

УДК 504.5:546.815:546.56:627.157:594.1

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СВИНЦА И МЕДИ В СИСТЕМЕ «ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ – ДВУСТВОРЧАТЫЕ МОЛЛЮСКИ»

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, А. И. МАКАРЕНКО²⁾

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

²⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

Содержание соединений свинца в донных отложениях практически всех изучаемых водных экосистем в 2019 г. снизилось по сравнению с 2010 г. в 1,1–22,7 раза, содержание меди – в 1,2–7,6 раза. Причиной уменьшения содержания металлов в донных отложениях исследуемых водоемов является снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы изучаемых территорий. Отмечено значительное уменьшение концентрации соединений свинца и меди в донных отложениях водоемов, принимающих либо стоки предприятий, либо стоки с территории городских предприятий. На протяжении 2019–2021 гг. содержание свинца и меди в отложениях водоемов продолжало снижаться в 1,1–6,5 раза за счет перехода соединений металлов в подвижные формы, которые поглощаются биотой или уносятся течением. В 2019 г. содержание свинца в тканях моллюсков снизилось в 5 раз по сравнению с величинами, полученными в 2010 г., но в дальнейшем в 2020 и 2021 гг. концентрация свинца однонаправленно увеличилась. Повышение содержания свинца в тканях моллюсков в 2019–2021 гг. свидетельствует об увеличении биологической доступности форм металлов в донных отложениях, так как поступление свинца в окружающую среду значительно снизилось. Разница в содержании меди в тканях моллюсков в 2010 и 2019 гг. составила 12,0 раз в сторону снижения. В 2020 г. концентрация меди снижалась, однако в 2021 г. отмечено увеличение содержания данного поллютанта в мягких тканях перловицы в 1,5 раза. Значения коэффициентов накопления свинца и меди по донным отложениям в мягких тканях перловицы изменялись в пределах 0,01–0,41 и увеличивались с 2019 по 2021 г. Для свинца ($r = 0,84–0,88$) и меди ($r = 0,62–0,89$) характерна высокая степень связи между концентрацией в донных отложениях и тканях моллюсков.

Ключевые слова: тяжелые металлы; перловица обыкновенная; донные отложения; водоемы; водотоки; медь; свинец; коэффициент накопления; коэффициент корреляции

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, Пырх ОВ, Хаданович АВ, Макаренко АИ. Динамика накопления соединений свинца и меди в системе «донные отложения – двустворчатые моллюски». *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;3:21–33.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-21-33>

For citation:

Makarenko TV, Pyrkh OV, Khadanovich AV, Makarenko AI. Dynamics of accumulation of lead and copper compounds in the system «bottom sediments – bivalve mollusks». *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;3:21–33. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-21-33>

Авторы:

Татьяна Викторовна Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии.

Ольга Викторовна Пырх – старший преподаватель кафедры химии.

Альбина Викторовна Хаданович – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры химии.

Андрей Игоревич Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей и биоорганической химии.

Authors:

Tatiana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry.

tmakarenko1968@bk.ru

Olga V. Pyrkh, senior lecturer at the department of chemistry.

korytko@gsu.by

Albina V. Khadanovich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of chemistry.

hadanovich@gsu.by

Andrei I. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general and bioorganic chemistry.

amakarenko198989@mail.ru

DYNAMICS OF ACCUMULATION OF LEAD AND COPPER COMPOUNDS IN THE SYSTEM «BOTTOM SEDIMENTS – BIVALVE MOLLUSKS»

T. V. MAKARENKO^a, O. V. PYRKH^a, A. V. KHADANOVICH^a, A. I. MAKARENKO^b

^aFrancysk Skaryna Gomel State University,
104 Saveckaya Street, Gomel 246028, Belarus

^bGomel State Medical University,
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

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

The content of lead compounds in the bottom sediments of almost all studied aquatic ecosystems in 2019 decreased by 1.1–22.7 times compared to 2010, the copper content – by 1.2–7.6 times. The reason for the decrease in the metal content in the bottom sediments of the studied reservoirs is the decrease in the anthropogenic load on the aquatic ecosystems of the studied territories. A significant decrease in the concentration of lead and copper compounds in the bottom sediments of reservoirs receiving either industrial wastewater or wastewater from the territory of city enterprises was noted. During 2019–2021, the content of lead and copper in the sediments of reservoirs continued to decrease by 1.1–6.5 times due to the transition of metal compounds into mobile forms, which are absorbed by biota or carried away by the current. In 2019, the lead content in the tissues of mollusks decreased by 5.0 times compared to the values obtained in 2010, but then in 2020 and 2021 the lead concentration increased in the same direction. The increase in the lead content in the tissues of mollusks in the period 2019–2021 indicates an increase in the bioavailability of metal forms in bottom sediments, since the lead input into the environment has significantly decreased. The difference in the copper content in the tissues of mollusks in 2010 and 2019 was 12.0 times downward. In 2020, the copper concentration decreased, but in 2021, an increase in the content of this pollutant in the soft tissues of the pearl mussel by 1.5 times was noted. The values of lead and copper accumulation coefficients in bottom sediments in the soft tissues of the pearl mussel varied within 0.01–0.41 and increased from 2019 to 2021. Lead ($r = 0.84–0.88$) and copper ($r = 0.62–0.89$) are characterized by a high degree of correlation between the concentration in bottom sediments and the tissues of mollusks.

Keywords: heavy metals; common barley; bottom sediments; water bodies; watercourses; copper; lead; accumulation coefficient; correlation coefficient.

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

В настоящее время в условиях сложившегося экологического состояния водных объектов Гомельского региона актуален вопрос использования водоемов урбанизированных территорий для отдыха населения, проведения культурно-массовых и спортивных мероприятий. Это требует комплексной оценки состояния водных и прибрежно-водных экосистем для прогноза последствий антропогенного воздействия и сохранения устойчивого функционирования прибрежно-водного комплекса.

Анализ состояния городских водоемов с использованием сопряженного изучения содержания загрязнителей в биотических и абиотических компонентах городских экосистем не только не носит системного характера, но и для многих из них не осуществляется, что требует выявления пространственно-временных закономерностей загрязнения прибрежно-водных и водных экосистем на урбанизированных территориях, проведения комплексной оценки загрязнения составляющих водных экосистем.

