
ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК [546.56+546.711]:594.3(476.2–25)

НАКОПЛЕНИЕ МЕДИ И МАРГАНЦА В СИСТЕМЕ «ДНО – МОЛЛЮСКИ» В ВОДОЕМАХ Г. ГОМЕЛЯ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, Е. А. ПОПИЧЕВА¹⁾

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

Проведена экологическая оценка содержания и накопления меди и марганца донными отложениями водных экосистем г. Гомеля и мягкими тканями моллюсков класса брюхоногих (Gastropoda): прудовика обыкновенного (*Limnaea stagnalis* L.), живородки речной (*Viviparus viviparus* L.). Получен массив данных за период исследований 2019–2021 гг., на основании которого определены фоновые концентрации меди (8,57 мг/кг) и марганца (140,0 мг/кг) в донных отложениях. Фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного составило – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно. В большинстве исследуемых водоемов отмечено снижение средних значений содержания меди в донных отложениях в 2020 и 2021 гг. в 1,4–4,9 раза

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Попичева ЕА. Накопление меди и марганца в системе «дно – моллюски» в водоемах г. Гомеля и на прилегающих территориях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:4–15.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-4-15>

For citation:

Makarenko TV, Khadanovich AV, Pyrkh OV, Popicheva EA. Features of copper and manganese accumulation in the system «bottom – mollusks» of reservoirs of the city of Gomel and adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:4–15. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-4-15>

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.
Екатерина Александровна Попичева – магистрант биологического факультета.

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
Ekaterin A. Popicheva, master's degree student at the faculty of biology.
ekaterinapopicheva@mail.ru

по сравнению с таковыми в 2019 г., за исключением озер Дедно и Шапор, в которых содержание меди увеличивалось. Диапазон варьирования соединений данного металла за период исследований составил 1,63–47,57 мг/кг. Высокое содержание марганца характерно для донных отложений р. Сож выше черты города по течению (д. Кленки) и оз. Володькино, причем установлено превышение концентрации в 2,0 раза и более величин, характерных для отложений водоемов, принимающих загрязненный поверхностный сток г. Гомеля. Снижение отмечено для донных отложений оз. Шапор и У-образное, а также участков р. Сож выше города по течению и для парковой зоны. Диапазон варьирования содержания соединений марганца в донных отложениях составил 31,28–917,57 мг/кг. Содержание меди в тканях живородки выше в 2021 г. по сравнению с 2019 и 2020 гг. во всех водоемах, за исключением старицы р. Сож, при этом концентрация данного металла изменялась в пределах 4,52–32,93 мг/кг. Установлено снижение содержания марганца в мягких тканях живородки с 2019 по 2021 г. в р. Сож выше города в 4,6 раза, в р. Сож ниже по течению – в 4,8 раза, в оз. Володькино – в 2,7, оз. Любенское – в 2,1 раза, предел варьирования составил от 21,33 до 148,85 мг/кг.

Наличие меди в мягких тканях прудовика составило 0,85–7,19 мг/кг. Изменение содержания марганца в мягких тканях данного вида моллюсков носило немонотонный характер и варьировало в пределах 28,73–118,58 мг/кг.

Изучаемые виды моллюсков следует отнести к группе деконцентраторов, так как рассчитанные значения коэффициентов накопления в большинстве случаев имеют значения, не превышающие единицу.

Ключевые слова: тяжелые металлы; медь; марганец; донные отложения; коэффициент накопления; пресноводные моллюски; водные экосистемы; мониторинг.

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)».

FEATURES OF COPPER AND MANGANESE ACCUMULATION IN THE SYSTEM «BOTTOM – MOLLUSKS» OF RESERVOIRS OF THE CITY OF GOMEL AND ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO^a, A. V. KHADANOVICH^a, O. V. PYRKH^a, E. A. POPICHEVA^a

^aFrancisk Skorina Gomel State University
104 Saveckaja Street, Gomel 246028, Belarus

Corresponding author: T. V. Makarenko (tmakarenko1968@bk.ru)

Ecological assessment of copper and manganese accumulation by bottom sediments of aquatic ecosystems of Gomel and soft tissues of gastropod class mollusks (Gastropoda): common pond (*Limnaea stagnalis* L.), river (*Viviparus viviparus* L.).

An array of data was obtained for the period 2019–2021, based on which background concentrations of copper (8.57 mg/kg) and manganese (140.0 mg/kg) in bottom sediments were determined. The background content of copper in the tissues of the viviparts of the river and common pond was 8.33 mg/kg and 2.08 mg/kg; manganese -37.73 mg/kg and 49.34 mg/kg, respectively.

In most of the studied reservoirs, the average copper content in bottom sediments in 2020 and 2021 decreased by 1.4–4.9 times compared to those in 2019, with the exception of the Dedno and Shapor lakes, in which the copper content increased. The range of variation of the metal compounds over the study period was 1.63–47.57 mg/kg. The high content of manganese is typical for bottom sediments of the Sozh River upstream of the city (Klenki village) and Volodkino Lake, and the concentration was found to be 2.0 times higher than the values typical for deposits of water bodies receiving contaminated surface runoff from Gomel. The decrease was noted for the bottom sediments of Shapor and U-shaped lakes, as well as sections of the Sozh river upstream and for the park area. The range of variation in the content of manganese compounds in bottom sediments was 31.28–917.57 mg/kg.

The content of copper in viviparous tissues is higher in 2021 compared to 2019 and 2020. in all reservoirs, with the exception of the old river. Sozh, while the concentration of this metal changed in the range of 4.52–32.93 mg/kg. A decrease in the content of manganese in the soft tissues of viviparts was established from 2019 to 2021 in the river. Sozh above the city is 4.6 times, in the river. Sozh downstream – 4.8 times, in оз. Volodkino – 2.7 times, оз. Lyubenskoye – 2.1 times, the range was from 21.33 to 148.85 mg/kg.

The copper content in the soft tissues of the pond was 0.85–7.19 mg/kg. The change in the content of manganese in the soft tissues of this mollusk species was non-monotonic in nature, and ranged from 28.73 to 118.58 mg/kg.

The studied mollusk species should be classified as deconcentrators, since the calculated values of accumulation coefficients in most cases have values not exceeding one.

Keywords: heavy metals; copper; manganese; bottom sediments; accumulation factor; freshwater.

