в водных экосистемах, которые позволяют давать интегральную оценку состояния водного объекта, определять вероятность вторичного загрязнения, выяснить пути миграции загрязняющих веществ. В статье рассмотрены вопросы, посвященные анализу количественных данных по содержанию тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. Получен массив данных за период исследований 2010–2021 гг., на основании которого обоснован выбор перловицы (*Unio pictorum* L.) обыкновенной в качестве объекта мониторинговых исследований экологического состояния водных объектов. Изменение содержания меди, свинца и никеля в тканях изучаемых видов моллюсков с 2010 по 2021 г. свидетельствует об изменении физико-химических условий в изучаемых водоемах, а также содержания биологически доступных форм металлов в воде и донных отложениях водных экосистем. Данный факт подтверждает наличие различных путей поступления тяжелых металлов в организм разных видов двустворчатых моллюсков, а также доступности соединений металлов в компоненты одной и той же водной экосистемы для разных видов моллюсков. В результате проведения анализа массива данных, полученных с 2010 по 2021 г., авторы определили фоновые концентрации содержания тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной, обитающей в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий: для свинца – 0,17 мг/кг, цинка – 19,20 мг/кг, меди – 0,71 мг/кг, марганца – 1084,22 мг/кг, кобальта – 0,25 мг/кг, хрома – 0,71 мг/кг, никеля – 0,95 мг/кг. Показаны закономерности изменения количественного содержания тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков.

Ключевые слова: тяжелые металлы; перловица обыкновенная; беззубка двустворчатая; донные отложения; водоемы; водотоки; медь; цинк; хром; никель; свинец; марганец; ряды содержания.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», задание «Природные ресурсы и окружающая среда 1.02», тема «Комплексная оценка экологического состояния и выявление пространственно-временных изменений водных экосистем урбанизированных территорий (на примере юго-восточной части Беларуси)».

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Парфенкова АС. Анализ загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двустворчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:39–47.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-39-47>

Авторы:

Татьяна Викторовна Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Альбина Викторовна Хаданович – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Ольга Викторовна Пырх – старший преподаватель кафедры химии.
Анастасия Сергеевна Парфенкова – студентка биологического факультета.

For citation:

Makarenko TV, Khadanovich AV, Pyrkh OV, Parfenkova AS. Analysis of heavy metal contamination of soft tissues of bivalve mollusks in water bodies of Gomel and adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:39–47. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-39-47>

Authors:

Tatyana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry.
tmakarenko1968@bk.ru
Albina V. Khadanovich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of chemistry.
hadanovich@gsu.by
Olga V. Pyrkh, senior lecturer at the department of chemistry.
korytko@gsu.by
Anastasia S. Parfenkova, student at the faculty of biology.
n.parfenkova@mail.ru

ANALYSIS OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOFT TISSUES OF BIVALVE MOLLUSKS IN WATER BODIES OF GOMEL AND ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO^a, A. V. KHADANOVICH^a, O. V. PYRKH^a, A. S. PARFENKOVA^a

^aFrancisk Skorina Gomel State University,
104 Saveckaja Street, Gomel 246028, Belarus
Corresponding author: T. V. Makarenko (tmakarenko1968@bk.ru)

Currently, observations of the components of aquatic ecosystems – hydrobionts and bottom sediments with the ability to deposit pollutants – are of particular importance. Comprehensive studies of the behavior of heavy metals in aquatic ecosystems are relevant and make it possible to provide an integral assessment of the state of the water body, determine the probability of secondary pollution, find out the migration paths of pollutants, and therefore their implementation is relevant. The article deals with the analysis of quantitative data on the content of heavy metals in the soft tissues of mollusks living in the reservoirs of Gomel and adjacent territories. An array of data was obtained for the period of research in 2010–2021, on the basis of which the choice of an ordinary pearl barley (*Unio pictorum* L.) as an object of monitoring studies of the ecological state of water bodies was justified. The change in the content of copper, lead and nickel in the tissues of the studied mollusk species during the period of research from 2010 to 2021 indicates a change in the physicochemical conditions in the studied reservoirs, as well as a change in the content of biologically accessible metal forms in water and bottom sediments of aquatic ecosystems. This fact confirms the presence of different routes of entry of heavy metals into the body of different species of bivalve mollusks, as well as the different availability of metal compounds in components of the same aquatic ecosystem for different species of mollusks. As a result of the analysis of the array of data obtained from 2010 to 2021, the authors determined the background concentrations of heavy metals in the tissues of common pearl barley living in the reservoirs of Gomel and adjacent territories: for lead – 0.17 mg/kg, zinc – 19.20 mg/kg, copper – 0.71 mg/kg, manganese – 1084.22 mg/kg, cobalt – 0.25 mg/kg, chromium – 0.71 mg/kg, nickel - 0.95 mg/kg. Patterns of change in the quantitative content of heavy metals in the soft tissues of molluscs are shown.

Keywords: heavy metals; common barley; bivalve toothless; bottom sediments; reservoirs; streams; copper; zinc; chromium; nickel; lead; manganese; content series.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the SPNI «Natural Resources and Environment», subprogram 1 «Natural Resources and their Rational Use», Task «Natural Resources and Environment 1.02», topic «Comprehensive assessment of the ecological state and identification of spatial and temporal changes in aquatic ecosystems of urbanized territories (on the example of the south-eastern part of Belarus)».