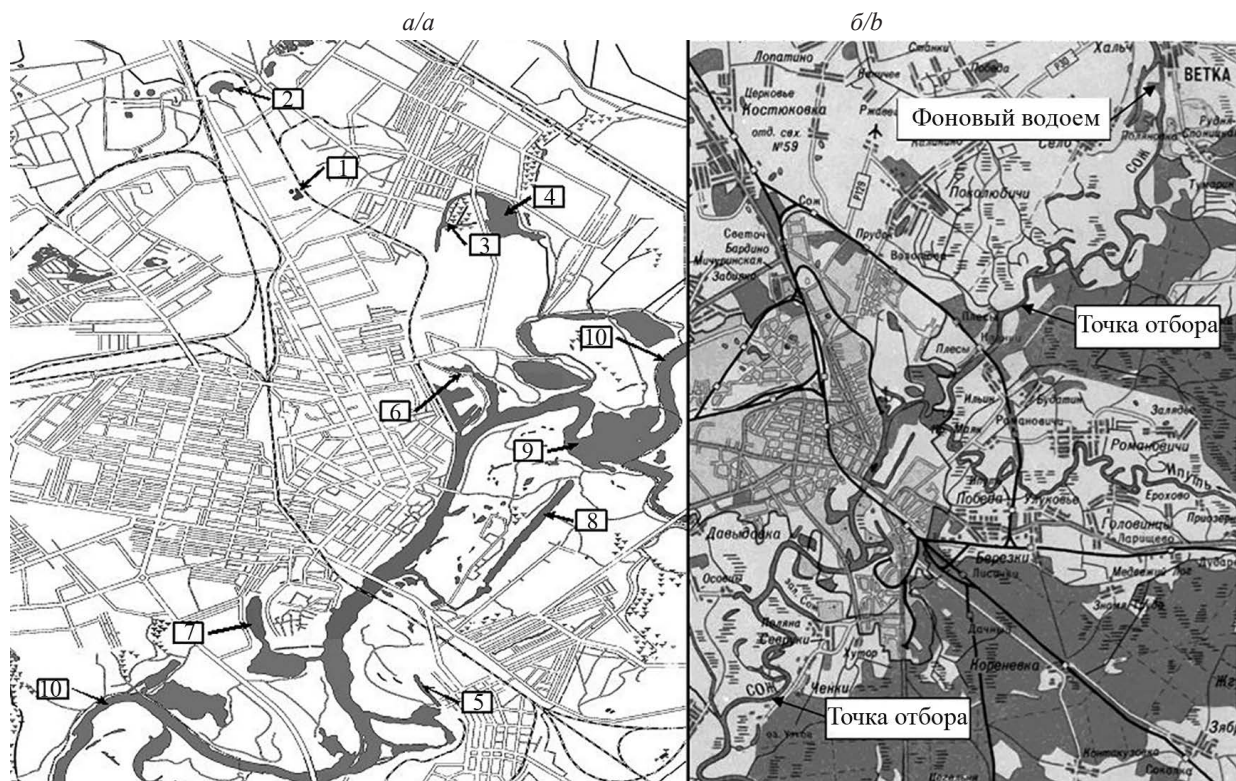
Важным направлением исследований является установление характера накопления тяжелых металлов некоторыми видами моллюсков с учетом конкретных особенностей территории и типом антропогенного воздействия. Немаловажный аспект исследования – возможность получить представление об источниках поступления загрязняющих веществ и особенностях их пространственно-временного распределения в водных и прибрежно-водных экосистемах. Для повышения результативности биогеохимической индикации слабозагрязненных водных экосистем необходимо использовать комплексный подход, включающий сопряженное изучение содержания тяжелых металлов в различных компонентах водоемов.

Цель исследования: установить особенности накопления свинца и меди донными отложениями и мягкими тканями перловицы, выявить зависимости между содержанием загрязнителей в донных отложениях и тканях некоторых видов моллюсков, произвести расчет коэффициентов перехода загрязнителей в системе «донные отложения – мягкие ткани моллюсков».

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны донные отложения водных экосистем г. Гомеля и прилегающих территорий, р. Сож, а также представитель класса двустворчатых моллюсков – перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.). Двустворчатые моллюски обычно обладают более высокой способностью накапливать эти металлы из водной среды по сравнению со многими другими крупными водными организмами [1; 2; 3]. Благодаря своим способностям к высокой биоаккумуляции металлов и малоподвижному образу жизни двустворчатые моллюски часто используются в программах биомониторинга для оценки состояния водных экосистем, особенно в районах, подверженных загрязнению металлами [4]. Выбранные водоемы характеризуются близкими физико-географическими условиями (географическое положение, климат, почвы, геологическое строение, растительность), но с существенным различием в степени и специфике хозяйственного освоения и техногенной нагрузки (рис. 1). Изучаемые водоемы отличаются гидрологическим режимом. Все без исключения водоемы городские и пригородной зоны используются для рыбной ловли, массового отдыха, проведения культурно-спортивных мероприятий и отчасти полива огородов. 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 связан с р. Сож водоемом, искусственно созданным для отвода излишка воды в половодье от д. Якубовка.

Оз. 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.



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

Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля и отбора проб (а); точки отбора проб представляют собой участки р. Сож в районе д. Кленки и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста (б)

Fig. 1. The layout of the reservoirs of Gomel and sampling (a); 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 (b)

Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб из нее 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.

В исследовании представлены данные по содержанию изучаемых металлов в 2019–2021 гг. Такой временной промежуток был выбран не случайно, так как на протяжении 2019–2021 гг. количество осадков в летний период было ниже нормы, температура – выше климатической нормы и уровень воды в водоемах г. Гомеля, где проводились исследования, снизился более чем на 1 метр. Существенно изменились физико-химические условия в водных экосистемах: температура воды в придонных слоях увеличилась, выросло содержание растворенного кислорода, изменились окислительно-восстановительные условия в придонных слоях воды и т. д. В таких случаях соединения металлов в донных отложениях из малодоступных для биоты форм переходят в более доступные [5], активно поглощаются живыми организмами. Для донных отложений идет процесс очищения, металлы переходят в водную среду, а организмы животных и растений уносятся течением, если таковое имеется в водоеме. В биоте водных экосистем концентрация загрязнителей в таких случаях повышается [6].

Проведен сравнительный анализ содержания свинца и меди в водоемах в 2010 и 2019 гг. для определения изменения антропогенной нагрузки на водоем за 10 лет.

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 [7]. 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 обрабатывали статистически в программе *Microsoft Excel*, проводился парный двухвыборочный t-тест для средних, а также корреляционный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные по изучению содержания свинца и меди в донных отложениях изученных водоемов приведены на рис. 3.

Содержание соединений свинца в донных отложениях практически всех изучаемых водных экосистем в 2019 г. снизилось по сравнению с 2010 г. в 1,1–22,7 раза (см. рис. 2). Исключение – оз. Володькино, что объяснить сложно, так как водоем находится выше черты г. Гомеля. Вероятно, в водоем поступает поверхностный сток с близлежащих территорий, где в почвах накопилось большое количество соединений различных металлов (ранее возле водоемов располагались луга заготовки сухих кормов для крупного рогатого скота, вносились удобрения, использовалась сельхозтехника для уборки сена). Объяснить повышение содержания свинца (рис. 2) и меди (рис. 3) в отложениях оз. Володькино можно также поступлением в водоем воды из р. Ипать.