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

Мониторинг окружающей среды городов и прилегающих территорий является важнейшей задачей экологических исследований. Аэральные выбросы производства загрязняют почву, наземные и водные экосистемы, фитоценозы и приводят к частичной деградации экосистем городов, что в конечном итоге пагубно сказывается на жизни и здоровье человека [1].

Особое место среди техногенных загрязнителей принадлежит тяжелым металлам, в частности меди и марганцу. Данные металлы характеризуются устойчивостью соединений, и при переходе по трофическим цепям отмечается увеличение их концентраций в конечных звеньях цепи [2]. Тяжелые металлы в значительных концентрациях характеризуются токсичностью, что проявляется в нарушении функций энзимов, ферментативных систем, в образовании стабильных комплексов с важнейшими метаболитами, в нарушении проницаемости мембран клеток и др. Но в малых количествах соединения металлов участвуют в биохимических процессах, протекающих в организмах. Например, медь активно используется моллюсками в процессе жизнедеятельности, встречается в большом количестве ферментов: в цитохром с-оксидазе, активирующей гемоцианин, в ферменте супероксиддисмутазе и в переносящем молекулярный кислород белке гемоцианине. В составе гемоцианина в виде имидазольного комплекса ион меди играет роль, аналогичную роли порфиринового комплекса железа в молекуле белка гемоглобина в крови позвоночных животных. Немаловажное значение в жизнедеятельности живых организмов имеет марганец. Данный элемент входит в состав многих органических и неорганических соединений, регулирующих функционирование нервной и кровеносной системы, принимает участие в формировании костной ткани, синтезе белков, молекул АТФ, а также в регуляции клеточного метаболизма организма человека [3].

Металлы в природной среде, особенно в донных отложениях, находятся в непрерывном процессе миграции, которая может осуществляться как в механической (сорбированные на поверхности твердых частиц), так и в растворенной и коллоидальной формах, при этом происходит непрерывный обмен между гидро- и литосферой через одну из известных геохимических барьерных зон «дно – вода». Биологически доступные формы тяжелых металлов являются наиболее опасными вследствие длительного воздействия на живые организмы в малых дозах, которое способствует постепенному накоплению их в органах и тканях, к деградации целых экосистем. Тяжелые металлы, являясь составной частью донных отложений, попадают в организмы бентоса, далее – рыб и по трофическим цепям – в пищу человека, где могут накапливаться в жизненно важных органах и тканях [4]. Донные отложения являются своеобразными хранилищами тяжелых металлов, служат отражением изменения геохимических условий на территории водосбора, следовательно, особая роль должна отводиться оценке уровня их загрязнения. Под влиянием изменения физико-химических условий состояния водоемов и окружающей среды (гидрологических условий, pH, значений окислительно-восстановительных потенциалов, содержания кислорода и др.) адсорбированные донными отложениями соединения металлов могут переходить в толщу воды и оказывать негативное влияние на окружающую среду, угрожая возникновению вторичного загрязнения водоемов тяжелыми металлами [5].

Пресноводные моллюски – широко используемый объект исследований акваторий, испытывающих техногенное влияние. Благодаря способности накапливать практически все тяжелые металлы, присутствующие в среде обитания, и значительной биомассе, моллюскам принадлежит важная роль в процессах аккумуляции и биоседimentации различных веществ в пресноводных экосистемах. Кроме того, в организм гидробионта поступление металлов происходит двумя путями: из воды через покровные ткани (сорбция на поверхности раковины) и через желудочно-кишечный тракт в результате усвоения пищи. Это дает возможность рассматривать данные виды беспозвоночных, с одной стороны, как виды-индикаторы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, а с другой – как организмы, активно участвующие в процессах перераспределения тяжелых металлов в гидробиоценозах [6]. Моллюски, обитающие в водных экосистемах, могут выступать в качестве биоаккумуляторов тяжелых металлов и передавать их по трофическим цепям. Данные гидробионты недостаточно исследованы в плане изменения доступных форм токсичных элементов в абиотических компонентах водоемов в силу того, что поступление загрязняющих веществ значительно варьирует в зависимости от условий существования водных экосистем. Количественная оценка содержания тяжелых металлов важна как для практических целей, так и для решения фундаментальных проблем.

Абсолютные значения концентраций тяжелых металлов в тканях и органах водных животных и растений не всегда показывают истинную картину загрязнения водных экосистем, так как организм может осуществлять контроль за поступлением токсикантов в отдельные органы и ткани. При поступлении

избыточных количеств элементов в окружающую среду живые организмы задействуют определенные механизмы детоксикации, ограничивающие или даже устраняющие возникающий при этом токсический эффект. В чистом водоеме живые организмы накапливают все доступные формы металла, в загрязненном водоеме существует предел накопления, после которого поступление токсиканта в организм практически прекращается, однако при достижении определенной концентрации в воде и донных отложениях соединения металла начинают поступать в организм пропорционально содержанию их в абиотических компонентах. В результате происходит так называемый срыв работы механизма блокировки поступления металла в организм.

Поступление любых токсикантов в организм блокируется посредством механизмов, предотвращающих или ограничивающих проникновение тяжелых металлов в клетку, в результате исключается токсическое действие на внутриклеточные процессы и обеспечивается их устойчивость к действию загрязнителей. В значительной степени этот вопрос изучен на примере растений [8; 7]. В случае активной работы данных механизмов живой организм может нормально существовать, даже несмотря на высокий уровень загрязнения окружающей среды [6].

Цель исследования – изучить содержание и накопление меди и марганца в донных отложениях и тканях брюхоногих моллюсков водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий с различным характером антропогенной нагрузки.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в течение 2019–2021 гг. в некоторых водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий с различным характером антропогенной нагрузки. 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).