Введение

При проведении экологического мониторинга одним из приоритетных направлений являются исследования окружающей среды городов и близлежащих к ним территорий, так как деятельность промышленно-индустриальных центров приводит к деградации, а иногда и к полному уничтожению природных экосистем. Негативное воздействие города на природную среду находится в прямой зависимости от уровня развития промышленных предприятий и их функционирования. Немаловажное значение имеют источники и формы поступления поллютантов [1–3]. Антропогенные источники загрязнения оказывают значительное влияние на накопление тяжелых металлов в водных экосистемах. В связи с этим одной из актуальных задач является изучение распределения загрязнителей и уровня их накопления с целью установления механизмов их миграции в водную среду, получения необходимой информации для использования прибрежных территорий в качестве рекреационных зон. В последние годы серьезную озабоченность вызывает повышение уровня тяжелых металлов, обнаруживаемых в донных отложениях и гидробионтах [4]. В связи с этим большой интерес представляет изучение состояния организмов, обитающих на территориях с повышенным антропогенным влиянием.

Техногеохимические аномалии чаще всего отмечаются в районах водных артерий, дренирующих города, и водоемов городской зоны. В городах имеется категория водных объектов, которые не имеют определенного статуса и используются неконтролируемо. Малые водоемы и водотоки городов не включены в систему мониторинга поверхностных вод, они практически не контролируются санитарно-эпидемиологическими службами. Особенности функционирования экосистем такого типа в условиях урбанизированных территорий исследованы недостаточно и, следовательно, неясны перспективы их дальнейшего существования с городскими ландшафтами. До недавнего времени система контроля за состоянием водных объектов базировалась только на анализе водной среды. Однако динамичность и вариабельность содержания химических элементов в воде значительно снижают информативность

данных. Поэтому к наиболее актуальным проблемам Национальной системы мониторинга окружающей среды относятся проблемы расширения методологической базы контролируемых сред, позволяющие реализовать принципы экосистемного подхода к охране окружающей среды. Все большее значение приобретают наблюдения за компонентами водных экосистем (в том числе гидробионтами и донными отложениями), обладающими способностью к депонированию загрязняющих веществ [5].

Комплексные исследования в области поведения тяжелых металлов в водных экосистемах позволяют давать интегральную оценку состояния водного объекта, определять вероятность вторичного загрязнения, выяснить пути миграции загрязняющих веществ. В отдельных исследованиях показано [6; 7], что в моллюсках по сравнению с другими гидробионтами отмечается наибольшее накопление большинства тяжелых металлов. Моллюски как бентосные организмы обладают повышенной восприимчивостью к загрязнению водных экосистем и, прежде всего, донных отложений.

Цель исследования – мониторинговое исследование загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двустворчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, установление фоновых концентраций для мягких тканей перловицы обыкновенной водоемов изучаемого региона.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны представители класса двустворчатых моллюсков – перловица обыкновенная – *Unio pictorum* L. и беззубка обыкновенная – *Anodonta cygnea* L., образцы которых отбирались в летний период (июль – август) в водоемах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий, а также р. Сож. Выбранные водоемы с близкими физико-географическими условиями (географическое положение, климат, почвы, геологическое строение, растительность), но с существенным различием в степени и специфике хозяйственного освоения и техногенной нагрузки.

Водоемы Дедно, Шапор, Любенское, Малое, У-образное, Волотовское располагаются на территории города. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. Озера Любенское, Дедно, Шапор и старица вблизи д. Поляновка – это пойменные водоемы, не утратившие связь с коренным руслом р. Сож. Гребной канал, связанный с р. Сож, – водоем, искусственно созданный для отвода излишка воды в половодье от д. Якубовка. Озеро Володькино – русловой водоем, возникший в результате расширения коренного русла р. Сож в месте впадения в него р. Ипуть. Озера Малое и Круглое – водоемы, образовавшиеся на месте карьеров по добыче глины, а озера Волотовское и У-образное некоторое время имели связь с р. Сож и остались после осушительной мелиорации в виде отдельных водоемов.

Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб из реки выше города в районе д. Кленки, в городской черте в районе парковой набережной и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста. Старица у д. Поляновка расположена на 10 км выше по течению от точки отбора проб на р. Сож у д. Кленки (рис. 1, 2).

Изучаемые водоемы отличаются различным гидрологическим режимом. Озера Малое, Круглое, У-образное, Волотовское являются полностью замкнутыми непроточными водоемами. Имеющие выход в р. Сож озера Шапор, Дедно, Любенское, Гребной канал обладают неодинаковой степенью проточности в зависимости от сезона, которая достигает своего максимума во время половодий. Для оз. Володькино, которое представляют собой расширение русла реки, характерна наибольшая скорость течения. Глубина водоемов существенно колеблется: от 1 до 6–8 м [8] в Гомеле глубина водоемов после добычи песка достигает 10–19 м.

