

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ТКАНЯХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОЛЛЮСКОВ ВОДОЕМОВ Г. ГОМЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, А. И. МАКАРЕНКО²⁾

¹⁾Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 108, 246028, г. Гомель, Беларусь

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

Изучено содержание и накопление некоторых тяжелых металлов в мягких тканях и раковинах брюхоногих (Gastropoda: прудовик обыкновенный *Limnaea stagnalis* L. и живородка речная *Viviparus viviparus* L.), а также двустворчатых моллюсков (беззубка обыкновенная *Anodonta cygnea* L. и перловица обыкновенная *Unio pictorum* L.). На основании наблюдений установлено более высокое содержание меди, хрома и никеля в мягких тканях брюхоногих моллюсков. У хрома максимальное содержание характерно для тканей прудовика, тогда как у живородки оно минимальное. Содержание свинца, цинка, марганца и кобальта выше у двустворчатых моллюсков. В раковинах моллюсков концентрация свинца, кобальта, хрома и цинка была ниже предела обнаружения. Медь преимущественно концентрируется в мягких тканях моллюсков, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами. Содержание марганца в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах, у брюхоногих моллюсков отмечена противоположная тенденция. Представленные ряды накопления изучаемых металлов для гастропод и двустворчатых моллюсков имеют значительные отличия, что может определяться различной доступностью металлов в абиотических компонентах водоема для особей разных классов моллюсков. Уровень накопления отдельных металлов в тканях брюхоногих моллюсков в контрольном водоеме превышал таковые величины, рассчитанные для городских водоемов, чего не наблюдалось у двустворчатых моллюсков. На основании полученных данных для комплексной оценки водоемов в отношении определения степени загрязнения абиотических компонентов тяжелыми металлами можно рекомендовать живородку как индикатора меди и никеля для определения загрязнения цинком, марганцем и кобальтом – перловицу, хромом – прудовика, свинцом – беззубку. Однако определить степень загрязнения водоемов тяжелыми металлами, используя только мягкие ткани моллюсков и величины коэффициентов накопления металлов в тканях, по донным отложениям сложно, поэтому необходимо прибегать к специальным интегральным показателям загрязнения.

Ключевые слова: тяжелые металлы; брюхоногие и двустворчатые моллюски; межвидовые различия; водные экосистемы, коэффициент накопления.

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Макаренко АИ. Сравнительная характеристика содержания тяжелых металлов в тканях различных видов моллюсков водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:35–45.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-35-45>

For citation:

Makarenko TV, Makarenko AI. Comparative characteristics of heavy metals content in the various types of mollusks' tissues in Gomel water bodies and its adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;2:35–45. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-35-45>

Авторы:

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

Authors:

Tatiana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry, faculty of biology.
tmakarenko1968@bk.ru
Andrei I. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general and bioorganic chemistry.
amakarenko198989@mail.ru

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS CONTENT IN THE VARIOUS TYPES OF MOLLUSKS' TISSUES IN GOMEL WATER BODIES AND ITS ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO^a, A. I. MAKARENKO^b

^aFrancisk Skorina Gomel State University,
108 Saveckaja Street, Gomel 24602, Belarus.

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

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

The content and accumulation of some heavy metals in the soft tissues and shells of gastropods (Gastropoda: *Limnaea stagnalis* L. and *Viviparus viviparus* L.) and bivalves (*Anodonta cygnea* L. and *Unio pictorum* L.) were studied. Based on observations, a higher content of copper, chromium and nickel in the soft tissues of gastropods has been established. In chromium, the maximum content is typical for the tissues of the pond snail, while in the viviparus it is minimal. The content of lead, zinc, manganese and cobalt is higher in bivalves. In shellfish shells, the concentrations of lead, cobalt, chromium and zinc were below the detection limit. Copper is predominantly concentrated in the soft tissues of mollusks; nickel is evenly distributed between the soft tissues and shells. The manganese content in the tissues of bivalves exceeds the concentration in shells; the opposite trend is observed in gastropods. The presented series of accumulation of the studied metals for gastropods and bivalves have significant differences, which may be determined by the different availability of metals in the abiotic components of the reservoir for individuals of different classes of mollusks. The level of accumulation of individual metals in the tissues of gastropods in the control reservoir exceeded those values calculated for urban reservoirs, which was not observed in bivalves. Based on the data obtained, for a comprehensive assessment of water bodies in relation to determining the degree of contamination of abiotic components with heavy metals, we can recommend the viviparus as an indicator of copper and nickel, for determining contamination with zinc, manganese and cobalt – pearl barley, chromium – pond snail, lead - toothless. However, it is difficult to determine the degree of pollution of water bodies with heavy metals using only the soft tissues of mollusks and the values of the coefficients of metal accumulation in tissues based on bottom sediments; it is necessary to resort to special integral indicators of pollution.

Keywords: heavy metals; gastropods and bivalve molluscs; interspecies differences; aquatic ecosystems; accumulation coefficient.

Введение

Оценка общего уровня загрязнения водоема тяжелыми металлами должна включать анализ содержания этих элементов в тканях биоты, среди которой одними из основных индикаторов могут выступать пресноводные моллюски. Для определения индикаторных видов, в наибольшей степени отражающих общую картину содержания загрязнителей в водоеме, важно определить общий уровень накопления тяжелых металлов в тканях моллюсков различных водоемов, который может быть видоспецифичен и в существенной степени варьирует в зависимости от класса и вида моллюсков и условий того или иного водного объекта.

Цель исследования: изучить видовые особенности содержания тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, а также установить виды, возможные для использования при изучении загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами.