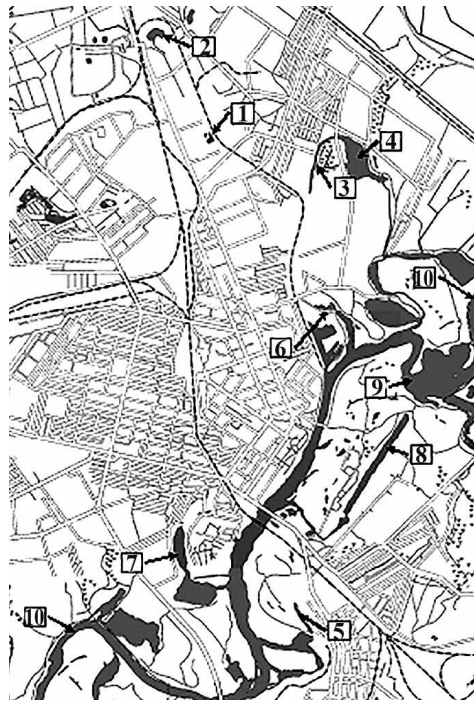


Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля: 1) оз. Малое; 2) оз. Круглое; 3) оз. У-образное; 4) оз. Волотовское; 5) оз. Шапор; 6) оз. Дедно; 7) оз. Любенское; 8) Гребной канал; 9) оз. Володькино; 10) р. Сож

Fig. 1. Arrangement of water bodies in Gomel: 1) lake Maloe; 2) lake Krugloe; 3) lake U-obraznoe; 4) lake Volotovskoe; 5) lake Shapor; 6) lake Dedno; 7) lake Liubenskoie; 8) Grebnoy val; 9) lake Volodkiino; 10) river Sozh

В качестве объекта исследований выбраны донные отложения и два вида брюхоногих моллюсков (Gastropoda), массово встречающихся в водоемах Беларуси: прудовик обыкновенный (*Limnaea stagnalis* L.) и живородка речная (*Viviparus viviparus* L.). У представителей данных видов различаются пути поступления в организм как питательных веществ, так и токсикантов. В изучаемых водоемах живородка встречается на камнях и корягах как обрастатель, а также большое количество особей находится в иловой

фракции донных отложений. Представители данного вида моллюсков в качестве объекта питания используют и высшие водные растения, соскребая слизь, и бактерии, находящиеся на них. Прудовик в изучаемых водоемах встречается только на растениях, которые использует в пищу. Связь прудовика с донными отложениями является опосредованной через растительные организмы, которые активно поглощают металлы из донных отложений и воды.

Для отлова моллюсков использовали дночерпатель и применяли ручной сбор. Мягкие ткани отделяли от раковин, сушили, а затем озоляли до белой золы в муфельной печи при 450 °С. Донные отложения отбирались по стандартной методике [8; 9]. Отобранные образцы высушивались до воздушно-сухого состояния. Ситовым методом выделялась фракция менее 1 мм, затем пробы озолялись при 450 °С. Содержание тяжелых металлов в золе тканей моллюсков и донных отложений определяли методом ISP масс-спектрометрии, на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой *Elan DRCe (Perkin Elmer)*, на базе лаборатории радиоэкологии «Института радиобиологии НАН Беларуси».

Полученные данные обработаны статистически в программе *Microsoft Excel*, проведен парный двухвыборочный t-тест для средних и корреляционный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований, проводимых с 2010 по 2019 г., свидетельствуют, что содержание отдельных тяжелых металлов в моллюсках и донных отложениях старицы р. Сож (д. Поляновка) – водоема, не имеющего видимой антропогенной нагрузки, расположенного на 10 км выше города по течению р. Сож и использованного ранее в качестве фонового водоема, в различные временные промежутки было сравнимо с концентрациями исследуемых соединений в осеях и донных отложениях городских водоемов, а в некоторых случаях даже превышало таковое [9]. 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 в донных отложениях водоема и воде старичного комплекса изменилась доступность тяжелых металлов для живых организмов водоема. Все это вызвало необходимость расчета фоновых концентраций для мягких тканей моллюсков и донных отложений при проведении мониторинговых исследований загрязнения водных экосистем изучаемой территории. Необходимо указать, что в период с 2010 по 2022 г. содержание изучаемых металлов в мягких тканях моллюсков и донных отложениях снизилось в 1,5 раза и более. И, следовательно, полученные ранее данные невозможно использовать для оценки степени загрязнения водных экосистем [9].

Для установления фоновых концентраций в донных отложениях изучаемых водоемов и в мягких тканях моллюсков 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. Сравнительный анализ полученных результатов исследований объектов мониторинга за 2021–2021 гг. позволил выявить различия в содержании изучаемых металлов в донных отложениях. Фоновые величины содержания меди и марганца в донных отложениях водоемов составили 8,57 мг/кг и 140,0 мг/кг соответственно. За период исследований 2010–2021 гг. фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно.

На рис. 2 представлены результаты исследований по изучению содержания меди в донных отложениях в 2019–2021 гг. В большинстве исследуемых водоемов отмечалось снижение средних значений содержания меди в донных отложениях в 2020 г. и 2021 г. в 1,4–4,9 раза по сравнению с таковыми в 2019 г., за исключением озер Дедно и Шапор, в донных отложениях которых содержание меди увеличивалось. Данный факт подтверждает поступление соединений меди в оз. Дедно из водоема-отстойника, следовательно, со сточными водами предприятий г. Гомеля. Оз. Дедно напрямую контактирует через небольшую земляную дамбу с водоемом, принимающим стоки Прудковского и Хатаевичского коллекторов, а также стоки автопредприятий и фабрики «Спартак». Не исключено поступление загрязненного поверхностного стока в оз. Дедно. Оз. Шапор принимает поверхностный сток с территории микрорайона «Новобелица», включающий две улицы частного сектора, а также с территории таких предприятий, как ОАО «Гомельдрев», филиала «Гомельобои ОАО «ЦБК-Консалт» и Фанеро-спичечный комбинат, ЧПУП (г. Гомель). Содержание

¹ТКП 17.06-04-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов: введен 17.06.12. Минск: Госстандарт, 2012. 23 с.

меди в донных отложениях оз. Шапор варьировало от 7,95 мг/кг (2019 г.) до 9,56 мг/кг (2021 г.), оз. Дедно – от 18,67 (2019 г.) до 41,00 мг/кг, что может свидетельствовать о содержании соединений меди в поверхностном стоке, идущем в водоемы с водосборных территорий.

Участок р. Сож парковой зоны принимает стоки ливневой канализации, собирающей воду практически со всей центральной части города, а также поверхностный сток с территории судоремонтного завода, Гомельского речного порта и элеватора. Однако содержание меди в донных отложениях изменялось незначительно (4,65–6,13 мг/кг) по сравнению с показателями других водоемов на протяжении всего периода исследований, что также может свидетельствовать о наличии соединений данного металла, хоть и в незначительном количестве, в воде ливневой канализации г. Гомеля.