Организованные выпуски промышленных и хозяйствственно-бытовых стоков производятся только в оз. Дедно (Прудковский и Хатаевичский коллекторы, принимающие стоки нескольких автопредприятий, фабрики «Спартак», речного порта и др.). Все водоемы г. Гомеля в той или иной степени могут быть являться объектом насанкционированного поступления загрязняющих веществ. В оз. Роповское осенью 2021 г. отмечен массовый мор рыбы, произошедший вследствие загрязнения акватории водоема.

Оз. Володькино принимает воду р. Ипуть, в которую выше по течению поступают стоки предприятий г. Добруша. На участке реки выше города по течению (д. Кленки) вдоль берега располагается большое количество дачных участков, огороды которых в отдельных случаях подходят близко к обрывистому берегу, что дает возможность поверхностному стоку беспрепятственно поступать в реку. В парковой зоне водоток принимает стоки ливневых канализаций города, а также поверхностный сток с территории Гомельского городского порта. На участке ниже парковой зоны и до административной черты города р. Сож принимает воду из оз. Шапор и нескольких речных заливов, что может являться дополнительным источником загрязнения речной системы.

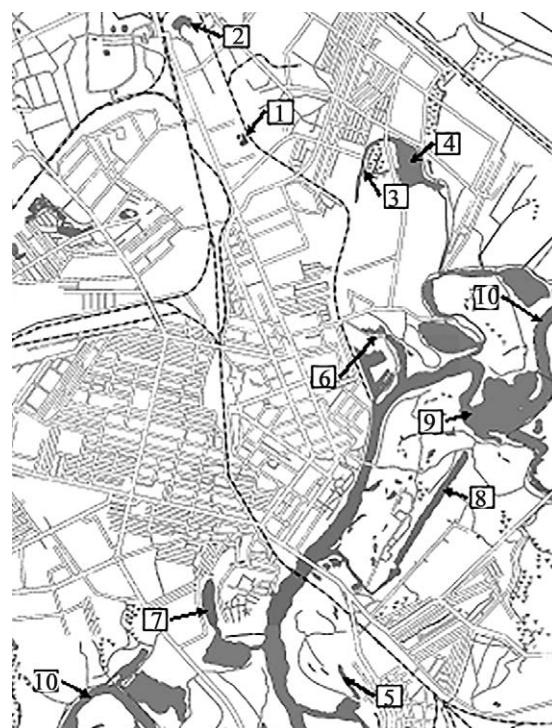


Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля: 1) оз. Малое; 2) оз. Круглое; 3) оз. У-образное; 4) оз. Волотовское; 5) оз. Шапор; 6) оз. Дедно; 7) оз. Любенское; 8) гребной канал; 9) оз. Володькино; 10) р. Сож

Fig. 1. The layout of the reservoirs of Gomel: 1) Maloye; 2) Krugloye; 3) U-obraznoye; 4) Volotovskoye; 5) Shapor; 6) Dedno; 7) Lyubenskoye; 8) Grebnoy kanal; 9) Volodkino; 10) Sozh

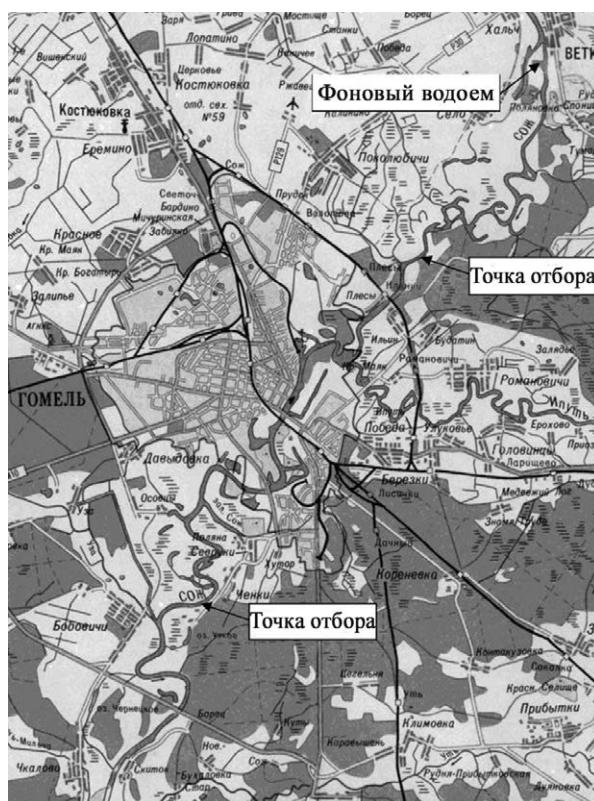


Рис. 2. Схема отбора проб (точки отбора проб представляют собой участки р. Сож в районе д. Кленки и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста)

Fig. 2. Sampling scheme (sampling points are sections of r. Sozh in the area of the village of Klenka and below the administrative line of the city downstream in the area of the Gomel bypass bridge)

В оз. Шапор поступают поверхностный сток с территории предприятий ОАО «Гомельдрев», ЧПУП «Фанерно-спичечный комбинат» и «Гомельбоби». В оз. Малое поступает поверхностный сток с территории троллейбусного парка № 1 и проходящих вдоль берега железной дороги и оживленной автомагистрали. Можно предположить о поступлении в оз. Малое ливневых либо других стоков, так как в озеро встроена труба, из которой в водоем постоянно поступает вода. Несмотря на то, что оз. Круглое находится практически в пригороде, вдоль берега водоема проходит железная дорога и оживленная автомагистраль. Кроме того, учитывая расположение водоема (узкая часть озера, так называемый «хвост», подходит прямо к ул. Федюнинской): в оз. Круглое может поступать поверхностный сток с ул. Федюнинской, где расположены промышленные предприятия города.

