

УДК 546.3: 574 + 556 + 564 (476-2Г) + 543.3

Т. В. Макаренко, В. М. Байчоров

**СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В
РАКОВИНАХ И МЯГКИХ ТКАНЯХ МОЛЛЮСКОВ
ВОДОЁМОВ ГОМЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ
ТЕРРИТОРИЙ**

Исследовано содержание тяжёлых металлов в мягких тканях двустворчатых и брюхоногих моллюсков, обитающих в водоёмах и водотоках Гомеля и прилегающих территорий. Установлена достоверная связь их содержания в мягких тканях и абиотических компонентах, степень которой определяется как видоспецифичностью, так и химической природой металла. Показано, что в целях мониторинга общего загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами более целесообразно использовать раковины брюхоногих и двустворчатых моллюсков, а также мягкие ткани прудовика, живородки и перловицы.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, пресноводные моллюски, раковина, мягкие ткани, биомониторинг.

Определение содержания тяжёлых металлов в водоёмах затруднено в силу ряда причин: низкой концентрации в природных водах, недоступной обнаружению многими химическими и физико-химическими методами, наличием высокомолекулярных органических соединений с большим количеством функциональных групп (гуминовых кислот, полипептидов и др.), способных образовывать с металлами устойчивые хелатные соединения, и др. [6]. Кроме того, многие физико-химические методы анализа природных вод требуют сложной и не всегда доступной аппаратуры. Поэтому актуальна разработка быстрых и несложных приёмов определения концентрации тяжёлых металлов в компонентах водных экосистем, в частности методов, использующих в качестве индикаторов биологические объекты, особенно для определения малых количеств загрязняющих веществ [5, 10, 12, 15]. Этот подход был успешно применен при мониторинге начальных стадий загрязнения пресноводных экосистем тяжёлыми металлами [15].

Целью настоящей работы было установление содержания тяжёлых металлов в мягких тканях и раковинах двустворчатых и брюхоногих моллюсков, обитающих в водоёмах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий, включая главную водную артерию города — р. Сож, а также анализ возможности использования отдельных видов в мониторинге загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами.

© Т. В. Макаренко, В. М. Байчоров, 2013

Материал и методика исследований. В качестве объектов исследования использовались моллюски класса брюхоногие (Gastropoda): прудовик обыкновенный (*Limnaea stagnalis* L.), живородка речная (*Viviparus viviparus* L.), катушка окаймленная (*Planorbis planorbis* L.) и класса двустворчатые (Bivalvia): беззубка обыкновенная (*Anodonta cygnea* L.) и перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) [9].

Изучаемые моллюски относятся к разным трофическим группам, что позволяет уменьшить количество ошибок, связанных с видовыми особенностями накопления тяжёлых металлов [12]. Их использование для мониторинга обусловлено повсеместной встречаемостью и большой плотностью популяций, что позволяет получить достаточное количество материала для анализа, а также лёгкостью вылова и определения до вида.

Моллюсков отбирали стандартными методами, хранили и транспортировали в стеклянных или полиэтиленовых ёмкостях, фиксацию проводили ректифицированным этиловым спиртом или глубокой заморозкой [1, 15]. Материал отбирали в апреле — ноябре 2007—2010 гг. [2]. Мягкие ткани отделяли от раковин и обрабатывали отдельно. Пробы для анализа готовили стандартными методами [8] и исследовали на атомно-абсорбционном спектрометре Solaar M6 с пламенной атомизацией. Обследовано 165 проб мягких тканей и 74 — раковин. Статистическую обработку полученных результатов проводили [17] с использованием статистического программного пакета Statistica 5.5 [16]. Достоверность различий содержания тяжёлых металлов в моллюсках оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа [17].

Результаты исследований и их обсуждение

В мягких тканях моллюсков в большом количестве обнаружены металлы, принимающие активное участие в метаболических процессах, протекающих в организме: марганец, цинк и медь, в раковинах — марганец и цинк (табл. 1 и 2). Этот факт находит подтверждение и в других работах [4, 5, 23], в которых были рассмотрены физиологические особенности поглощения тяжёлых металлов водными беспозвоночными: особенно интенсивно в организме могут накапливаться элементы, необходимые для его жизнедеятельности. Однако в условиях загрязнения «не исключена возможность значительного биоконцентрирования металлов, не относящихся к группе биологически активных» [4, 5]. Изучение моллюсков водоёмов Украины показало, что наиболее активно накапливаются марганец, медь, цинк и свинец [5]. Содержание этих металлов, а также никеля в раковинах брюхоногих моллюсков было достоверно выше, чем у двустворчатых, что согласуется с ранее полученными результатами [5, 15].