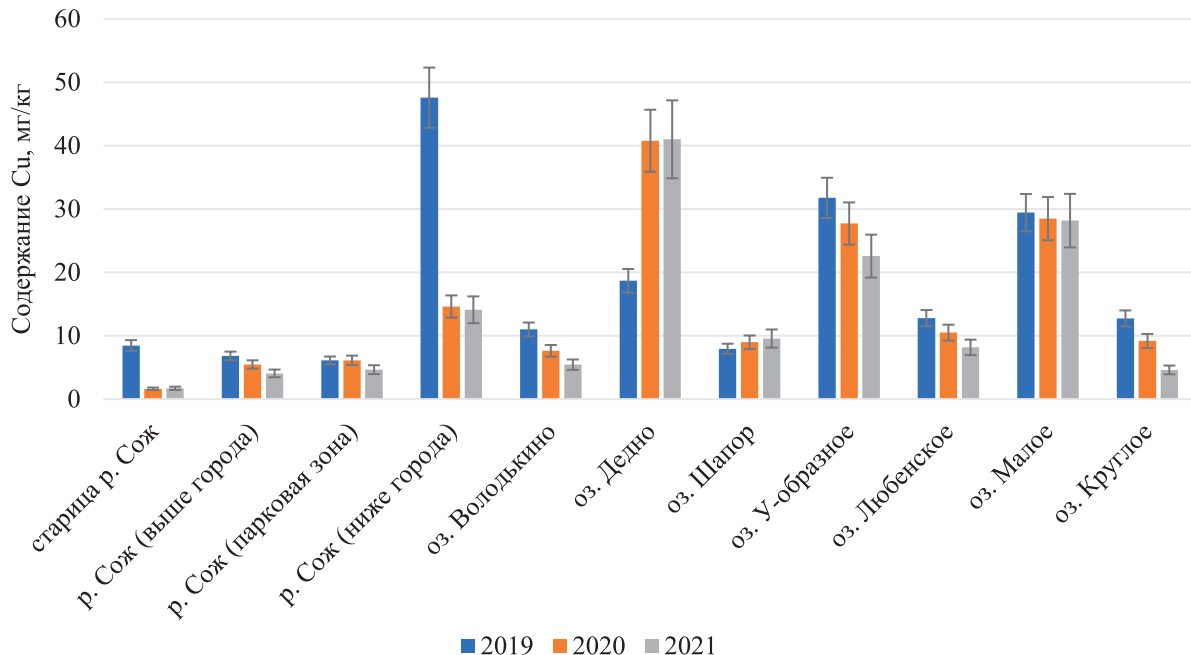


Рис. 2. Содержание меди в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 2. Copper content in bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

На рис. 3 представлен характер варьирования содержания марганца в донных отложениях.

Высокое содержание металла характерно для донных отложений р. Сож выше черты города по течению (д. Кленки) и оз. Володькино, причем установлено превышение концентрации в 2,0 раза и более величин, характерных для отложений водоемов, принимающих загрязненный поверхностный сток г. Гомеля. В 2019 г. максимальные величины содержания марганца отмечено в отложениях оз. Дедно и в период с 2020–2021 гг. – на участке р. Сож ниже административной черты города. Однонаправленное снижение соединений марганца отмечено для донных отложений оз. Шапор и У-образное, а также участков р. Сож выше города по течению и для парковой зоны. Сложно объяснить снижение концентрации металла в 8,0 раз в оз. Шапор в период с 2020 по 2021 г. Содержание марганца в донных отложениях р. Сож ниже административной черты города в 4,5–6,5 раза выше, чем на участке р. Сож парковой зоны.

На участке р. Сож в парковой зоне содержание марганца в донных отложениях за период исследования с 2019 по 2021 г. снизилось. Неоднозначная динамика содержания изучаемого металла возможно вызвана изменениями физико-химических и микробиологических процессов, поскольку аккумулярованный загрязнитель может поступать из донных отложений в воду. Миграция тяжелых металлов из донных грунтов в воду создает при определенных условиях опасность вторичного загрязнения, поэтому уровни содержания тяжелых металлов в донных отложениях являются интегральными показателями загрязнения водоемов.

В период исследований 2019–2021 гг. в тканях живородки в большинстве водных экосистем (в 6-ти из 11-ти водоемов) содержание меди однонаправленно увеличивается, в тканях прудовика увеличение концентраций характерно для двух водоемов (рис. 4, 5). Это может свидетельствовать об увеличении доступности металлов в отложениях водных экосистем изучаемой территории.

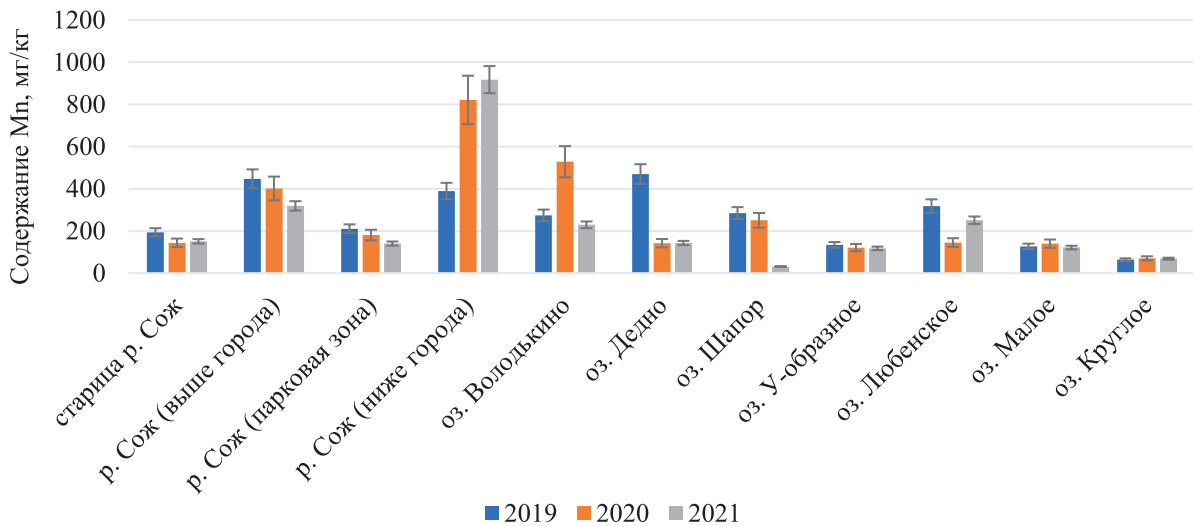


Рис. 3. Содержание марганца в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 3. Manganese content in bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