Вдоль береговой линии водоемов У-образное и Волотовское расположены крупные городские автомагистрали и остановки городского транспорта. На берегу оз. У-образное располагается рынок «Прудковский». На отдельных участках берегов Гребного канала практически к урезу воды подходят огороды частного сектора и подворья жителей д. Якубовка. Такая же ситуация наблюдается по берегам оз. Люbenское с той лишь разницей, что по берегам последнего расположен частный сектор 5-го микрорайона г. Гомеля и вдоль берега идут автомагистрали города. В оз Люbenское также, как и в оз. Малое, встроена труба, по которой, вероятно, сбрасываются в водоем ливневые стоки.

Влиянию выбросов в атмосферу предприятий Северного промузла озера Малое, Круглое, У-образное и Волотовское. Территория между водоемами обычно не спланирована, хотя имеется положительный опыт адаптации таких водоемов для рекреации. Все без исключения городские водоемы и водоемы пригородной зоны используются для рыбной ловли, отчасти полива и купания.

Определение содержания тяжелых металлов в пробах проводилось на базе Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларусь» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с пробоподготовкой образцов в системе микроволнового вскрытия.

Статистическая обработка осуществлялась с помощью *Microsoft Office Excel 2007*. Проведен парный двухвыборочный t-тест для средних, в результате которого гипотеза о достоверности различий между содержанием металлов в мягких тканях моллюсков разных видов различных водоемов подтвердилась, что указывало о наличии высокой достоверности отличий между выборками при уровне значимости $p = 0,01$.

Результаты исследования и их обсуждение

У водных организмов обнаружаются специфические черты, связанные с особенностями их существования в воде, в том числе и в проявлении откликов на воздействие различных токсикантов, включая тяжелые металлы. В организм гидробионтов тяжелые металлы попадают с пищей или через покровы. Токсичное действие тяжелых металлов на живые организмы проявляется на всех уровнях организации биологических систем – от молекулярно-биохимического до биоценотического. Они являются протоплазматическими ядами для всех живых объектов: грубо нарушают структуры коллоидных систем, денатурируют белки. При очень большом разведении тяжелые металлы связывают и блокируют активные центры ферментов [4]. Двустворчатые моллюски имеют фильтрационный тип питания, они питаются либо мелкими планктонными организмами, фильтруя большое количество воды, либо детритом. Пищевые частицы вместе с током воды, который вызывается работой микроскопических ресничек, покрывающих изнутри мантийные складки и некоторые органы мантийной полости, засасываются через вводный сифон в мантийную полость и с помощью тех же ресничек подводятся к ротовому отверстию, попадают в пищевод и далее в желудок. Они также ощупывают субстрат с помощью пары щупалец, образуемых краем мантии. Щупальца покрыты слизью и снабжены ресничками. Щупальца собирают со дна пищевые частицы и сортируют их, отбрасывая слишком крупные и направляя остальные в рот.

С целью обоснования выбора перловицы (*Unio pictorum* L.) обыкновенной в качестве объекта мониторинговых исследований экологического состояния водных объектов, расположенных на территории г. Гомеля и прилегающих к городу территорий, проведен сравнительный анализ большого объема экспериментальных данных по содержанию тяжелых металлов в тканях двух видов двустворчатых моллюсков – перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.) и беззубки обыкновенной (*Anodonta cygnea* L.), полученного с 2010 по 2021 г. На рис. 3 представлены результаты количественного определения тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков за период исследования.

Из семи изучаемых металлов с 2010 по 2021 г. только содержание меди в мягких тканях беззубки в 1,3 раза превышало концентрации этого же металла в сравнении с тканями перловицы и различия не являлись достоверными. Беззубка накапливалась в тканях значительно больше никеля и свинца, чем перловица (полученные данные согласуются исследованиями ряда авторов (табл. 1)). Изменение содержания меди, свинца и никеля в тканях изучаемых видов моллюсков свидетельствует об изменении физико-химических условий в изучаемых водоемах, а также об изменении содержания биологически доступных форм

металлов в воде и донных отложениях водных экосистем. Данный факт подтверждает наличие различных путей поступления тяжелых металлов в организм разных видов двустворчатых моллюсков, а также о разной доступности соединений металлов в компоненты одной и той же водной экосистемы для разных видов моллюсков.