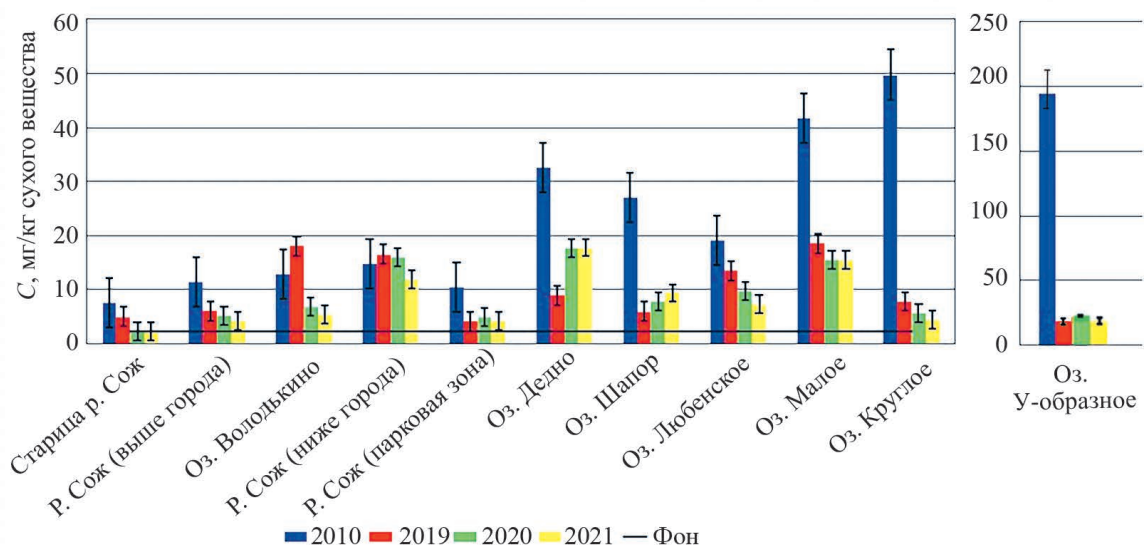


Рис. 2. Содержание свинца в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 2. Lead content in bottom sediments of water bodies of Gomel and adjacent territories

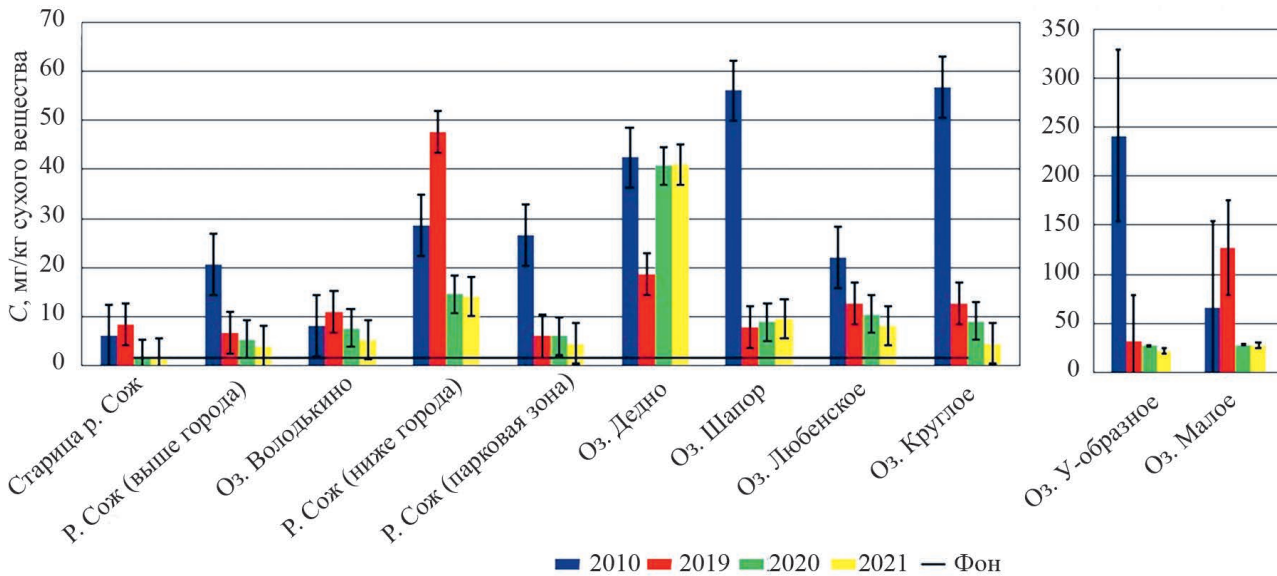


Рис. 3. Содержание меди в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 3. Copper content in bottom sediments of water bodies of Gomel and adjacent territories

Максимальное снижение содержания металла в донных отложениях наблюдалось в оз. У-образное, куда в течение длительного времени поступали сточные воды предприятий Северного промузла, что указывает на очищение водоема после прекращения сброса их стоков. Отмечено значительное уменьшение концентрации соединений свинца в донных отложениях водоемов, принимающих либо стоки предприятий (оз. Дедно), либо стоки с территории городских предприятий ОАО «Гомельдрев» завода «Гомельобой», ФСК (оз. Шапор). Государственная политика в области охраны окружающей среды Республики Беларусь требует принятия эффективных мер по недопущению загрязнения воздуха, водных и земельных ресурсов, сохранению биологического разнообразия. Начиная с 2007 г. ежегодно проводятся мероприятия по снижению отрицательного воздействия на атмосферный воздух Беларуси. Как пример, в 2007 г. проведено более 400 мероприятий, что позволило сократить выбросы загрязняющих веществ на 17,2 тыс. т. Минприроды и его органами устанавливаются лимиты на выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов. Должностные лица Минприроды и его органов в соответствии с законодательством Республики Беларусь имеют право приостанавливать деятельность предприятий и производств, если они не соответствуют нормам экологической безопасности.

Причиной уменьшения содержания металла в донных отложениях исследуемых водоемов в 2019 г. в сравнении с 2010 г. является снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы изучаемых территорий, что может быть итогом проведения природоохранной политики в Республике Беларусь, а также следствием протекания процессов самоочищения водных экосистем. Снижение концентрации свинца в донных отложениях р. Сож в районе парковой зоны (центр города, где в реку выходит сток ливневой канализации с центральной части г. Гомеля) не столь значительно в сравнении с другими водоемами изучаемой территории. Это может являться причиной поступления соединений металла с поверхностным стоком города.

На протяжении 2019–2021 гг. содержание свинца в отложениях р. Сож парковой зоны изменялось не столь значительно, как в других изучаемых водоемах. Возможно, в почвах, прилегающих к берегу реки, сохранилось значительное количество соединений свинца, которые в период половодья и дождей поступают в р. Сож. Для донных отложений остальных изучаемых водоемов за 2019–2021 гг. также было отмечено снижение концентрации данного металла. Исключение составляют озера У-образное, Дедно и Шапор, принимающие загрязненный поверхностный сток с территории г. Гомеля.

На рис. 4 представлены данные, отражающие характер накопления меди донными отложениями водоемов в 2010–2019 гг. В донных отложениях большинства изучаемых водных экосистем содержание меди в 2019 г. было ниже, чем в 2010 г., в 1,2–7,6 раза, что свидетельствует о протекании процесса самоочищения водоема, когда растения, которые являются биофильтрами, поглощают медь из донных отложений, часть загрязнителей уходит из донных отложений в воду и уносится течением. В отложениях Старицы и оз. Володькино содержание металла незначительно увеличилось. Большое снижение содержания меди отмечено для отложений водоемов, испытывающих высокую антропогенную нагрузку (озера Дедно, Ша-

пор, У-образное). Однако в донных отложениях оз. Малое и на участке р. Сож ниже черты г. Гомеля концентрация меди увеличилась. Вдоль берега оз. Малое проходит железнодорожная дорога, соединяющая речной порт, элеватор и предприятия Северного промузла, которая используются для перевозки грузов и по настоящий момент. Водоем принимает стоки городских коллекторов и частных предприятий, расположенных вблизи озера. Также в оз. Малое поступают стоки с автостоянки супермаркета и территории троллейбусного парка. Все вышеперечисленные факторы могут способствовать высокому содержанию изучаемых тяжелых металлов, в том числе и меди в компонентах водоема. В отложениях оз. Малое содержится большое количество органических соединений, являющихся природными сорбентами, что увеличивает загрязненность водоема тяжелыми металлами. Повышение содержания соединений металла на участке р. Сож ниже черты города указывает на влияние городской агломерации г. Гомеля на состояние р. Сож.