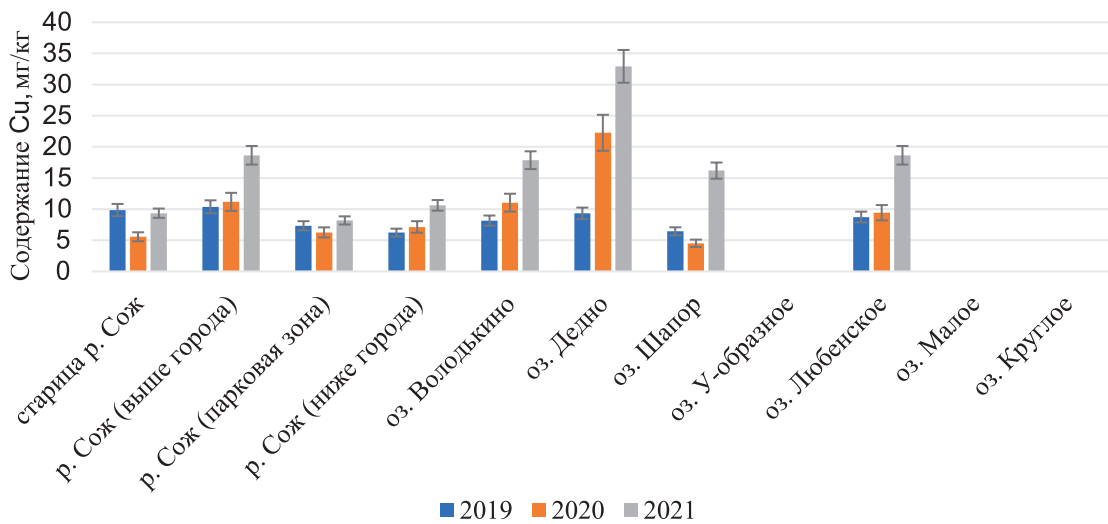


Рис. 4. Содержание меди в тканях живородки в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 4. The content of copper in viviparous tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

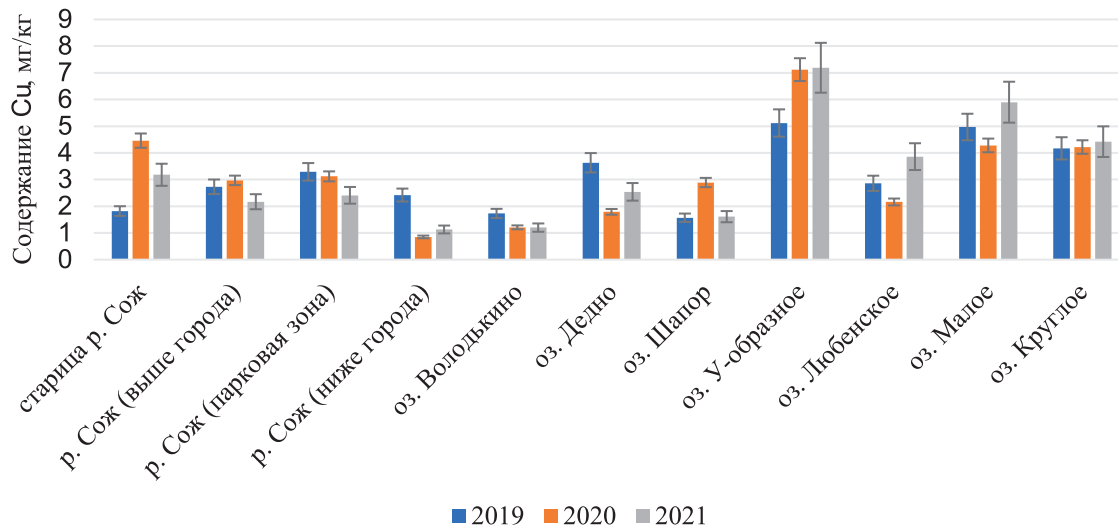


Рис. 5. Содержание меди в тканях прудовика в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 5. Copper content in the ponds in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

Отмечена тенденция к увеличению содержания меди в тканях живородки в 2021 г. по сравнению с 2019 и 2020 гг. во всех водоемах, за исключением старицы р. Сож. Максимумы увеличения содержания исследуемого металла в 2021 г. установлены в тканях моллюсков, обитающих в оз. Дедно – в 3,5 раза по сравнению с показателями 2019 г., в оз. Шапор – в 2,5 раза и 3,6 раза по сравнению с величинами, зафиксированными в 2019 г. и 2020 г. соответственно.

Выявлено увеличение концентрации меди в тканях живородки по сравнению с фоновым содержанием за период исследований. Так, в 2019 г. все представители данного вида характеризовались величинами содержания меди, не превышающими фоновое значение (8,33 мг/кг), кроме представителей, обитающих в р. Сож в районе д. Кленки (превышение фона составило 19,7 %). В 2020 г. превышение фоновых значений содержания металла отмечено в тканях живородки, обитающей в р. Сож в районе д. Кленки (на 25,4 %), в оз. Володькино (на 24,5 %) и в оз. Дедно (на 62,6 %). В 2021 г. во всех образцах тканей моллюсков, отобранных в изучаемых водоемах, выявлены более высокие значения содержания меди по сравнению с фоновыми величинами – максимум отличий в 74,4 % зафиксирован для особей, обитающих в оз. Дедно.

Значения содержания меди в мягких тканях прудовика за весь период исследований не превышали фоновые. Диапазон концентраций меди в мягких тканях данного вида моллюсков составлял 0,85 мг/кг (р. Сож ниже города, 2020 г.) – 7,19 мг/кг (оз. У-образное, 2021 г.). Проведенный статистический анализ позволил рассчитать корреляционные зависимости содержания меди в мягких тканях изученных видов моллюсков от ее концентрации в донных отложениях. Прямая корреляционная связь отмечена для живородки речной. Коэффициенты корреляции составили 0,53 (2019 г.), 0,86 (2020 г.), 0,81 (2021 г.) при $p < 0,05$. Значимых корреляционных зависимостей между содержанием меди в тканях прудовика и донных отложениях не выявлено.