Материалы и методы исследования

Данные, представленные в работе, получены в исследованиях, проводимых в течение 2016–2019 гг. В этот период дождевые и талые воды поступали в водоемы в незначительных количествах, поэтому уровень воды в водных экосистемах, по данным гидрометеоцентра, снизился более чем на 1 м¹. Отбор проб моллюсков проводили с помощью дночерпателя и применяли ручной сбор в водоемах г. Гомеля, различающихся по характеру антропогенной нагрузки. Для проведения сравнительной характеристики был выбран контрольный водоем – старичный комплекс р. Сож, который не испытывает видимой антропогенной нагрузки и расположен на 10–12 км выше города по течению р. Сож. Мягкие ткани моллюсков отделяли от раковин и далее анализировали отдельно. Просушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы, затем подвергали сухому озолению в муфельной печи при 450 °С [1]. Содержание металлов в золе растений и донных отложений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре PGS-2 в лаборатории физико-химического анализа Республиканского

¹Уровень и температура воды в р. Сож по гидропосту г. Гомель сегодня [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/gauge/sozh-gomel> (дата обращения: 16.07.2022).

унитарного предприятия «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт». Для анализа выбраны следующие виды моллюсков из класса брюхоногих (Gastropoda) – прудовик обыкновенный (*Limnaea stagnalis* L.), живородка речная (*Viviparus viviparus* L.); из класса двустворчатых (Bivalvia) – беззубка обыкновенная (*Anodonta cygnea* L.), перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.).

Статистическая обработка данных проводилась общепринятыми методами с использованием табличных процессоров и программ статистического анализа количественных данных при проверке на их соответствие закону нормального распределения. Парный двухвыборочный t-тест для средних подтвердил гипотезу о достоверности различий между содержанием металлов в мягких тканях моллюсков представленных видов из различных водоемов, что указало на наличие отличий между выборками при уровне значимости $p = 0,01$.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ видового состава моллюсков водоемов г. Гомеля показал, что доминирующими являются два вида класса брюхоногих моллюсков (живородка речная и прудовик обыкновенный) и два вида двустворчатых моллюсков (беззубка обыкновенная и перловица обыкновенная).

Данные по среднему содержанию тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков водоемов г. Гомеля приведены в табл. 1, 2, из которых следует, что максимальным уровнем содержания характеризуется марганец (на один-два порядка выше, чем у других металлов), а минимальным – кобальт. Марганец выполняет важные физиологические функции в организме моллюсков: активатор ряда ферментов, участвует в процессах дыхания, биосинтезе нуклеиновых кислот, влияет на минеральный обмен [2]. Высокое содержание марганца в тканях моллюсков, особенно двустворчатых, также характеризует влияние терригенного стока на водные экосистемы [3].

Таблица 1

Среднее содержание (мг/кг сухой массы) тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля и окрестностей

Table 1

Average content (mg/kg dry weight) of heavy metals in soft tissues of mollusks inhabiting water bodies of Gomel and its environs

Место отбора	Параметр	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Городские водоемы	Среднее	0,66	6,32	26,60	247,85	0,11	0,46	0,32
	Мин	0,03	0,51	2,12	24,00	0,02	0,02	0,05
	Макс	3,42	28,60	65,30	1000,00	0,25	2,86	0,82
Старичный комплекс р. Сож	Среднее	0,10	4,00	24,16	489,75	0,06	0,08	0,10
	Мин	0,06	0,54	3,62	60,00	0,03	0,05	0,06
	Макс	0,18	12,60	65,40	1056,00	0,08	0,13	0,18

Высокое содержания в мягких тканях моллюсков характерно также для меди (4,00–6,32 мг/кг) и цинка (24,16–26,60 мг/кг), тогда как концентрации кобальта, хрома, никеля и свинца не превышают 1,00 мг/кг. Следует отметить, что самым высоким уровнем концентрирования в тканях моллюсков отличаются биогенные элементы, для которых доказана важность в осуществлении жизненных функций (марганец, цинк и медь), что значительно ниже содержание такого биогенного элемента, как кобальт (0,06–0,11 мг/кг), и таких элементов, как хром и никель, значение которых в обеспечении жизнедеятельности до конца не изучено [4]. По данным некоторых авторов [3], медь и цинк в тканях моллюсков являются индикаторами хозяйственно-бытового загрязнения, никель – показатель техногенного воздействия. Ряд содержания металлов для брюхоногих и двустворчатых моллюсков выглядит следующим образом: $Mn > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Co$ и $Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > Co$ соответственно. Ряды содержания металлов у моллюсков представленных классов различаются положением металлов, оказывающих токсическое действие на живые организмы – хром, свинец и никель. В двустворках южного Вьетнама, также, как и у пресноводных двустворчатых моллюсков водоемов Беларуси, наибольшая среди всех исследованных элементов концентрации определена для марганца, зафиксированные уровни цинка были высокими относительно свинца, меди и никеля [5]. Так, представленный ряд содержания металлов в мягких тканях черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck $Zn > Mn > Cu > Pb > Co > Ni$ [6] схож с таковым для представителей двустворчатых моллюсков водоемов Гомеля.

Сравнительная характеристика содержания (мг/кг сухой массы) тяжелых металлов в тканях брюхоногих и двустворчатых моллюсков водоемов г. Гомеля

Table 2

Comparative characteristics of the content (mg/kg dry weight) of heavy metals in the tissues of gastropods and bivalve mollusks of water bodies in Gomel

Класс	Параметр	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Брюхоногие	Среднее	0,45	9,76	22,09	78,43	0,10	0,71	0,40
	Мин	0,03	0,51	2,12	24,00	0,02	0,02	0,13
	Макс	1,63	28,60	65,30	195,00	0,25	2,86	0,82
Двустворчатые	Среднее	0,90	2,32	31,87	445,50	0,12	0,18	0,23
	Мин	0,06	0,86	6,84	103,00	0,02	0,04	0,05
	Макс	3,42	4,93	62,50	1000,00	0,22	0,48	0,51