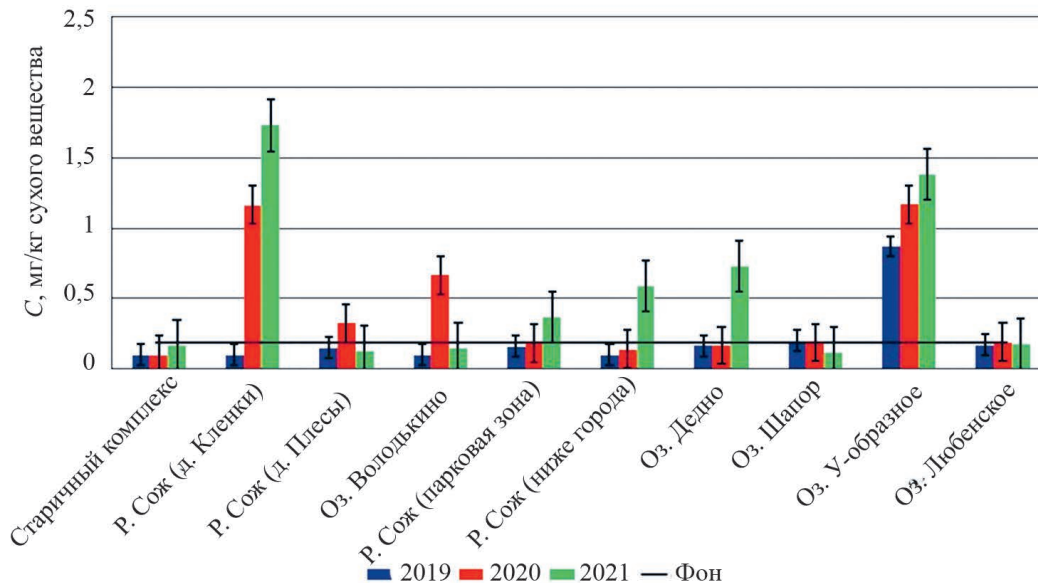


Рис. 4. Содержание свинца в мягких тканях перловницы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 4. Lead content in the soft tissues of pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Максимальное снижение содержания меди в донных отложениях составило 7,6 раза для отложений оз. У-образное, которое длительное время принимало сточные воды предприятий Северного промузла г. Гомеля. В водоеме произрастает большое количество водных растений, что могло повлиять на содержание тяжелых металлов в донных отложениях водоема [8; 9]. В оз. Круглое содержание меди в отложениях снизилось в среднем в 4,5 раза, что связано с большим количеством водных растений, являющихся биофильтрами [8; 9], которые при реконструкции моста, расположенного очень близко к водоему, удалялись в течение нескольких лет.

В период с 2019 по 2021 гг. наблюдалось снижение содержания меди в донных отложениях большинства изучаемых водоемов в 1,1–5,2 раза, исключение составляют водоемы, испытывающие значительную антропогенную нагрузку (участок р. Сож в парковой зоне принимает ливневые воды центра г. Гомеля; оз. Дедно имеет контакт через земляную дамбу с водоемом, принимающим сточные воды предприятий г. Гомеля и стоки двух коллекторов – Прудковского и Хатаевичского; оз. Шапор, куда поступают поверхностные стоки с территорий предприятий АПДО «Гомельдрев» и завода «Гомельобой», а также ФСК).

На участке р. Сож ниже черты города содержание металла в отложениях в 2020 г. незначительно снизилось по сравнению с данными 2019 г. и оставалось на таком же уровне и в 2021 г., что свидетельствует о присутствии металла в поверхностных стоках г. Гомеля, поступающих в р. Сож.

Содержание соединений меди в отложениях изучаемых водоемов в период 2019–2021 гг. значительно выше, а свинца ниже, чем в донных отложениях р. Сунгари вблизи г. Харбина (для меди $3,95 \pm 0,13$ мг/кг сухого вещества, для свинца $21,93 \pm 2,65$ мг/кг сухого вещества) [10].

В организм гидробионтов тяжелые металлы попадают с пищей или через покровы [11; 12]. Действие тяжелых металлов проявляется на всех уровнях организации биологических систем – от молекулярно-биохимического до биоценотического. Токсическое действие металлов многозначно. 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. Именно эти нарушения нормальной и согласованной работы ферментных систем представляют основной механизм действия токсических веществ. Наиболее исследовано токсическое действие тяжелых металлов на позвоночных [13].

На рис. 4 представлена динамика содержания свинца в мягких тканях перловицы. В 2019 г. содержание свинца в тканях моллюсков данного вида снизилось в 5,0 раз при сравнении с величинами, полученными в 2010 г., но в дальнейшем в 2020 и 2021 гг. содержание свинца однонаправленно увеличилось, а в 2021 г. составило половину того содержания, которое было характерно для 2010 г. Как отмечалось выше, это может быть следствием проведения природоохранной политики в Республике Беларусь, а также протекания процессов самоочищения водных экосистем. Повышение содержания свинца в тканях перловицы в 2019–2021 гг. свидетельствует об увеличении биологической доступности форм металлов в донных отложениях, так как его поступление в окружающую среду значительно снизилось. Длительный промежуток времени в Республике Беларусь не использовался этилированный бензин, производственные выбросы в атмосферу сократились, а также в г. Гомеле отсутствуют предприятия, выбрасывающие соединения свинца в значительных количествах. Известно, что водные животные могут накапливать тяжелые металлы в своих мягких тканях в концентрациях, которые могут в десятки и тысячи превышать их содержание в среде обитания [10].

Низкое содержание свинца отмечено у особей перловиц, обитающих в старичном комплексе, что подтверждает отсутствие антропогенного поступления соединений металла в данную водную экосистему. У моллюсков данного вида, обитающих в старичном комплексе, в 2021 г. концентрация соединения свинца увеличивалась по отношению к 2019 и 2020 г. в 1,6 раза, что является следствием вторичного загрязнения водоема, когда металлы переходят в абиотических компонентах в доступные для биологических объектов формы. Донные отложения старичного комплекса содержат соединения свинца в доступной форме, которые могут оказать негативное влияние на биологические компоненты данной водной экосистемы. Содержание свинца в моллюсках старичного комплекса может быть использовано для сравнительного анализа загрязнения водных экосистем города. На протяжении всего периода исследований практически не изменялось содержание соединений свинца у перловиц, обитающих в оз. Любенское, несмотря на то что вдоль его берега проходит крупная объездная автомагистраль, остановка общественного транспорта, а также водоем принимает поверхностный сток с улиц и огородов частного сектора города, все же в донных отложениях содержание свинца однонаправленно снижалось. Возможно, это следствие контроля со стороны организма за поступлением токсикантов в органы и ткани.