На рис. 6 и 7 приведены данные о содержании марганца в мягких тканях изучаемых видов моллюсков. Марганец представлен в иловых растворах преимущественно (75–95 %) не связанными в комплексные соединения ионами, что значительно увеличивает скорость его молекулярной диффузии. Следовательно, характер накопления в тканях моллюсков отличен от характера накопления меди. Отмечено снижение содержания марганца в мягких тканях живородки с 2019 по 2021 г. в р. Сож выше города в 4,6 раза, в р. Сож ниже по течению – в 4,8 раза, в оз. Володькино – в 2,7 раза, оз. Любенское – в 2,1 раза. В 2019 г. превышение фоновых значений количественного содержания марганца в тканях живородки зафиксировано во всех водоемах в 1,2–3,9 раза, в 2020 г. – фоновые значения не превышены в мягких тканях образцов моллюсков только двух водоемов (озерах Дедно и Шапор), в 2021 г. превышение фона содержания марганца в тканях живородки не зафиксировано ни в одном из изучаемых водоемов.

Единой динамики в изменении содержания марганца в тканях прудовика не наблюдалось. Варьирование концентраций металла составило от 28,73 мг/кг в оз. Шапор (2019 г.) до 125,25 мг/кг оз. Круглое (2021 г.), отмечалось превышение фона содержания металла в мягких тканях большинства особей данного вида моллюсков за исследуемый период. Корреляционных связей между содержанием металла в тканях как живородки, так и прудовика и содержанием его в донных отложениях не выявлено.

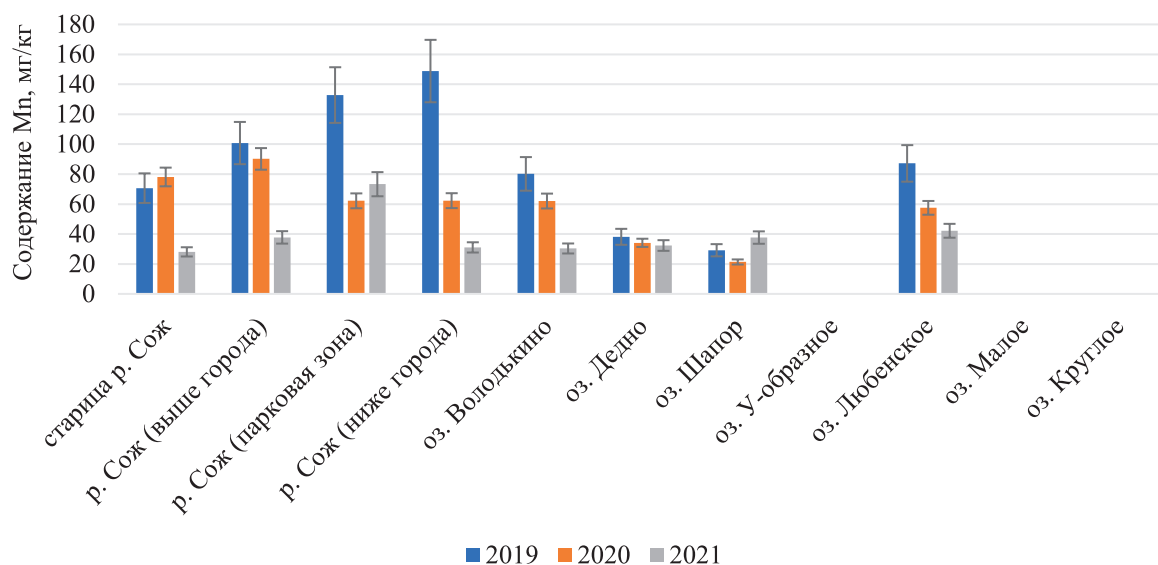


Рис. 6. Содержание марганца в тканях живородки в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 6. Manganese content in viviparous tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

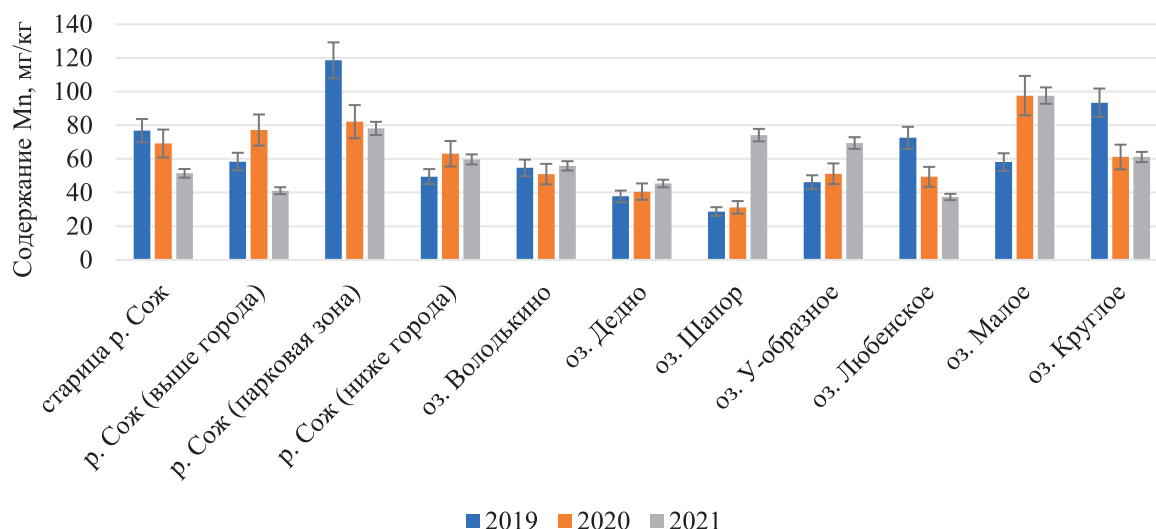


Рис. 7. Содержание марганца в тканях прудовика в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., мг/кг

Fig. 7. Manganese content in ponds in reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, mg/kg

Для объективной оценки биологической доступности соединений изучаемых металлов в водных объектах используется коэффициент накопления, который рассчитывается по следующей формуле:

$$K_n = \frac{C_x}{C_y},$$

где C_x – концентрация металла в моллюсках; C_y – концентрация металла в донных отложениях водоема.