Сопоставление усредненных показателей концентрации металлов в тканях моллюсков в городских водоемах относительно старичного комплекса р. Сож показало, что содержание большинства изученных элементов было высоким в городских водных объектах. Особенно четкие отличия в сторону превышения в городских водоемах определены для свинца, хрома и никеля (превышение в 6,60; 5,75 и 3,20 раза соответственно). Различия по концентрации меди и кобальта не столь существенны и составляют лишь 1,58 и 1,83 раза соответственно. Для цинка не определено значимых отличий содержания в старичном комплексе р. Сож и водных объектах в городской черте. В то же время концентрация марганца в городских водоемах оказалась почти в 2,00 раза ниже, чем в старичном комплексе, что требует дальнейшего изучения. Стоит отметить, что похожие закономерности по содержанию марганца были отмечены и в исследованиях, проводимых на данных водоемах ранее². Полученные данные подтверждают возможность использования старичного комплекса в качестве фонового водоема сравнения при проведении мониторинговых исследований загрязнения моллюсков водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий тяжелыми металлами. Однако в различные временные промежутки концентрация исследуемых соединений металлов в мягких тканях моллюсков старичного комплекса была сравнима с содержанием тяжелых металлов у особей городских водоемов. Поэтому для более точной оценки загрязненности водных экосистем необходимо установление фоновых концентраций в мягких тканях моллюсков с использованием статистического метода.

С целью выявления видов-индикаторов моллюсков для определения загрязнения водоемов тяжелыми металлами была проведена детальная оценка загрязненности мягких тканей изученных видов моллюсков по каждому тяжелому металлу (рис. 1, 2). На видовую специфику аккумуляции металлов моллюсками, а значит, и возможность использования моллюсков для оценки степени загрязнения водных экосистем соединениями металлов указывают различные авторы³ [1–3; 5–8]. Но некоторые виды моллюсков не обладают такой особенностью. Так, устрицы избирательно накапливают в своих тканях высокие концентрации цинка и меди, тогда как мидии не склонны концентрировать в тканях соединения вышеперечисленных металлов [9].

Особую значимость в проведенном анализе имеет изучение концентрации в тканях моллюсков свинца, который является наиболее опасным токсикантом и загрязнителем водоемов [7; 10; 11]. Как следует из рис. 1, максимальным уровнем содержания свинца отличается беззубка, концентрация металла в мягких тканях которой достигает 1,31 мг/кг, что превышает значения, полученные для прудовика (следующего по уровню содержания свинца), в 2,01 раза. Такие результаты были неожиданными, так как в исследованиях, проводимых ранее, высоким уровнем содержания металла отличался прудовик, на втором месте располагалась живородка⁴. Значительное превышение концентрации свинца в тканях беззубки в сравнении с другими видами, а особенно с живородкой и прудовиком, было отмечено практически во всех водоемах города. Одной из причин может быть высокая доступность соединений металла в компонентах водных экосистем для ее особей.

²Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

³Уровень и температура воды в р. Сож по гидропосту г. Гомель сегодня [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/gauge/sozh-gomel> (дата обращения: 16.07.2022).

⁴Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

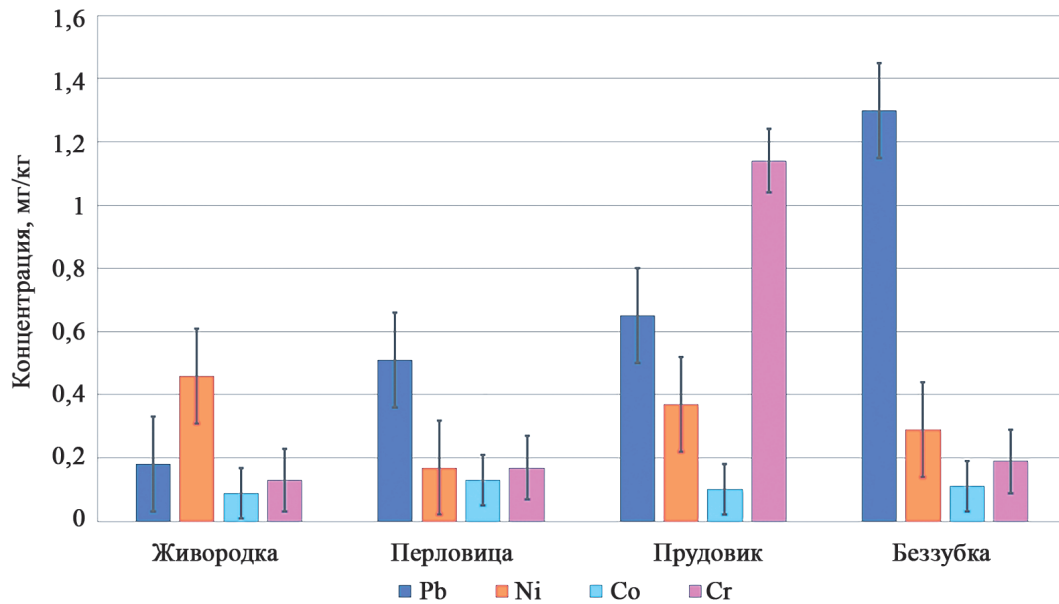


Рис. 1. Содержание свинца, никеля, кобальта и хрома (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 1. The content of lead, nickel, cobalt and chromium (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various types of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Изменение доступности соединений свинца для моллюсков разных видов в абиотических компонентах изучаемых водоемов связано с изменением гидрологического режима и значительным снижением уровня воды в водных экосистемах изучаемой территории. Очевидно, что именно этот вид моллюска в настоящее время наиболее целесообразно использовать в качестве индикаторного при оценке общего загрязнения водоема свинцом. Недостаток этого вида двустворчатого моллюска в том, что он обитает не во всех водоемах изучаемой территории, а если и встречается, то в большей степени, на глубоководной части водоема, что значительно затрудняет отбор проб. Наименьшая концентрация данного металла определена в тканях живородки (0,18 мг/кг), что более чем в 7 раз ниже, по сравнению с показателями беззубки. В то же время содержание других тяжелых металлов в тканях беззубки не отличается столь высокими показателями.