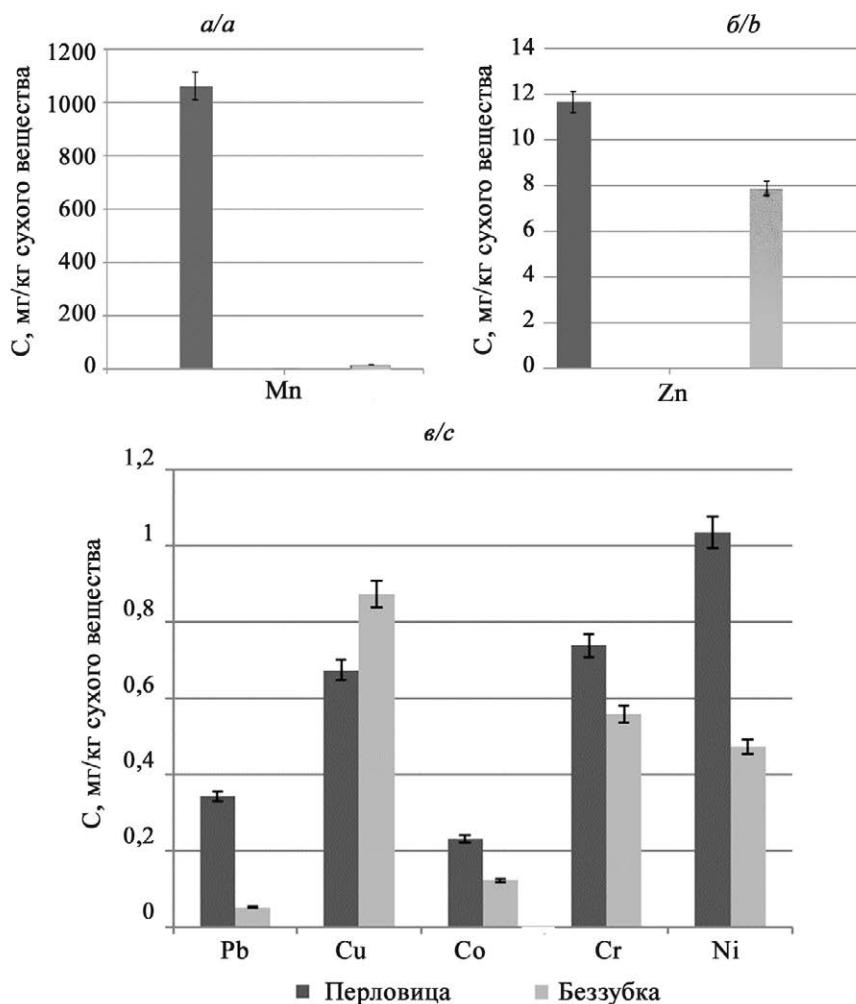


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в тканях беззубки и перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий (усредненные значения за 2010–2021 гг.): *a* – Mn; *b* – Zn; *c* – Pb, Cu, Co, Cr, Ni

Fig. 3. The content of heavy metals in the tissues of toothless and pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories (averaged values in the period 2010–2021): *a* – Mn; *b* – Zn; *c* – Pb, Cu, Co, Cr, Ni

Таблица 1

Содержание (мг/кг сухого вещества) тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков [5; 11]

Table 1

Content (mg/kg of dry matter) of heavy metals in soft tissues of mollusks [5; 11]

Вид	Металлы						
	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni	Pb
<i>Anodonta cygnea</i> L.*	9,62 ± 0,76	146,82 ± 10,28	2 431,97 ± 218,88	0,57 ± 0,05	1,33 ± 0,1	3,58 ± 0,32	1,80 ± 0,16
<i>Unio pictorum</i> L.*	11,11 ± 0,99	209,70 ± 16,78	2 518,28 ± 251,83	0,70 ± 0,05	1,94 ± 0,16	1,94 ± 0,14	1,08 ± 0,09
Фоновое по Беларуси** [5]	2,1–15,0	10,0–45,0	320–901	–	0,21–3,0	2,0–15,0	–
Фоновое по России*** [9]	25,0	80,0–200,0	10,4–120,0	0,04–0,40	0,7	1,8	–

Примечание. *Собственные исследования; **слабозагрязненные водоемы Беларуси; ***слабозагрязненные водоемы России.

В большинстве исследуемых водоемов отлов беззубки был затруднительным, так как она обитает на более глубоких частях, чем перловица, и в значительно меньшем количестве. Все вышесказанное делает беззубку менее привлекательным объектом для экологического мониторинга загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами. Таким образом, (*Unio pictorum* L.) для качественной оценки состояния водоемов г. Гомеля и прилегающих к нему территорий была выбрана перловица обыкновенная.

При проведении экологических исследований важно иметь фоновые величины содержания тяжелых металлов в водоемах и гидробионтах для оценки загрязненности водных экосистем и определения доступности соединений тяжелых металлов в водных объектах. В период с 2000 по 2010 г. в качестве фонового был выбран водоем, не имеющий видимой антропогенной нагрузки и расположенный на расстоянии 10 км выше города по течению (старица р. Сож возле д. Поляновка), который загрязняется только воздушными массами города. Данный водоем имел тесный контакт с водой р. Сож. Как известно, загрязненные воздушные массы городских агломераций могут оказывать влияние на территории, удаленные на 20–25 км [10; 11], загрязняя ближайшие к городу территории. В донных отложениях и в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоеме, выявлено минимальное или близкое к минимальному значению содержание соединений изучаемых металлов [12]. Однако с 2010 г., вследствие снижения количества атмосферных осадков, наблюдалась тенденция снижения уровня воды в р. Сож, с которой связана старица, и в самой старице. В результате водоем утратил связь с р. Сож, исчезло течение, появилось большое количество водных растений, а в донных отложениях увеличилось содержание органических фракций. Значения потерь при прокаливании, характеризующих содержание органического вещества, указывают на его увеличение в донных отложениях с 3 до 11 %.