Коэффициент накопления свидетельствует о наличии факта «контроля» со стороны гидробионтов за поступлением загрязнителей в метаболически важные центры и позволяет косвенно судить о степени доступности элемента в среде обитания для живых организмов и о поведении поллютантов в системах «донные отложения – моллюски».

В табл. 1 приведены значения рассчитанных значений коэффициентов накопления меди и марганца в тканях моллюсков. Не выявлены зависимости коэффициентов накопления тяжелых металлов в моллюсках от содержания их в донных отложениях неоднозначна. Различия объясняются существованием видоспецифичности концентрирования и особенностями вида обитания. Используя значения коэффициентов накопления организмы можно разделить на три группы: макроконцентраторы – $K_n > 2$; микроконцентраторы $1 < K_n < 2$ и деконцентраторы $K_n < 1$ [10]. По сравнению с данными, полученными в 2019 г., значения коэффициентов накопления меди в 2021 г. в живородке были выше во всех водных экосистемах в 1,47–8,83 раза, в прудовике – в 1,23–8,46 раза (исключение участок р. Сож парковой зоны и оз. Дедно), что может свидетельствовать об увеличении доступности металлов в отложениях водных экосистем. Коэффициент накопления, рассчитанный для живородки выше в 2,0–5,7 раза, чем для прудовика, что указывает на разную доступность соединений меди в компонентах водоема для особей изучаемых видов и неодинаковую физиологическую необходимость меди в организме прудовика и живородки.

У живородки в 2021 г. значения коэффициента накопления марганца в 1,2–2,23 раза ниже, чем в 2019 г. (исключение озера Дедно и Шапор), что указывает на увеличение контроля со стороны особей данного вида за поступлением соединений марганца в органы и ткани.

Выделенные значения показывают минимальные и максимальные значения коэффициентов накопления металлов. Максимальное снижение величины коэффициента накопления данного металла у особей данного вида на участке р. Сож ниже черты города – 12,6 раза, где концентрация марганца в донных отложениях увеличивается к 2021 г. У прудовика накопление металла в тканях возрастает к 2021 г. в большей части изучаемых водных экосистем, что может быть связано с большей доступностью соединений марганца в донных отложениях водоемов в сравнении с живородкой. Единая динамика накопления марганца в тканях живородки и прудовика отмечена в старичном комплексе, в парковой зоне р. Сож и в оз. Любенское, хотя динамика изменения содержания металла в донных отложениях сходна только для старицы и оз. Любенское. Интересен тот факт, что характер динамики накопления марганца в тканях моллюсков обратен динамике содержания металла в донных отложениях. Это указывает на необходимость контроля за поступлением и металлов в ткани живых организмов в зависимости от содержания в донных отложениях.

Таблица 1

Коэффициенты накопления меди и марганца в тканях моллюсков,
обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 1

Factors of copper and manganese accumulation in tissues
of mollusks living in water bodies of the city of Gomel and adjacent territories

Место отбора	2019	2020	2021
Живородка			
старица р. Сож	<u>1,16</u> 0,36	<u>3,41</u> 0,54	<u>5,47</u> 0,19
р. Сож (выше города)	<u>1,52</u> 0,23	<u>2,04</u> 0,22	<u>4,59</u> 0,12
р. Сож (парковая зона)	<u>1,20</u> 0,63	<u>1,02</u> 0,34	<u>1,76</u> 0,52
р. Сож (ниже города)	<u>0,13</u> 0,38	<u>0,49</u> 0,08	<u>0,75</u> 0,03
оз. Володькино	<u>0,74</u> 0,29	<u>1,45</u> 0,12	<u>3,28</u> 0,13
оз. Дедно	<u>0,50</u> 0,08	<u>0,55</u> 0,24	<u>0,80</u> 0,23
оз. Шапор	<u>0,20</u> 0,10	<u>0,50</u> 0,09	<u>1,69</u> 1,20
оз. У-образное	–	–	<u>1,71</u> 0,04
оз. Любенское	<u>0,68</u> 0,27	<u>0,90</u> 0,40	<u>2,28</u> 0,17
Прудовик			
старица р. Сож	<u>0,22</u> 0,40	<u>2,74</u> 0,48	<u>1,86</u> 0,34
р. Сож (выше города)	<u>0,40</u> 0,13	<u>0,54</u> 0,19	<u>0,53</u> 0,13
р. Сож (парковая зона)	<u>0,54</u> 0,56	<u>0,51</u> 0,45	<u>0,52</u> 0,56
р. Сож (ниже города)	<u>0,05</u> 0,13	<u>0,06</u> 0,08	<u>0,08</u> 0,07
оз. Володькино	<u>0,16</u> 0,20	<u>0,16</u> 0,10	<u>0,22</u> 0,24
оз. Дедно	<u>0,19</u> 0,08	<u>0,04</u> 0,29	<u>0,06</u> 0,32
оз. Шапор	<u>0,04</u> 0,10	<u>0,32</u> 0,12	<u>0,17</u> 2,37
оз. У-образное	<u>0,17</u> 0,46	<u>0,26</u> 0,42	<u>0,32</u> 0,59
оз. Любенское	<u>0,22</u> 0,23	<u>0,21</u> 0,34	<u>0,47</u> 0,15
оз. Малое	<u>0,17</u> 0,46	<u>0,15</u> 0,44	<u>0,21</u> 0,65
оз. Круглое	<u>0,33</u> 1,46	<u>0,46</u> 1,39	<u>0,96</u> 1,83

Примечание. Значения Кн в мягких тканях моллюсков: числитель – медь; знаменатель – марганец.

В тканях живородки накопление марганца к 2021 г. в изучаемых водоемах снижается, за исключением участка р. Сож парковой зоны и оз. Шапор, что является свидетельством изменения форм нахождения металла в отложениях водоема для особей данного вида. Необходимо учитывать факт блокировки поступления металлов в ткани моллюсков. Для прудовика в 6-ти из 11-ти водоемов значение коэффициентов накопления в 2021 г. выше либо равно величинам, рассчитанным в 2019 и 2020 гг.

Средние значения коэффициентов накопления меди мягкими тканями живородки и прудовика составили в 2019 г. – 0,67 и 0,23; в 2020 – 1,00 и 0,50; в 2021 г. – 2,60 и 0,49 соответственно. Характер изменения коэффициентов накопления марганца мягкими тканями живородки и прудовика выражался следующими значениями рассчитанной величины: 2019 г. 0,30 и 0,38; в 2020 – 0,25 и 0,39; в 2021 г. – 0,29 и 0,66 соответственно. Специфика такого распределения, вероятно, связана с особенностями источников поступления тяжелых металлов в водоемы и с видовыми различиями моллюсков.