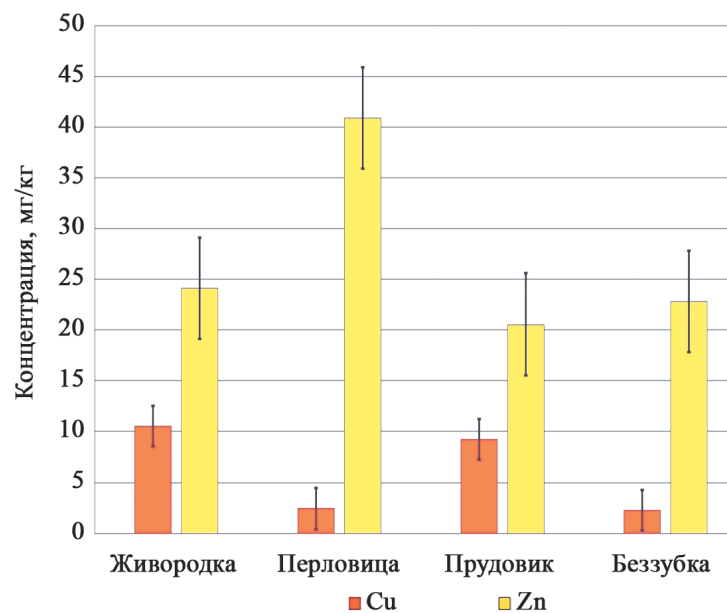


Рис. 2. Содержание меди и цинка (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 2. The content of copper and zinc (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Концентрация никеля и меди имеет наибольшие значения в тканях живородки (рис. 1, 2). Так, содержание меди у живородки достигает 10,52 мг/кг и превышает показатели прудовика, занимающего второе место по уровню концентрации данного металла, на 14 %. Содержание меди, в отличие от свинца, в тканях беззубки, наоборот, имеет минимальные значения (2,23 мг/кг), что в 4,72 раза ниже максимального значения. Однако заметно четкое превышение содержания соединений меди у брюхоногих моллюсков по сравнению с двустворчатыми (табл. 2). По полученным ранее данным живородка активно аккумулировала в тканях медь, свинец и цинк⁵.

По концентрации никеля межвидовые различия у моллюсков выражены в еще меньшей степени (рис. 1). Живородка отличается наибольшим уровнем содержания металла (0,46 мг/кг), который превышает наименьший показатель, определенный у перловицы, в 2,73 раза. Также заметно относительно более высокое содержание данного элемента у брюхоногих по сравнению с двустворчатыми моллюсками (в 1,74 раза), однако различие не столь существенно, как для меди.

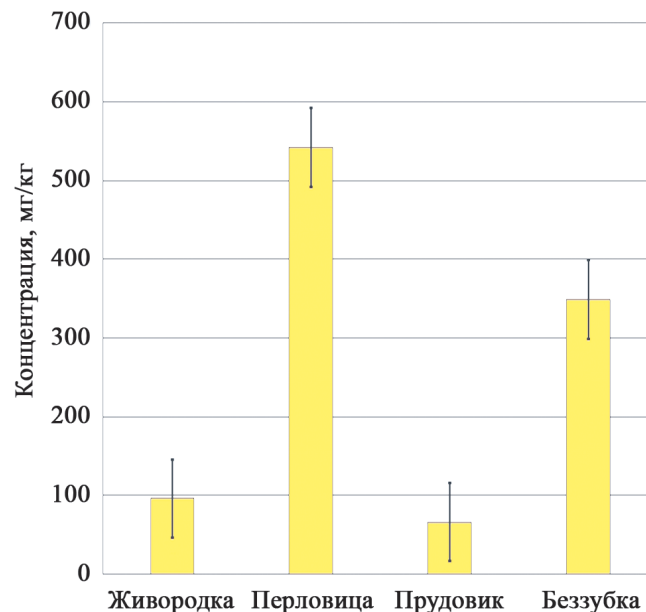


Рис. 3. Содержание марганца (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 3. The content of manganese (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Наиболее значимые биогенные элементы (цинк, марганец и кобальт) максимально концентрируются в тканях перловицы (рис. 2, 3). Так, в отношении цинка следует отметить, что его содержание у перловицы в 2,01 раза выше по сравнению с другими видами, тогда как у живородки, беззубки и прудовика отличается незначительно. В этой связи именно перловицу можно считать индикаторным видом по данному элементу (рис. 2). В исследованиях, проводимых ранее, активным аккумулятором цинка была определена живородка⁶. Пути поступления металлов в ткани брюхоногих и двустворчатых моллюсков различны, и изменения аккумулятивной активности у моллюсков, вероятнее всего, связаны не столько с изменением уровня загрязнения компонентов водных экосистем, как с изменением форм нахождения изучаемых металлов в компонентах водоемов, так и с разной доступностью соединений металлов в абиотических компонентах водоемов. Как известно, в организм двустворчатых моллюсков пища поступает при фильтровании придонных слоев воды, содержащих органоминеральные комплексы тяжелых металлов.

В отношении марганца необходимо отметить весьма значимое превышение его содержания у двустворчатых моллюсков, которое в 5,68 раза выше по сравнению с брюхоногими (табл. 2). При этом, содержание марганца в тканях перловицы (542,00 мг/кг) в 1,55 раза выше показателя другого двустворчатого моллюска – беззубки (349,00 мг/кг), что в 8,12 раза превышает значение, полученное для прудовика, у которого содержание марганца минимально. Полученные данные согласуются с литературными [12], где указано, что содержание марганца у пресноводных двустворок может достигать 5 537,00 мг/кг сухой массы. Аналогичная закономерность была отмечена и в исследованиях, проводимых ранее на данных водоемах: максимальная концентрация элемента зафиксирована для двустворчатых моллюсков, которая

⁵Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

⁶Там же.