Результаты исследований, проводимых с 2010 по 2019 г., показали, что содержание отдельных тяжелых металлов в моллюсках старицы в различные временные промежутки было сравнимо с концентрациями исследуемых соединений в особях, обитающих в городских водоемах, а в некоторых случаях даже превышало таковое. Объяснение данным фактам может быть следующим – в относительно «чистых» зонах живые организмы накапливают практически все доступные формы тяжелых металлов, тогда как на загрязненных территориях включается механизм блокировки, который предотвращает поступление значительной концентрации в живые организмы. Высока вероятность, что при изменившихся физико-химических условиях водоема в донных отложениях и воде стариичного комплекса изменилась доступность тяжелых металлов компонентам водной экосистемы. В организм гидробиона поступление металлов происходит 2 путями: из воды через покровные ткани (сорбция на поверхности раковины), через желудочно-кишечный тракт в результате усвоения пищи.

Таким образом, абиотические факторы могут рассматриваться как агенты воздействия на организм в качестве причин экологического неблагополучия. Транспорт металлов через клеточную мембрану может быть пассивный и активный. При пассивном транспорте перенос происходит путем диффузии по градиенту концентрации, фильтрации через поры в мембранах. Если бы ионы, атомы или молекулы, поступившие в клетку, оставались во внутренней среде в свободном виде, то равновесие с внешней средой при пассивном поступлении по градиенту концентрации наступало бы относительно быстро, и внутреннее содержание вещества не было бы высоким. Если происходит внутриклеточное связывание агента, то концентрация свободного вещества в клетке остается низкой. Градиент поддерживается и, следовательно, поступление вещества продолжается, даже если общее его содержание в клетке многократно превышает концентрацию в окружающей среде [13]. Это является фактом вторичного загрязнения, когда тяжелые металлы переходят в доступные формы для биологических объектов.

В сложившихся условиях встал вопрос о необходимости определения фоновых уровней содержания тяжелых металлов в тканях моллюсков с целью сравнительного анализа при изучении загрязнения водных экосистем. Для установления фоновых концентраций тяжелых металлов в мягких тканях перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.) был использован статистический метод¹. Согласно данному методу, отдельно в каждом выделенном периоде (сезоне) исключаются непоказательные экстремальные значения концентрации, затем рассчитывают средние значения концентрации тяжелых металлов в исследуемых образцах. Период с наибольшей средней концентрацией вещества принимают в рассматриваемой версии за основную фоновую величину.

В результате проведения анализа массива данных, полученных с 2010 по 2021 г., авторы определили фоновые концентрации содержания тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.), обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий: для свинца – 0,17 мг/кг, цинка – 19,20 мг/кг, меди – 0,71 мг/кг, марганца – 1084,22 мг/кг, кобальта – 0,25 мг/кг, хрома – 0,71 мг/кг, никеля – 0,95 мг/кг.

Полученные данные по содержанию исследуемых тяжелых металлов в тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля, сравнили с результатами исследований, проведенных в 2010 г. (табл. 2).

¹ТКП 17.06-04-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Гідрасфера. Правілы ўстанаўлення фонавых канцэнтрацый хімічных рэчываў у вадзе водных аб'ектаў: введ. 17.06.2012. Минск: Госстандарт, 2012. 23 с.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 2

The content of heavy metals (mg/kg) in pearl barley tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Год	Тяжелые металлы						
	Pb	Zn	Cu	Mn	Co	Cr	Ni
2010	1,08 ± 0,09	209,70 ± 18,87	11,11 ± 0,99	2518,28 ± 176,28	0,70 ± 0,05	1,94 ± 0,14	1,94 ± 0,16
2019	0,22 ± 0,02	24,83 ± 1,74	0,92 ± 0,06	1195,61 ± 95,65	0,26 ± 0,02	0,60 ± 0,05	0,96 ± 0,07
2020	0,44 ± 0,04	12,86 ± 0,9	0,67 ± 0,05	1060,13 ± 74,21	0,24 ± 0,02	0,74 ± 0,05	1,04 ± 0,09
2021	0,55 ± 0,04	37,19 ± 3,35	1,05 ± 0,07	1079,49 ± 97,15	0,49 ± 0,04	2,12 ± 0,15	3,19 ± 0,26

Изучая динамику содержания тяжелых металлов в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий с 2010 по 2021 г., следует отметить немонотонный характер варьирования концентраций изучаемых металлов. Так, для соединений цинка, меди, марганца и кобальта характерно значительное снижение содержания металлов с 2010 по 2020 г. в 16,3; 16,3; в 2,4; в 2,9 раза соответственно (различия являются достоверными). Далее прослеживается тенденция увеличения содержания цинка в 1,25 раза, меди – в 1,6; марганца – в 1,1; кобальта – в 2 раза в период с 2020 по 2021 г. (для марганца различия недостоверны).