Однонаправленное увеличение соединений свинца у особей на всех участках р. Сож и в озерах У-образное и Дедно может свидетельствовать о высокой доступности соединений металла в отложениях, а для участка р. Сож парковой зоны и озер У-образное и Дедно, где содержание свинца увеличивалось в донных отложениях, еще и о поступлении загрязнителей с поверхностным стоком. Можно предположить, что механизм контроля за поступлением токсикантов в организм, так называемый «механизм блокировки», дал сбой, и в ткани моллюсков стали поступать все доступные формы металла, находящиеся в воде и отложениях вышеперечисленных водоемов. Многие исследователи указывают на тот факт, что двустворчатые моллюски могут регулировать концентрацию металлов в своих тканях. Например, у морского черенка *Sinonovacula constricta* есть механизм регулирования накопления таких металлов, как медь при длительном воздействии [14]. Эта регуляторная способность у двустворчатых моллюсков ограничена, когда концентрация металлов в абиотических компонентах превышает определенный порог [15; 16]. Механизмы выведения тяжелых металлов из организма имеют различный характер. Известно, что цитоплазматические белки имеют свойство связывать избытки металлов в организме у мидий Грея *Crenomytilus grayanus*, а у принадлежащего этому же семейству модиолуса *Modiolus kurilensis* связывание происходит на уровне мембранных структур [17].

Отмечено высокое содержание соединений свинца в тканях перловиц, обитающих на участке р. Сож выше черты г. Гомеля (д. Кленки). Участок р. Сож в районе д. Кленки активно использовался населением для отдыха и рыбалки круглый год, поэтому можно наблюдать большое количество автотранспорта на берегу реки. Однако маловероятно, что данные факты повлияли на высокое содержание металла в тканях моллюсков. Вышеназванный участок реки загрязняется поверхностным стоком с огородов частного сектора. Содержание соединений свинца в удобрениях, которые вымываются с поверхностным стоком с сельскохозяйственных территорий, вряд ли может оказать значительное влияние на накопление доступных форм элемента в донных отложениях. Факт высокого накопления соединений свинца в мягких тканях перловицы на данном участке реки требует дальнейшего детального изучения.

На фоне увеличения содержания соединений свинца в мягких тканях перловицы большинства изучаемых водоемов в 2021 г. у представителей, обитающих на участке р. Сож в окрестностях д. Плесь, в оз. Володькино и в оз. Шапор, содержание металла снизилось, что можно объяснить включением механизма контроля за поступлением соединений металла в организм моллюсков, когда скорость выведения

токсикантов превышает скорость поступления в организм. Факт контроля со стороны живых организмов за поступлением токсикантов в ткани и органы необходимо учитывать при проведении изучения загрязнения экосистем.

На рис. 5 показано содержание меди в мягких тканях перловицы изучаемых водоемов. Разница в содержании металла в тканях моллюсков в 2010 и 2019 гг. составила 12 раз в сторону снижения. В 2020 г. концентрация металла снижалась, однако в 2021 г. отмечено увеличение содержания данного загрязнителя в мягких тканях перловицы в 1,5 раза. Снижение концентрации соединений меди в биологических объектах водных экосистем свидетельствуют о протекании процесса самоочищения водоема, поскольку этот металл широко используется как в производственных процессах, так и быту.

Отмечена единая динамика изменения содержания соединений меди в мягких тканях моллюсков во всех водоемах в период с 2019 по 2021 г., кроме старичного комплекса: снижение содержания в 2020 г. в 1,5–2,0 раза в сравнении с 2019 г. и дальнейшее увеличение в 2021 г. Максимальное снижение содержания меди в 2020 г. по сравнению с 2019 г. наблюдалось у моллюсков на участке р. Сож в районе д. Плесы и составило 1,9 раза. Минимум снижения составил 1,1 раза для особей, обитающих в оз. Шапор.

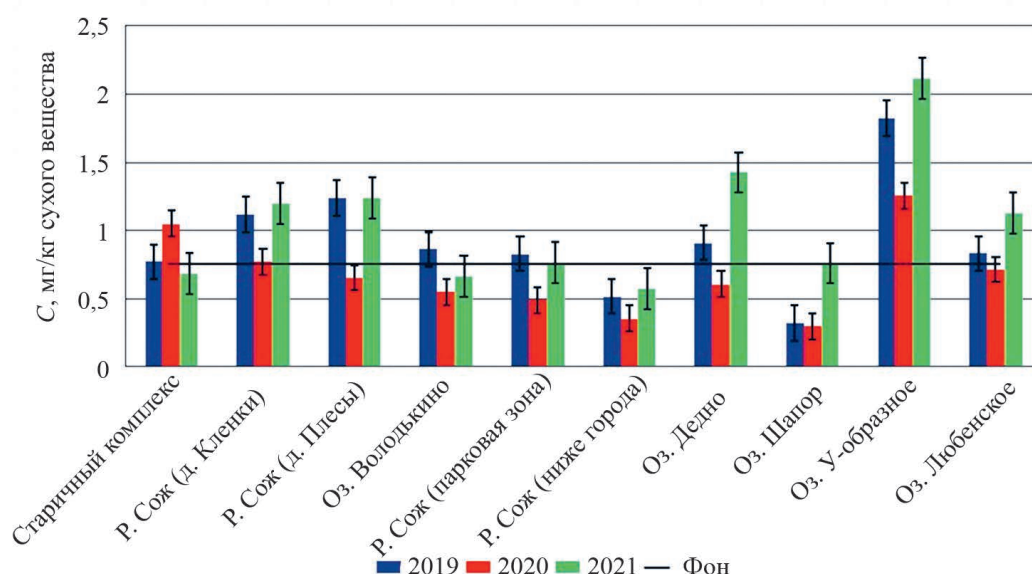


Рис. 5. Содержание меди в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 5. Copper content in pearl barley tissues in water bodies of Gomel and adjacent territories

Значительное повышение содержания меди в 2021 г. по сравнению с 2020 г. отмечено у моллюсков в водоемах, подвергающихся высокой антропогенной нагрузке (озера Дедно и У-образное). Снижение концентрации меди с 2019 по 2020 гг. свидетельствует о снижении поступления соединений металла в водные экосистемы, а увеличение в 2021 г. может говорить о протекании внутриводных процессов, связанных с изменением физико-химических показателей состояния водоемов, что и привело к доступности меди для моллюсков данного вида в загрязненных водоемах.

В период исследований низкое содержание меди в тканях перловицы отмечено в оз. Шапор и на участке р. Сож, ниже административной черты г. Гомеля, причем водоемы испытывали высокую антропогенную нагрузку. Можно предположить, что данный факт является следствием работы «механизма блокировки» поступления соединений меди в мягкие ткани моллюсков, особенно если учитывать, что в отложениях р. Сож ниже административной черты определено высокое содержание металла. В 2020 г. максимальная и высокая концентрация меди отмечена в тканях особей, обитающих в старичном комплексе р. Сож и в оз. У-образное. Установлено низкое содержание металла в тканях перловиц, обитающих на участке р. Сож ниже города по течению, и в оз. Володькино, где значительно меньше антропогенная нагрузка на водоем. Данный факт, предположительно, может быть связан с высокой сорбционной способностью донных отложений на участке р. Сож ниже черты города, где содержится большое количество органических веществ, которые прочно удерживают соединения меди в недоступных для биоты формах, что свидетельствует о высокой способности реки к процессам самоочищения.