практически на порядок выше, чем у брюхоногих⁷. Некоторые исследователи [12; 13] объясняют значительное накопление марганца в тканях высокой фильтрующей способностью двустворчатых моллюсков и значительным загрязнением воды водоемов данным элементом.

Содержание кобальта у различных видов моллюсков варьирует незначительно: различия между наибольшей концентрацией (у перловицы) и наименьшей (у живородки) составляет 1,44 раза (рис. 1). Для кобальта в изучаемых водоемах и ранее отмечалось незначительное варьирование содержания в тканях рассматриваемых видов.

В отношении содержания хрома можно четко выделить прудовика как вида-индикатора загрязнения водоемов данным элементом. Концентрация хрома в мягких тканях прудовика, в среднем, в 9 раз выше, чем у других видов моллюсков (рис. 1). В то же время, у других моллюсков варьирование содержания данного металла незначительно: от 0,13 мг/кг у живородки до 0,19 мг/кг у беззубки. Высокий уровень содержания металла в тканях прудовика отмечался в данных водных экосистемах и ранее⁸, однако таких различий для концентраций хрома у представленных видов моллюсков зафиксировано не было.

На рис. 4–5 представлены результаты определения меди, марганца и никеля в раковинах моллюсков, обитающих в городских водоемах. Содержание свинца, цинка, кобальта и хрома в раковинах было ниже предела их обнаружения. В исследованиях, проводимых сотрудниками Кубанского госуниверситета с морскими мидиями, получены похожие результаты: содержание свинца, кобальта, никеля и хрома в раковинах было ниже предела обнаружения [14]. Однако цинк, медь и марганец были обнаружены в створках устриц в концентрациях, составляющих 0,61; 0,69 и 6,01 мг/кг соответственно. Содержание меди и цинка в раковинах морских двустворок на порядок, а марганца – на два порядка ниже, чем у пресноводных двустворчатых моллюсков изучаемых водоемов. Возможно, на аккумуляцию металлов в раковинах оказывает влияние ионный состав воды.

Установлено, что наибольшая концентрация меди и марганца характерна для раковин прудовика 6,36 и 1036,00 мг/кг (рис. 4, 5).

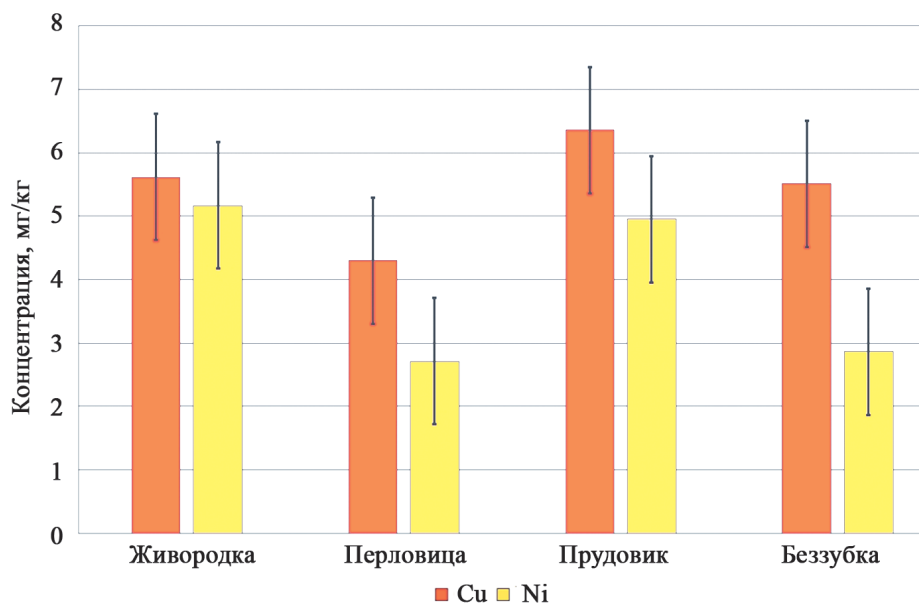


Рис. 4. Содержание меди и никеля (мг/кг сухой массы) в раковинах различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 4. The content of copper and nickel (mg/kg dry weight) in the shells of various species of mollusks inhabiting the water bodies of the city of Gomel

Из рис. 4 следует, что в раковинах прудовика выявлена достаточно высокая концентрация никеля (4,95 мг/кг), но максимальный уровень содержания данного металла обнаружен у живородки (5,17 мг/кг).

Анализ соотношения концентраций «мягкие ткани/раковины» свидетельствует, что имеются значительные различия как между металлами, так и между видами моллюсков по данному показателю (табл. 3).

⁷Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

⁸Там же.

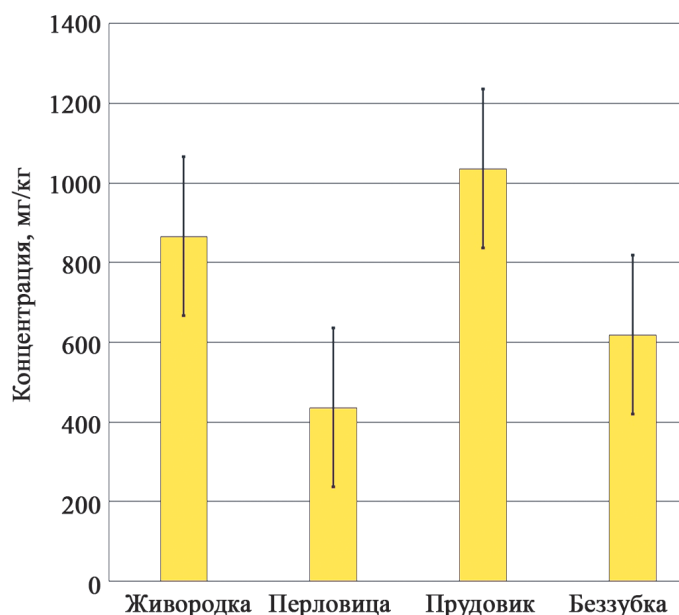


Рис. 5. Содержание марганца (мг/кг сухой массы) в раковинах различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 5. The content of manganese (mg/kg dry weight) in the shells of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Таблица 3