Снижение концентраций металлов в тканях перловицы изучаемых водоемов отмечалось с 2010 по 2019 г. (все различия являются достоверными) для свинца в 4,9 раза; хрома – в 3,2; никеля – в 2 раза, что может быть обусловлено протеканием процессов самоочищения водоема и рядом других факторов. Например, известно, что основным источником поступления свинца и его соединений в окружающую среду являлись метилированный бензин и промышленные выбросы. В последние десятилетия в Республике Беларусь длительное время не использовался бензин с данными характеристиками, производственные выбросы в атмосферу сократились, а также в г. Гомеле отсутствуют предприятия, выбрасывающие соединения свинца в значительных количествах.

С 2019 по 2021 г. отмечена тенденция увеличения концентраций в тканях моллюсков свинца в 2,5 раза; хрома в 3,5; никеля в 3,3 раза, что свидетельствует об увеличении биологической доступности их форм в донных отложениях и изменениях внутриводоемных процессов, приводящих к доступности металлов для моллюсков, а также, вероятно, влиянием факторов вторичного загрязнения тяжелыми металлами. Различия в содержании соединений в тканях моллюсков являются достоверными.

Для соединений марганца отмечена тенденция снижения содержания металла в мягких тканях моллюсков на протяжении всего исследования. Двустворчатые моллюски являются активными концентраторами этого металла. Они постоянно накапливают его соединения в значительных количествах. Однонаправленное снижение концентрации металла свидетельствует как об отсутствии поступления соединений марганца в водоемы, так и о содержании их в донных отложениях в недоступных формах. Факт немонотонного характера варьирования содержания изучаемых металлов в мягких тканях моллюсков требует дальнейшего детального изучения.

Заключение

В ходе исследований установлено, что перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) является приоритетным видом для качественной оценки состояния водоемов г. Гомеля и прилегающих к нему территорий.

Определены фоновые концентрации тяжелых металлов в тканях моллюсков за 2010–2021 гг. с целью сравнительного анализа при изучении загрязнения водных экосистем. Проведен анализ количественного содержания тяжелых металлов. Составлены ряды содержания тяжелых металлов в тканях перловицы:

2010 г.: Mn (2518) > Zn (209,7) > Cu (11,1) > Cr (1,9) > Ni (1,9) > Pb (1,0) > Co (0,7);

2019 г.: Mn (1195,6) > Zn (24,8) > Ni (1,0) > Cu (0,9) > Cr (0,6) > Co (0,3) > Pb (0,2);

2020 г.: Mn (1060,1) > Zn (12,9) > Ni (1,0) > Cr (0,7) > Cu (0,7) > Pb (0,4) > Co (0,2);

2021 г.: Mn (1079,5) > Zn (37,2) > Ni (3,2) > Cr (2,1) > Cu (1,1) > Pb (0,6) > Co (0,5).

Для указанных металлов отмечена тенденция к снижению содержания их соединений в тканях моллюсков, что свидетельствует об улучшении экологического состояния окружающей среды Гомельского региона, что связано с природоохранной политикой, проводимой в Республике Беларусь. Однако почвы, прилегающие к водным экосистемам и донным отложениям, накопили за длительное время значительные количества тяжелых металлов и могут служить вторичным источником загрязнения водных экосистем, что подтверждается повышением содержания всех изучаемых металлов в 2021 в сравнении с 2019 и 2020 годами. С учетом вышеприведенных фактов, быстрого очищения биологических компонентов водных экосистем в скором времени не ожидается.

Библиографические ссылки

1. Кадацкая ОВ, Санец ЕВ, Овчарова ЕП. *Гидрографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города*. В: Витченко АН и др. редакторы. Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VI Международной научной конференции. Минск: БГУ; 2018. с. 194–196.
2. Постевая МА, Слуковский ЗИ. Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер. *Вестник МГТУ*. 2021;24(2):190–201.
3. Адаменко ВН. *Климат большого города*. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД; 1975. 70 с.
4. Силкина ЕН, Силкин ЮА, Силкин МЮ, и др. Влияние тяжелых металлов на функциональные и биохимические показатели морских гидробионтов как биоиндикаторов экологического состояния среды. *Современные проблемы науки и образования*. 2016;6:11.
5. Байчоров ВМ, Тищиков ГМ, Рошина НН. *Экологические риски и оценка состояния водотоков Беларуси*. Минск: Белорус. наука; 2006. 118 с.
6. Дерягин ВВ, Назаренко НН, Девятова ЕВ. Аккумуляция тяжелых металлов представителями семейства lymnaeidae как отклик на критические уровни техногенного загрязнения водоемов южного Урала. *Самарский научный вестник*. 2019;8(3):31–38.
7. Стеблевская НИ, Полякова НВ, Жадко ЕА, и др. Микроэлементный состав тканей некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого (бухта Северная). *Вестник ДВО РАН*. 2013;5:127–132.
8. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ. *Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси*. Минск: Минсктиппроект; 2004. 260 с.
9. Никаноров АМ, Жулидов АВ. *Биомониторинг металлов в пресноводных системах*. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1991. 312 с.
10. Давыдова НД, Шинкарева ГЛ, Касимов НС. *Выявление элементов-загрязнителей их нагрузки и распределение в объектах природной среды*. Иркутск: Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН; 2019. 44 с.
11. Михалевич РВ и др. *Состояние природной среды Беларуси: ежегодное информационно-аналитическое издание*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2020. 101 с.
12. Макаренко ТВ. *Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий* [автореферат диссертации]. Минск: [б. и.]; 2010. 28 с.
13. Гордеев ВВ. *Микроэлементы: Химия океана*. Москва: Наука; 1979. Том 1. с. 337–375.