Заключение

С применением статистического метода рассчитаны фоновые величины содержания меди и марганца в донных отложениях водоемов, которые составили 8,57 мг/кг и 140,0 мг/кг соответственно. В период исследований 2010–2021 гг. фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного составило – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно.

Проведенный мониторинговый анализ содержания и накопления меди и марганца в биотических и абиотических компонентах водных экосистем за период исследования позволил выявить различные тенденции в изменении содержания изучаемых металлов в донных отложениях и мягких тканях моллюсков с течением времени.

Выявлена прямая корреляционная связь для живородки речной между содержанием меди в мягких тканях от ее содержания в донных отложениях. Коэффициенты корреляции составили 0,53 (2019 г.), 0,86 (2020 г.), 0,81 (2021 г.) при $p < 0,05$. Значимых корреляционных зависимостей между концентрацией меди в тканях прудовика и донных отложениях не выявлено. Корреляционных связей между содержанием металла в тканях как живородки, так и прудовика и содержанием марганца в донных отложениях не установлено.

Отмечены различия в вариабельности коэффициентов биологического накопления металлов в моллюсках различных видов в одном и том же водоеме. Изучаемые виды следует отнести к группе деконцентраторов, так как рассчитанные значения коэффициентов накопления рассматриваемых металлов (в большинстве случаев) имеют значения, не превышающие единицу. Обратная динамика между величиной коэффициента накопления марганца и содержанием металла в донных отложениях характерна для большинства водоемов, что указывает на увеличение доступности соединений металла в донных отложениях и протекание вторичных процессов загрязнения изучаемых водных экосистем. Полученные результаты подтверждают необходимость анализа не только абсолютных величин содержания металлов в тканях моллюсков и донных отложений, но и значений коэффициентов накопления марганца в живых организмах, что более четко указывает на доступность соединений тяжелых металлов в донных отложениях водных экосистем и наличие механизмов, контролирующего поступление загрязнителей в ткани гидробионтов.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием меди и марганца в донных отложениях исследуемых водоемов, а также между концентрацией данных металлов в тканях моллюсков указывает на отсутствие корреляционных связей между концентрациями исследуемых металлов как в донных отложениях, так и в мягких тканях моллюсков, что служит иллюстрацией различного характера поступления и связывания металлов с составляющими донных отложений, а также свидетельствует о различных механизмах сорбции их мягкими тканями изучаемых видов моллюсков.

Для мониторинга содержания доступных форм меди в донных отложениях водоемов изучаемой территории из изученных видов моллюсков целесообразно использовать живородку речную, а для наличия соединений марганца – прудовика обыкновенного.

Библиографические ссылки

1. Макаренко ТВ, Грищенко ИВ, Макаренко АИ, Никитин АН. Изучение содержания некоторых тяжелых металлов в мягких тканях живородки обыкновенной (*Viviparus viviparus* L.), обитающей в р. Сож в районе г. Гомеля. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;1:29–39.
2. Мисейко ГН. *Биологический анализ качества пресных вод*. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2001. 201 с.
3. 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.
4. Никаноров ВМ, Хоружая ТА. *Глобальная экология*. Москва: Книга сервис; 2003. 284 с.
5. Пасечная ЕА, Арсан ОМ. Накопление меди и марганца некоторыми погруженными высшими водными растениями и нитчатными водорослями. *Гидробиологический журнал*. 2003;39(3):65–73.
6. Титов АФ, Таланова ВВ, Казнина НМ. *Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2011. 77 с.
7. Головатый СЕ, Гирис ДА. Закономерности накопления тяжелых металлов в растениях и организмах животных. *Природные ресурсы*. 2002;3:120–125.
8. Абакумов ВА. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. 240 с.

9. Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Парфенкова АС. Анализ загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двусторчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022; 2:39–47.

10. Никаноров АМ, Жулидов АВ. *Биомониторинг металлов в пресноводных системах*. Ленинград: Гидрометеониздат; 1991. 312 с.

References

1. Makarenko TV, Hryshchanka IV, Makarenko AI, Nikitin AN. Study of the content of certain heavy metals in the soft tissue of the river (*Viviparus viviparus* L.) that inhabitates the river of Sozh in Gomel. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2021;1:29–39. Russian.

2. Misejko GN. *Biologicheskij analiz kachestva presnyh vod* [Biological analysis of fresh water quality]. Barnaul: Altai State University; 2001. 201 p. Russian.

3. Kadatskaya OV, Sanets EV, Ovcharova EP. *Gidrograficheskaja set' urbanizirovannyh territorij kak jelement formirovanija prirodnoho karkasa goroda* [Hydrographic network of urbanized territories as an element of the formation of the natural frame of the city]. In: Vitchenko AN, editor. *Sovremennye problemy landshaftovedenija I geojekologii. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Minsk: BSU; 2018. p. 194–196. Russian.

4. Nikanorov VM, Horuzhaya TA. *Global'naya ekologiya* [Global ecology]. Moscow: Kniga servis; 2003. 284 p. Russian.

5. Pasechnaya EA, Arsan OM. Accumulation of copper and manganese by some submerged higher aquatic plants and filamentous algae. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. [Hydrobiological Journal]. 2003;39(3):65–73. Russian.

6. Titov AF, Talanova VV, Kaznina NM. *Fiziologicheskie osnovy ustojchivosti rastenij k tyazhyolym metallam* [Physiological foundations of plant resistance to heavy metals]. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN; 2011. 77 p. Russian.

7. Golovatyj SE, Giris DA. Zakonomernosti nakopleniya tyazhelyh metallov v rasteniyah i organizmah zhivotnyh. *Prirodnye resursy*. [Natural resources]. 2002;3:120–125. Russian.

8. Abakumov VA. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij* [Guide to Methods for Hydrobiological Analysis of Surface Water and Bottom Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 240 p. Russian.

9. 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.

10. Nikanorov AM, Zhulidov AV. *Biomonitoring metallov v presnovodnyh sistemah*. [Biomonitoring of metals in freshwater systems]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 312 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.04.2023.
Received by editorial board 21.04.2023.