Содержание свинца ($2,98 \pm 0,34$ мг/кг сухого вещества) и меди ($7,97 \pm 0,28$ мг/кг сухого вещества) у моллюсков рода *Unio* в р. Сунгари рядом с Харбином выше, чем у перловиц в изучаемых водоемах [10].

В ходе исследований определены коэффициенты накопления соединений тяжелых металлов в тканях перловицы для каждого изучаемого водоема (табл. 1).

Коэффициент накопления 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.

Таблица 1

Коэффициенты накопления тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 1

Coefficients of accumulation of heavy metals in the tissues of common pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Водоем	Год					
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
	Свинец			Медь		
Старичный комплекс	0,02	0,05	0,07	0,09	0,64	0,40
Р. Сож выше города	0,02	0,23	0,41	0,16	0,14	0,29
Оз. Володькино	0,01	0,10	0,03	0,08	0,07	0,12
Р. Сож в р-не парковой зоны	0,04	0,04	0,09	0,14	0,12	0,16
Р. Сож ниже черты города	0,01	0,02	0,05	0,01	0,02	0,04
Оз. Дедно	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,04
Оз. Шапор	0,03	0,02	0,01	0,04	0,03	0,08
Оз. У-образное	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05	0,09
Оз. Любенское	0,01	0,02	0,03	0,07	0,07	0,14

Единой динамики в накоплении соединений свинца в мягких тканях перловицы не установлено, что может быть следствием различных путей поступления металла в водоемы. Увеличение накопления изучаемого металла характерно для моллюсков, обитающих на участках р. Сож как выше, так и ниже административной черты города по течению, в старичном комплексе и в оз. Любенское. Объяснить высокий уровень накопления металлов на участке р. Сож до принятия стоков города в окрестностях д. Кленки довольно сложно. Все вышеперечисленные водоемы различаются антропогенной нагрузкой, что еще раз подчеркивает необходимость изучения загрязнения водных экосистем, не испытывающих видимой антропогенной нагрузки. Необходимо отметить факт значительного накопления загрязнителей в тканях живых организмов в чистых водных объектах по сравнению с загрязненными водоемами вследствие работы «механизма блокировки». Накопление соединений металлов в тканях моллюсков до высоких уровней в водоемах с низким содержанием металла в донных отложениях отмечено в литературе [14].

Старичный комплекс р. Сож не испытывает видимой антропогенной нагрузки, но одностороннее, хоть и незначительное, увеличение накопления соединений свинца в тканях моллюсков, как и в оз. Любенское, можно объяснить переходом металла в донных отложениях в биологически доступные формы. В донных отложениях старичного комплекса увеличилось количество органического вещества, которое ранее вымывалось в период половодья в р. Сож. Органическое вещество является важной депонирующей фракцией различных загрязнителей, в том числе и тяжелых металлов. В 2020 и 2021 гг. величины коэффициентов накопления свинца у особей, обитающих в старичном комплексе, превысили показатели, рассчитанные для некоторых городских водоемов.

Увеличение накопления соединений свинца в 2021 г. в мягких тканях моллюсков, обитающих на участке р. Сож ниже административной черты города, где собирается практически весь поверхностный сток с территорий г. Гомеля, свидетельствует о влиянии стока города на экосистему р. Сож, в частности на содержания соединений свинца.

Предполагалось, что высокое накопление соединений свинца в мягких тканях моллюсков будет отмечено в оз. У-образное, куда поступает поверхностный сток с автомагистрали, автостоянки и территории Прудковского рынка, а также на участке р. Сож парковой зоны. Но в водоемах в 2019 и 2020 гг. уровень

накопления металла в тканях перловицы был практически на одном и том же уровне, а в 2021 г. увеличился в 1,4 раза в оз. У-образное и в 2,3 раза у особей р. Сож, что говорит не только о поступлении соединений свинца в водоем с поверхностным стоком и об увеличении доступных форм металла в компонентах водоема, но и скорее всего о срыве работы «механизма блокировки» и бесконтрольном поступлении загрязнителей в организм перловицы.

У моллюсков, обитающих в оз. Володькино, увеличение значения коэффициента накопления свинца в 2020 г. по сравнению с 2019 г. составило 10 раз, что активизировало контроль со стороны организма за поступлением токсикантов в ткани, и в результате уровень накопления металла снизился к 2021 г. в 3,3 раза. Для особей оз. Дедно характерна обратная динамика: снижение коэффициента накопления свинца к 2020 г., затем повышение в 2021 г., что при увеличении содержания металла в донных отложениях может быть следствием работы «механизма блокировки». Только у моллюсков в оз. Шапор отмечено снижение накопления соединений свинца при увеличении концентрации в донных отложениях. Это подтверждает факт наличия контроля со стороны организма за поступлением поллютантов в организм.

Для особей большинства изучаемых водных экосистем значения коэффициентов накопления соединений меди в 2019 и 2020 гг. различались незначительно, хотя в 2020 г. рассчитаны более низкие величины в сравнении с 2019 г. при общей тенденции снижения содержания металла в донных отложениях водоемов. Это может свидетельствовать об отсутствии соединений меди в поверхностном стоке с прилегающих к водоему территорий. Причиной увеличения значения коэффициента накопления в большинстве водоемов в 2021 г. является в большей степени следствием вторичного загрязнения водных экосистем, когда металлы в компонентах водоемов переходят в более доступные для живых организмов формы. Значительное увеличение коэффициента накопления меди в 2021 г. отмечено у моллюсков старичного комплекса (в 7,1 раза) в сравнении с 2019 г. при снижении содержания металла в донных отложениях. Высокие значения коэффициентов накопления меди характерны для моллюсков р. Сож выше черты города и в районе центра города. Здесь река принимает поверхностный сток с центральной части города, где может содержаться значительное количество соединений меди, накопившихся за долгое время в почвах городских территорий, что может повлиять на накопление металла в мягких тканях моллюсков. На участке реки выше черты города соединения меди могут поступать с огородов дачных поселков, где бесконтрольно используют пестициды и удобрения, содержащие соединения меди. Данный факт может повлиять на накопление соединений меди в биотических компонентах водных экосистем, хотя участок реки не испытывает видимую антропогенную нагрузку. На участке ниже административной черты г. Гомеля накопление меди в тканях моллюсков ниже, чем у особей реки в центре города, что свидетельствует о содержании металлов в отложениях реки в малодоступных для двустворчатых моллюсков формах, нивелируя в определенной степени негативное влияние поверхностного стока города на экосистему р. Сож. Однако на участке ниже черты города у моллюсков значение коэффициента накопления меди увеличивалось на протяжении всего периода исследования, которое не отмечалось у перловиц ни в одном другом водоеме, что может стать опасным для состояния биологических объектов на данном участке реки, который активно используется для любительского рыболовства.