Соотношение концентрации тяжелых металлов в тканях и раковинах моллюсков водоемов г. Гомеля

Table 3

The ratio of the concentration of heavy metals in tissues and shells of mollusks of water bodies in Gomel

Вид моллюска	Отношение «ткань/раковина»		
	Cu	Mn	Ni
Живородка	8,66	0,26	0,54
Прудовик	2,50	0,42	1,80
Брюхоногие, среднее	5,58	0,34	1,17
Беззубка	1,75	3,93	1,25
Перловица	2,58	5,78	0,59
Двустворчатые, среднее	2,17	4,90	0,92
Среднее по всем видам	3,87	2,61	1,05

Таким образом, установлено, что медь преимущественно концентрируется в мягких тканях, где ее концентрация в среднем 3,87 раза выше по сравнению с раковинами. Напротив, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами моллюсков (среднее отношение «ткань/раковина» близко к единице). Противоречивые данные получены для марганца: его содержание в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах в среднем в 4,95 раза, а у брюхоногих моллюсков количество марганца в тканях в 3,11 раза ниже относительно концентрации марганца в раковине.

Для наиболее полного представления об уровне загрязненности водоема тяжелыми металлами необходима оценка интенсивности поступления тяжелых металлов в ткани моллюсков из воды и донных отложений, которая производится с помощью вычисления отношения между содержанием металлов в живых организмах и в абиотических компонентах водоема – донных отложениях и воде.

Уровень поглощения поллютантов водными организмами принято характеризовать «коэффициентом биологического поглощения (КБП)» или «коэффициентом накопления (КН)». Величина коэффициента накопления рассчитывается как отношение содержания элемента в живом организме к таковому в пище, субстрате (среде обитания) [1]. В табл. 4 приведены результаты расчетов коэффициентов биологического поглощения наблюдаемых металлов тканями брюхоногих и двустворчатых моллюсков из воды и донных отложений.

Коэффициенты накопления тяжелых металлов тканями моллюсков по донным отложениям

Table 4

Coefficients of accumulation of heavy metals in mollusc tissues on bottom sediments

Водоем	Коэффициенты накопления						
	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Брюхоногие							
Оз. У-образное	0,040	0,155	0,033	0,109	0,053	0,109	0,025
Оз. Волоотовское	0,007	0,058	0,148	0,189	0,009	0,001	0,018
Оз. Шапор	0,010	0,337	0,334	0,505	0,033	0,007	0,031
Оз. Дедно	0,082	0,630	0,344	0,331	0,120	0,074	0,052
Оз. Володькино	0,019	2,521	0,084	0,092	0,019	0,007	0,055
Р. Сож, ниже города	0,013	0,064	0,126	0,034	0,010	0,003	0,014
Р. Сож, выше города	0,070	0,375	0,275	0,171	0,083	0,028	0,033
Среднее по городским водоемам	0,032	0,740	0,189	0,245	0,047	0,040	0,036
Фоновый водоем (старичный комплекс р. Сож)	0,012	0,281	0,367	0,053	0,029	0,008	0,009
Двустворчатые							
Оз. Шапор	0,012	0,069	0,301	1,502	0,037	0,004	0,023
Оз. Дедно	0,036	0,047	0,477	2,869	0,073	0,004	0,007
Оз. Володькино	0,172	0,595	0,233	0,594	0,038	0,020	0,031
Р. Сож, ниже города	0,236	0,190	0,259	0,626	0,054	0,010	0,042
Р. Сож, выше города	0,018	0,068	0,246	2,364	0,067	0,004	0,007
Среднее по городским водоемам	0,073	0,237	0,337	1,655	0,049	0,009	0,020
Фоновый водоем (старичный комплекс р. Сож)	0,008	0,061	0,147	0,752	0,029	0,005	0,006

Ряд накопления металлов у брюхоногих моллюсков имеет вид: $Zn > Cu > Mn > Co > Pb > Ni > Cr$ и существенно отличается от ряда, составленного по содержанию металлов, представленному в статье ранее. Как и в ряду содержания, так и в ряду накопления биогенные металлы (цинк, медь и марганец) опережают металлы с невыясненной биологической функцией.

У двустворчатых моллюсков получены иные закономерности концентрирования тяжелых металлов из донных отложений: самый высокий коэффициент накопления определен для марганца, он является максимальным среди всех полученных значений (1,655). Изучаемые металлы составляют следующий ряд накопления в порядке убывания: $Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > Co$.

У брюхоногих моллюсков накопление изучаемых металлов в старичном комплексе превышает таковые величины, рассчитанные для городских водоемов, за исключением никеля. Полученные данные подчеркивают необходимость изучения водных экосистем без видимых антропогенных нагрузок и расположенных на значительном удалении от городских агломераций.

В отличие от брюхоногих моллюсков, у двустворчатых определены более высокие K_n всех тяжелых металлов в городских водоемах относительно старичного комплекса.