References

1. Kadatskaya OV, Sanets EV, Ovcharova EP. *Gidrograficheskaja set' urbanizirovannyh territorij kak jelement formirovaniya prirodnogo karkasa goroda*. [Hydrographic network of urbanized territories as an element of the formation of the natural frame of the city]. In: Vitchenko AN, et al., editors. *Sovremennye problemy landshaftovedenija i geoekologii. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. [Modern problems of landscape science and geoecology: materials of the VI International scientific conference]. Minsk: BSU; 2018. p. 194–196. Russian.
2. Postevaya MA, Slukovsky ZI. *Analiz atmosfernyh vybrosov v g. Murmanske i ih svyaz's zagrijazneniem gorodskih ozer*. [Analysis of atmospheric emissions in the city of Murmansk and their connection with the pollution of urban lakes]. *Vestnik MGTU*. [Bulletin of MSTU]. 2021;24(2):190–201. Russian.
3. Adamenko VN. *Klimat bol'shogo goroda*. [Big city climate]. Obninsk: VNIIGMI-MTsD, 1975. 70 p. Russian.
4. Silkina EN, Silkin YuA, Silkin MU, et al. *Vlijanie tjazhelyh metallov na funkcional'nye i biohimicheskie pokazateli morskikh gidrobiontov kak bioindikatorov jekologicheskogo sostojanija sredy*. [The influence of heavy metals on the functional and biochemical parameters of marine hydrobionts as bioindicators of the ecological state of the environment]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. [Modern problems of science and education]. 2016;6:11. Russian.
5. Baichorov VM, Tishchikov GM, Roshchina NN. *Jekologicheskie riski i ocenka sostojanija vodotokov Belarusi*. [Environmental risks and assessment of the state of watercourses in Belarus]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2006. 118 p. Russian.
6. Deryagin VV, Nazarenko NN, Devyatova EV. *Akkumulacija tjazhelyh metallov predstaviteljami semejstva lymnaeidae kak otklik na kriticheskie urovnii tehnogenного загрязнения vodoemov juzhnogo Urala*. [Accumulation of heavy metals by members of the lymnaeidae family as a response to critical levels of technogenic pollution of water bodies in the southern Urals]. *Samarskij nauchnyj vestnik*. [Samara Scientific Bulletin]. 2019;8(3):31–38. Russian.
7. Steblevskaya NI, Polyakova NV, Zhadko EA, et al. *Mikroelementnyj sostav tkanej nekotoryh vidov gidrobiontov zaliva Petra Velikogo (buhta Severnaja)*. [Trace element composition of tissues of some hydrobiont species in Peter the Great Bay (Severnaya Bay)]. *Vestnik DVO RAN*. [Vestnik FEB RAS]. 2013;5:127–132. Russian.
8. Homich VS, Kakareka SV, Kuharchik TI. *Jekogeohimija gorodskih landshaftov Belarusi*. [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk: Minskippoproekt; 2004. 260 p. Russian.
9. Nikanorov AM, Zhulidov AV. *Biomonitoring metallov v presnovodnyh sistemah*. [Biomonitoring of metals in freshwater systems]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 312 p. Russian.
10. Davydova ND, Shinkareva GL, Kasimov NS. *Vyjavlenie jelementov-zagrijaznitelej ih nagruzki i raspredelenie v obektaх prirodnoj sredy*. [Identification of pollutant elements of their load and distribution in the objects of the natural environment]. Irkutsk: Institute of Geography V. B. Sochava SB RAS; 2019. 44 p. Russian.
11. Mikhalevich RV, et al. *Sostojanie prirodnoj sredy Belarusi: ezhegodnoe informacionno-analiticheskoe izdanie*. [The state of the natural environment of Belarus: an annual information and analytical publication]. Minsk: BelNIC «Ecology»; 2020. 101 p. Russian.
12. Makarenko TV. *Raspredelenie tjazhelyh metallov v bioticheskikh i abioticheskikh komponentah vodnyh jekosistem Gomelja i prilegajushhih territorij* [Distribution of heavy metals in biotic and abiotic components of aquatic ecosystems of Gomel and adjacent territories] [PhD thesis]. Minsk: [publisher unknown]; 2010. 28 p. Russian.
13. Gordeev VV. *Mikroelementy: Himija okeana* [Trace elements: Chemistry of the ocean]. Moscow: Nauka; 1979. Tom 1. p. 337–375. Russian.