Значительное увеличение в 2021 г. величины коэффициента накопления в сравнении с 2020 г. было определено у особей озер Любенское и Володькино, имеющих различный характер антропогенной нагрузки. Особенно стоит обратить внимание на накопление соединений меди до высоких уровней у моллюсков в оз. Володькино, так как водоем очень активно используется для ловли рыбы и продажи населению в близлежащих крупных дачных поселках.

Рассчитанные значения коэффициентов накопления меди в мягких тканях перловицы были выше в сравнении с величиной коэффициента накопления свинца. Похожие закономерности получены при изучении загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей устриц. По результатам исследования Сао Х, et al. [4], константа скорости элиминации меди и цинка, рассчитываемая по формуле $C_t = C_0 e^{-kt}$, показывает снижение концентрации тяжелых металлов в тканях моллюсков после перевода их в чистую среду, которое у некоторых видов устриц близко к нулю, следовательно, двустворчатые моллюски практически не способны «отдавать» соединения меди и цинка из организма.

При изучении возможности использования моллюсков как биоиндикаторов загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами важную роль играет корреляционная зависимость между содержанием загрязнителей в мягких тканях моллюсков и абиотических компонентов. Изучение содержания тяжелых металлов в воде идет после ее фильтрования, значит удаления основной органической фракции, которую поглощают моллюски, поэтому было принято решение провести корреляционный анализ содержания тяжелых металлов между мягкими тканями перловицы и донными отложениями. Как известно, двустворчатые моллюски в ходе питания фильтруют придонные слои воды, где в большей степени находится органическое вещество. Расчеты были проведены для каждого года исследований отдельно, поскольку в донных отложениях формы нахождения металлов могут изменяться с течением времени (табл. 2).

Коэффициент корреляции между содержанием металлов в мягких тканях перловицы обыкновенной и донными отложениями водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 2

Correlation coefficient between metal content in soft tissues of common barley and bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent areas

Год	r	Pb	Cu
2019	1	0,50	0,15
	2	0,85	0,79
2020	1	0,39	0,14
	2	0,84	0,62
2021	1	0,43	0,36
	2	0,88	0,85

Примечание. 1 – истинное значение r; 2 – значение r после удаления артефактов.

При изучении корреляционных связей в 2019 г. между содержанием металлов в мягких тканях перловицы и донными отложениями была установлена высокая степень связи для соединений свинца. На примере растений С. Е. Головатый установил, что при высоком содержании тяжелых металлов в почвах накопление металлов в растительных организмах не имело прямолинейной зависимости от содержания [18]. При низких концентрациях металлов в почве поглощались все доступные формы металлов, однако при повышении концентрации накопление снижалось. Данный факт может свидетельствовать о прекращении поступления тяжелых металлов в живые организмы, или скорость введения металла в организм была равно скорости поглощения, либо превышало ее. В литературе указывается, что в таких случаях расчет корреляционных зависимостей можно проводить без учета аномально высоких или низких значений, которые выходили за пределы $\pm 2\sigma$ от рассчитанной линии регрессии. Так, при изучении корреляционной зависимости соединений свинца в мягких тканях моллюсков и донных отложениях авторами были исключены концентрации металла, полученные для оз. Володькино и участков р. Сож в районе парковой зоны и ниже административной черты города. В таком случае коэффициент корреляции изменил свое значение с ($r = 0,50$) до ($r = 0,85$), что свидетельствует о тесной связи между содержанием свинца в тканях моллюсков и донных отложениях. Такой метод расчета был применен для меди и свинца на протяжении всего периода исследований, и в результате значение коэффициента корреляции значительно повысилось. Было установлено, что для свинца и меди характерна высокая степень связи между концентрацией в донных отложениях и тканях моллюсков.

При анализе полученных данных можно предположить, что соединения свинца и меди поступают в мягкие ткани моллюсков преимущественно из донных отложений.

Заключение

При сравнительном анализе содержания свинца и меди в донных отложениях и мягких тканях перловицы в 2010 и 2019 гг. отмечена тенденция к снижению концентрации изучаемых металлов за исключением отдельных водных экосистем. Снижение содержания в компонентах биосистем соединений меди и свинца к 2019 г. свидетельствует об эффективности природоохранной политики, проводимой в Республике Беларусь, так как донные отложения как депонирующая фракция, предоставляют информацию о загрязнении водных экосистем за длительный промежуток времени. Отмечено, что почвы водосборных территорий, прилегающие к водным экосистемам, накопили за длительное время значительные количества тяжелых металлов, и могут служить источником загрязнения водных экосистем. Данный факт подтверждается повышением содержания изучаемых металлов в 2021 г. в сравнении с 2019 и 2020 гг. в донных отложениях и в мягких тканях моллюсков отдельных водоемов. Учитывая вышесказанное, ожидать быстрого очищения компонентов водных экосистем в скором времени не приходится.

Снижение концентрации свинца и меди в донных отложениях водоемов при одновременном повышении таковых в мягких тканях моллюсков в период 2019–2021 гг. свидетельствует о вторичном загрязнении водных экосистем, когда соединения тяжелых металлов переходят в донных отложениях в биологически доступные формы и активно поглощаются живыми организмами. На увеличение доступности

для моллюсков соединений меди и свинца в донных отложениях указывает увеличение коэффициентов накопления металлов за период исследования в большей части водных экосистем.

Выявлена тесная корреляционная зависимость между концентрациями свинца и меди в донных отложениях и мягких тканях моллюсков, что подтверждает поступление соединений металлов в ткани перловицы из донных отложений при фильтрации придонных слоев воды.

Перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) может быть использована для оценки содержания доступных форм свинца и меди в донных отложениях водных экосистем.