Выделить водоем с максимальным или минимальным уровнем накопления всех изучаемых металлов даже для одного вида моллюсков сложно. Так, у брюхоногих моллюсков в оз. У-образное рассчитано минимальное значение коэффициента накопления цинка и максимальная величина для накопления хрома. Только в оз. Волоотовское у брюхоногих моллюсков наблюдается минимальное накопление свинца, меди, кобальта и хрома. В оз. Дедно, принимающем загрязненный поверхностный сток, рассчитаны максимальные значения коэффициента накопления у брюхоногих моллюсков для свинца и цинка, у двустворчатых моллюсков – для цинка, никеля и кобальта. Высокий уровень накопления в тканях брюхоногих моллюсков меди и никеля, а у двустворчатых моллюсков – меди и хрома отмечен в оз. Володькино, хотя водоем не испытывает значительной антропогенной нагрузки. Высокий уровень накопления металлов в тканях моллюсков в отдельных водоемах может быть следствием нахождения их соединений в компонентах водоема в биологически доступной форме.

В целом, сравнение величины коэффициента накопления тяжелых металлов у брюхоногих и двустворчатых моллюсков показало отсутствие значимых отличий только по кобальту. Существенно выше у брюхоногих значение коэффициента накопления хрома, никеля и меди. Накопление свинца, марганца и цинка, наоборот, выше у двустворчатых моллюсков.

По полученным средним значениям коэффициента накопления тяжелых металлов из донных отложений брюхоногие моллюски являются деконцентраторами всех элементов ($K_n < 1$). Двустворчатые моллюски являются концентраторами марганца ($K_n > 1$) и деконцентраторами всех остальных элементов ($K_n < 1$).

Заключение

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что для тяжелых металлов установлены значительные различия между их содержанием и накоплением у двустворчатых и брюхоногих моллюсков, так как представители этих классов отличаются друг от друга по ряду физиологических особенностей и типу питания. В частности, установлено более высокое содержание меди, хрома и никеля в тканях брюхоногих моллюсков. При этом наиболее четкие отличия характерны для меди. У хрома определена особая динамика концентрирования в тканях: максимальное содержание характерно для тканей прудовика, у живородки – минимальное. Содержание свинца, цинка, марганца и кобальта выше у двустворчатых моллюсков. Однако, четкие различия можно определить лишь в концентрации марганца и менее выраженные – для кобальта. Таким образом, содержание тяжелых металлов в значительной степени зависит от вида моллюсков. В раковинах моллюсков концентрация свинца, кобальта, хрома и цинка была ниже предела обнаружения.

Наибольшее варьирование концентрации тяжелых металлов от максимального к минимальному определено для хрома. Также значительные колебания показателей установлены для марганца, концентрация которого значительно выше у двустворчатых моллюсков. Существенные отличия в содержании определены для свинца, что, очевидно, говорит о наличии источника загрязнения данным тяжелым металлом отдельных водоемов г. Гомеля. Наименьшее межвидовое варьирование концентраций выявлено для кобальта и цинка.

Медь преимущественно концентрируется в мягких тканях моллюсков, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами. Содержание марганца в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах, у брюхоногих моллюсков отмечена обратная тенденция.

Достаточно сложно выявить среди изученных моллюсков вид, который бы отличался наименьшим накоплением изучаемых тяжелых металлов.

Ряды накопления изучаемых металлов, составленные для брюхоногих и двустворчатых моллюсков, имеют значительные различия, что может определяться различной доступностью металлов в абиотических компонентах водоема для особей разных классов моллюсков.

Выявить наиболее чистый и загрязненный водоемы, используя только содержание металлов в мягких тканях моллюсков и величины коэффициентов накопления металлов в тканях по донным отложениям, сложно, необходимо использовать для этого специальные интегральные показатели загрязнения, учитывающие вклад каждого металла в состояние водной экосистемы. Уровень накопления отдельных металлов в тканях брюхоногих моллюсков в старичном комплексе (контрольный водоем) превышал величины, рассчитанные для городских водоемов, чего не наблюдалось у двустворчатых моллюсков.

Для определения степени загрязнения абиотических компонентов водоемов медью и никелем можно рекомендовать живородку, для определения загрязнения цинком, марганцем и кобальтом – перловицу, для загрязнения хромом – прудовика, свинцом – беззубку.

Библиографические ссылки

1. Никаноров АМ, Жулидов АВ, Покаржевский АД. *Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1991. 311 с.
2. Мур ДжВ, Рамамурти С. *Тяжелые металлы в природных водах*. Москва: Мир; 1987. 288 с.
3. Христофорова НК, Гнетецкий АВ. Содержание тяжелых металлов в долгоживущих митилидах Уссурийского залива Японского моря. *Биология моря*. 2022;1(48):30–37.
4. Добровольский ВВ. *Основы биогеохимии*. Москва: Высшая школа; 1998. 413 с.
5. Донец ММ, Цыганков ВЮ, Кулышова ВИ, Элхури Ж, Боярова МД, Гумовский АН, Гумовская ЮП, Богатов ВВ, Прозорова ЛА, Чернова ЕН, Лысенко ЕВ, Нго КК. Пищевая безопасность двустворчатых моллюсков Южного Вьетнама: хлорорганические соединения и тяжелые металлы как факторы риска для здоровья человека. *Медицинский академический журнал*. 2020;20(2):45–58.
6. Пospelова НВ, Приймак АС, Рябушко В.И. Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021;4:67–80.
7. Ершова ТС, Зайцев ВФ, Чаплыгин ВА. Особенности миграции свинца в экосистеме Каспийского моря. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2021; 4(7):3–22.