Библиографические ссылки

1. Fukunaga A, Anderson MJ. Bioaccumulation of Copper, Lead and Zinc by the Bivalves *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2011;396:244–252.
2. Liu F, Wang WX. Differential Influences of Cu and Zn Chronic Exposure on Cd and Hg Bioaccumulation in an Estuarine Oyster. *Aquatic Toxicology*. 2014;148:204–210.
3. Tan QG, Wang Y, Wang WX. Speciation of Cu and Zn in Two Colored Oyster Species Determined by X-Ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2015;49:6919–6925.
4. Cao X, et al. Interspecies Calibration for Biomonitoring Metal Contamination in Coastal Waters Using Oysters and Mussels. *Science of the Total Environment*. 2023;883:163703.
5. Li Z, et al. Adsorption and Desorption of Heavy Metals at Water Sediment Interface Based on Bayesian Model. *Journal of Environmental Management*. 2023;329:96055–96074.
6. Vural P, Acarli S. Monthly variation of micro-and macro-element composition in smooth scallop, *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758), from the Çardak Lagoon (Çanakkale Strait, Turkey). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2021;38:449–459.
7. Абакумов ВА. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1983. 240 с.
8. Комаровский ФЯ, Полищук ЛР. Ртуть и другие тяжелые металлы в водной среде: миграция, накопление, токсичность для гидробионтов. *Гидробиологический журнал*. 1981;17(5):71–83.
9. Позднякова АИ. Тяжелые металлы в системе «донные отложения – водная растительность» речных экосистем в зоне наблюдения Белорусской атомной станции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;3:41–52.
10. Зарыхта ВВ, и др. Дифференциальное накопление тяжелых металлов в мягких тканях трех видов двустворчатых моллюсков из реки Сунгари вблизи г. Харбина (Китай). *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2020;56(2):119–126.
11. Wu X, Jia Y, Zhu H, Wang H. Bioaccumulation of Cadmium Bound to Humic Acid by the Bivalve *Meretrix Linnaeus* from Solute and Particulate Pathways. *Journal of Environmental and Sciences*. 2010;22:198–203.
12. Ke Y, et al. Heavy Metal Accumulation in Oysters from an Aquaculture Area in the Luoyangjiang River Estuary. *Toxics*. 2024;12(9):645.
13. Безматерных ДМ. Моллюски прудовик обыкновенный и прудовик яйцевидный как аккумулятивные индикаторы загрязнения пресных вод тяжелыми металлами. *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. 2018;1(5):112–117.
14. Ke Y, Wang WX. Dynamics of Copper Regulation in a Marine Clam *Sinonovacula constricta* at the Organ Level: Insight from a physiologically Based Pharmacokinetic Model. *Environmental Pollution*. 2023;336:122421.
15. Shi D, Wang WX. Understanding the Differences in Cd and Zn Bioaccumulation and Subcellular Storage among Different Populations of Marine Clams. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:449–456.
16. Chan H. Accumulation and Tolerance to Cadmium, Copper, Lead and Zinc by the Green Mussel *Perna viridis*. *Marine Ecology Progress Series*. 1988;48:295–303.
17. Подгурская ОВ, Кавун ВЯ, Лукьянова ОН. Аккумуляция и распределение тяжелых металлов в органах мидии *Crenomytilus grajanus* и *Modiolus modiolus* из районов апвеллингов Охотского и Японского морей. *Биология моря*. 2004;30(3):219–226.
18. Головатый СЕ. *Тяжелые металлы в агроэкосистемах*. Минск: РУП «Институт почвоведения и агрохимии»; 2002. 239 с.

References

1. Fukunaga A, Anderson MJ. Bioaccumulation of Copper, Lead and Zinc by the Bivalves *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2011;396:244–252. DOI:10.1016/j.jembe.2010.10.029.
2. Liu F, Wang WX. Differential Influences of Cu and Zn Chronic Exposure on Cd and Hg Bioaccumulation in an Estuarine Oyster. *Aquatic Toxicology*. 2014;148:204–210. DOI:10.1016/j.aquatox.2014.01.014.
3. Tan QG, Wang Y, Wang WX. Speciation of Cu and Zn in Two Colored Oyster Species Determined by X-Ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2015;49:6919–6925. DOI:10.1021/es506330h.
4. Cao X, et al. Interspecies Calibration for Biomonitoring Metal Contamination in Coastal Waters Using Oysters and Mussels. *Science of the Total Environment*. 2023;883:163703. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163703.
5. Li Z, et al. Adsorption and Desorption of Heavy Metals at Water Sediment Interface Based on Bayesian Model. *Journal of Environmental Management*. 2023;329:96055–96074. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.117035.
6. Vural P, Acarli S. Monthly variation of micro-and macro-element composition in smooth scallop, *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758), from the Çardak Lagoon (Çanakkale Strait, Turkey). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2021;38:449–459. DOI:10.12714/egejfas.38.4.06
7. Abakumov VA. *Rukovodstvo po metodam gidrобиологического анализа poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij* [Guide to Methods of Hydrobiological Analysis of Surface Waters and Bottom Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 240 p. Russian.
8. Komarovskiy FY, Polischuk LR. *Rtut' i drugie tyazhelye metally v vodnoj srede: migraciya, nakoplenie, toksichnost' dlya gidrobiontov* [Mercury and other heavy metals in the aquatic environment: migration, accumulation, toxicity to aquatic organisms]. *Hydrobiological Journal*. 1981;17(5):71–83. Russian.

9. Pozdnyakova AI. *Tyazhelye metally v sisteme «donnye otlozheniya – vodnaya rastitel'nost'» rechnyh ekosistem v zone nablyudeniya Belorusskoj atomnoj stancii* [Heavy metals in the system «bottom sediments – aquatic vegetation» of river ecosystems in the observation zone of the Belarusian nuclear power plant]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;3:41–52. Russian. DOI:10.46646/2521-683X/2020-3-41-52
10. Zarykhta VV, et al. *Differencial'noe nakoplenie tyazhelykh metallov v myagkikh tkanyah trekh vidov dvustvorchatyh mollyuskov iz reki Sungari vblizi g. Harbina (Kitaj)* [Differential accumulation of heavy metals in soft tissues of three species of bivalve mollusks from the Songhua River near Harbin (China)]. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2020;56(2):119–126. Russian. DOI: 10.31857/S0044452920020114.
11. Wu X, Jia Y, Zhu H, Wang H. Bioaccumulation of Cadmium Bound to Humic Acid by the Bivalve *Meretrix Linnaeus* from Solute and Particulate Pathways. *Journal of Environmental and Sciences*. 2010;22:198–203. DOI:10.1016/S1001-0742(09)60093-0.
12. Ke Y, et al. Heavy Metal Accumulation in Oysters from an Aquaculture Area in the Luoyangjiang River Estuary. *Toxics*. 2024;12(9):645. DOI: 10.3390/toxics12090645.
13. Bezmaternyh DM. *Mollyuski prudovik obyknovennyj i prudovik jajcevidnyj kak akumuljativnye indikatory zagryazneniya presnyh vod tyazhelymi metallami* [The mollusks Pond Snail and Pond Snail as accumulative indicators of freshwater pollution by heavy metals]. *Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology*. 2018;1(5):112–117. Russian.
14. Ke Y, Wang WX. Dynamics of Copper Regulation in a Marine Clam *Sinonovacula constricta* at the Organ Level: Insight from a Physiologically Based Pharmacokinetic Model. *Environmental Pollution*. 2023;336:122421. DOI:10.1016/j.envpol.2023.122421.
15. Shi D, Wang WX. Understanding the Differences in Cd and Zn Bioaccumulation and Subcellular Storage among Different Populations of Marine Clams. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:449–456. DOI:10.1021/es034801o.
16. Chan H. Accumulation and Tolerance to Cadmium, Copper, Lead and Zinc by the Green Mussel *Perna viridis*. *Marine Ecology Progress Series*. 1988;48:295–303. DOI:10.3354/meps048295.
17. Podgurskaya OV, Kavun VYa, Lukyanova ON. *Akkumulyaciya i raspredelenie tyazhelykh metallov v organah midii Crenomytilus grajanus i Modiolus modiolus iz rajonov apvellingov Ohotskogo i Yaponskogo morej* [Accumulation and distribution of heavy metals in the organs of the mussels *Crenomytilus grajanus* and *Modiolus modiolus* from the upwelling areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan]. *Marine Biology*. 2004;30(3):219–226. Russian.
18. Golovatyj SE. *Tyazhelye metally v agroekosistemah* [Heavy metals in agroecosystems]. Minsk: RUP «Institut pochvovedeniya i agrohimii»; 2002. 239 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.08.2025.
Received by editorial board 02.08.2025.