8. Холодкевич СВ, Шаров АН, Чуйко ГМ, Кузнецова ТВ, Гапеева МВ, Ложкина РА. Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков. *Водные ресурсы*. 2019;2(46):214–224.
9. Силкин ЮА, Силкина ЕН, Силкин МЮ, Столбов АЯ, Силкина АЮ. Особенности накопления тяжелых металлов в мягких тканях средиземноморской мидии и гигантской устрицы, выращенных в прибрежной зоне юго-восточного Крыма. *Водное хозяйство России*. 2017;4:99–109.
10. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ. *Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси*. Минск: РУП «Минсктиппроект»; 2004. 260 с.
11. Волкова ВИ, Чыонг ВТ. Накопление свинца (Pb) и кадмия (Cd) моллюсками *corbicula sp.* в устьях рек города Хайфона (Вьетнам). *Современные проблемы науки и образования*. 2017;5:356.
12. Брень НВ. Биологический мониторинг и общие закономерности накопления тяжелых металлов пресноводными донными беспозвоночными. *Гидробиологический журнал*. 2008;44(2):96–115.
13. Столяр ОБ, Грубико ВВ, Мыхайлив РЛ, Мишук ЕВ. Влияние условий существования на связывание тяжелых металлов и окислительную деструкцию биомолекул в тканях пресноводного двустворчатого моллюска *Anodonta cygnea*. *Гидробиологический журнал*. 2003;39(6):73–82.
14. Темердашев ЗА, Елецкий ИЮ, Каунова АА, Корпакова ИГ. Определение тяжелых металлов в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck методом ИСП-АЭС. *Аналитика и контроль*. 2017;2(21):116–124.

References

1. Nikanorov AM, Zhulidov AV, Pokarzhevskij AD. *Biomonitoring metallo v presnovodnyh ekosistemah* [Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 311 p. Russian.
2. Mur DzhV, Ramamurti S. *Tyazhelye metally v prirodnyh vodah* [Heavy metals in natural waters]. Moscow: Mir; 1987. 288 p. Russian.
3. Hristoforova NK, Gnetekij AV. *Soderzhanie tyazhelyh metallo v dolgozhivushchih mitilidah ussurijskogo zaliva Yaponskogo morya* [The content of heavy metals in long-living mytilids from Ussuriyskiy bay] *Biologiya morya*. 2022;1(48):30–37. Russian.
4. Dobrovol'skij V.V. *Osnovy biogeohimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow: Vysshaya shkola; 1998. 413 p. Russian.
5. Donec MM, Cygankov VYu, Kul'shova VI, Elhuri Zh, Boyarova MD, Gumovskij AN, Gumovskaya YuP, Bogatov VV, Prozorova LA, Chernova EN, Lysenko EV, Ngo KK. *Pishcheyaya bezopasnost' dvustvorchatykh mollyuskov Yuzhnogo V'etnama: hlororganicheskie soedineniya i tyazhelye metally kak faktory riska dlya zdorov'ya cheloveka* [Food safety of bivalves from the south vietnam: organochlorine compounds and heavy metals as risk factors for human health]. *Medicinskij akademicheskij zhurnal*. 2020;20(2):45–58. Russian.
6. Pospelova NV, Prijmak AS, Ryabushko V.I. *Soderzhanie mikroelementov v myagkikh tkanyah i rakovinah midii Mytilus galloprovincialis, kul'tiviruemoj na vzmor'e g. Sevastopolya* [Chemical Composition of Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morya*. 2021;4:67–80. Russian.
7. Ershova TS, Zajcev VF, Chaplygin VA. *Osobennosti migracii svinca v ekosisteme Kaspijskogo morya* [Features of lead migration in the ecosystem of the Caspian Sea] *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya*. 2021; 4(7):3–22. Russian.
8. Holodkevich SV, Sharov AN, Chujko GM, Kuznecova TV, Gapeeva MV, Lozhkina RA. *Ocenka kachestva presnovodnyh ekosistem po funkcional'nomu sostoyaniyu dvustvorchatykh mollyuskov* [Assessment of the quality of freshwater ecosystems based on the functional condition of bivalved mollusks]. *Vodnye resursy*. 2019;2(46):214–224. Russian.
9. Silkin YuA, Silkina EN, Silkin MYu, Stolbov AYa, Silkina AYu. *Osobennosti nakopleniya tyazhelyh metallo v myagkikh tkanyah sredizemnomorskoj midii i gigantskoj ustricy, vyrashchennyh v pribrezhnoj zone yugo-vostochnogo Kryma* [Features of the accumulation of heavy metals in the soft tissues of Mediterranean mussels and giant oysters grown in the coastal zone of southeastern Crimea]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii*. 2017;4:99–109. Russian.
10. Homich VS, Kakareka SV, Kuharchik TI. *Ekogeohimiya gorodskih landshaftov Belarusi* [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Минск: РУП «Минсктиппроект»; 2004. 260 p. Russian.
11. Volkova VI, Chyong VT. *Nakoplenie svinca (Pb) i kadmiya (Cd) mollyuskami corbicula sp. v ust'yah rek goroda Hajfona (V'etnam)* [accumulation of cadmium (Cd) and lead (Pb) in the mollusc *Corbicula sp* at estuary of Hai Phong city (Vietnam)] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2017;5:356. Russian.
12. Bren' NV. *Biologicheskij monitoring i obshchie zakonmernosti nakopleniya tyazhelyh metallo presnovodnymi donnymi bespozvonochnymi* [Biological monitoring and general patterns of accumulation of heavy metals by freshwater benthic invertebrates]. *Hydrobiological Journal*. 2008;44(2): 96–115. Russian.
13. Stoljar OB, Grubinko VV, Myhajliv RL, et al. *Vliyanie uslovij sushchestvovaniya na svyazyvanie tyazhelyh metallo i oksiditel'nyu destrukciyu biomolekul v tkanyah presnovodnogo dvustvorchatogo mollyuska Anodonta cygnea* [Influence of living conditions on the binding of heavy metals and oxidative destruction of biomolecules in the tissues of the freshwater bivalve mollusk *Anodonta cygnea*]. *Hydrobiological Journal*. 2003;39(6): 73–82. Russian.
14. Temerdashev ZA, Eleckij IYu, Kaunova AA, Korpakova IG. *Opreделение tyazhelyh metallo v midii Mytilus galloprovincialis Lamarck metodom ISP-AES* [Determination of heavy metals in *Mytilus galloprovincialis* Lamarck mussels using the ICP-AES method]. *Аналитика и контроль*. 2017;2(21):116–124. Russian.