Согласно литературным данным [4, 5, 10, 11, 14], содержание металлов в раковинах может быть выше, чем в мягких тканях. У исследованных моллюсков концентрация свинца в раковинах была более чем в 3,5 раза выше, чем в мягких тканях (см. табл. 1). Похожее распределение отмечено для марганца у брюхоногих моллюсков и для хрома — у двустворчатых. В то же время в мягких тканях было выше содержание меди, цинка (у всех видов) и мар-

1. Содержание тяжёлых металлов в раковинах моллюсков водоёмов и водотоков г. Гомеля и прилегающих территорий (мг/кг сухого вещества)

Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni	Pb
Gastropoda (<i>n</i> = 38)						
13,13 ± 2,14	46,42 ± 5,11	841,16 ± 81,12	0,70 ± 0,10	4,68 ± 0,73	5,16 ± 0,82	39,94 ± 5,77
Bivalvia (<i>n</i> = 36)						
7,12 ± 1,17	21,74 ± 2,97	611,29 ± 52,34	0,77 ± 0,11	5,11 ± 0,74	4,12 ± 0,69	18,77 ± 4,21

ганца (у двустворчатых). Показано [5], что кобальт интенсивно накапливается в раковинах, результаты же других исследований [11] свидетельствуют о его более высоком содержании в мягких тканях двустворчатых моллюсков. В изучаемых водоёмах достоверных ($p < 0,05$) различий содержания кобальта в мягких тканях и раковинах обнаружено не было. Содержание никеля и кобальта в раковинах моллюсков в Украине было более чем в три раза выше, чем в изучаемых водоёмах, а остальных металлов (данные по хromу отсутствуют) — изменялось в тех же пределах [5].

Результаты исследований позволяют рекомендовать для оценки загрязнения водоёмов Гомеля свинцом раковины всех видов моллюсков, хромом — двустворчатых, марганцем — брюхоногих. Раковины являются более информативным материалом для определения загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами [14, 20], однако многие авторы предлагают для мониторинговых исследований и мягкие ткани [5, 10, 19].

Содержание тяжёлых металлов в организме моллюсков зависит от биологической роли [15], способности организма к аккумуляции сверх физиологической потребности, различных экологических и физиологических факторов [4]. По мнению ряда авторов [5, 10, 21], содержание металлов в мягких тканях моллюсков является видоспецифичным.

Полученные результаты показали, что в мягких тканях брюхоногих достоверно различалось содержание всех металлов (кроме кобальта), двустворчатых — цинка, никеля и свинца. Максимальное содержание меди и цинка отмечено у живородки, кобальта, хрома, никеля и свинца — у прудовика (см. табл. 2). Согласно литературным данным, живородка является наилучшим индикатором загрязнения водоёмов тяжёлыми металлами, так как накапливает их в большом количестве [10, 22]. В наших исследованиях максимальное содержание большинства изученных металлов зарегистрировано у прудовика, возможно, сложились условия, при которых их формы были более доступны для особей данного вида. Вторую позицию по содержанию металлов занимает перловица, а их минимальная концентрация отмечена у катушки. Содержание металлов, за исключением марганца, в тканях беззубки и перловицы было низким. Следует отметить, что концентрация марганца отличалась наибольшими пределами колебаний, её максимум, зафиксированный у двустворчатых, практически на порядок выше, чем у брюхоно-

гих. Это объясняется высокой фильтрующей способностью двустворчатых и значительным загрязнением воды этим металлом [5, 13].

Содержание кобальта в тканях изменялось незначительно по сравнению с другими металлами: различия не превышали трёх раз. В то же время согласно литературным данным [12] концентрация кобальта и кадмия в тканях моллюсков характеризовалась наибольшей вариабельностью.

Содержание большинства тяжёлых металлов у брюхоногих моллюсков в водоёмах Гомеля и прилегающих территорий было выше, чем на нижнем участке р. Дона [3], содержание марганца — более чем в 1,5 раза выше, чем в водохранилищах и лиманах Украины, р. Днепре и дельте Дуная, кобальта, никеля и свинца — ниже, а меди и цинка — приблизительно таким же [5]. Концентрация тяжёлых металлов в моллюсках исследованных водных объектов была значительно (до десяти раз) выше, чем в моллюсках из р. Березины на территории Березинского биосферного заповедника [2].

В исследованных водоёмах встречались отдельные особи, у которых содержание некоторых элементов (медь, марганец, цинк) в несколько раз превышало среднее значение. Этот факт согласуется с данными о наличии таких «супераккумуляторов» в популяциях беззубок и перловиц [5]. Именно поэтому, анализируя видовые особенности аккумуляции металлов моллюсками, необходимо подчеркнуть, что полученные результаты в значительной мере

2. Содержание тяжёлых металлов в мягких тканях моллюсков водоёмов и водотоков г. Гомеля и прилегающих территорий (мг/кг сухой массы)

Виды	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni	Pb
<i>Viviparus viviparus</i> (n = 36)	56,65 ± 5,79	297,46 ± 24,44	221,68 ± 20,96	1,17 ± 0,16	5,14 ± 0,68	6,77 ± 0,73	7,11 ± 0,57
<i>Planorbis planorbis</i> (n = 27)	28,19 ± 3,12	89,19 ± 8,14	297,57 ± 29,23	1,03 ± 0,20	3,04 ± 0,31	4,67 ± 0,59	4,21 ± 0,53
<i>Limnaea stagnalis</i> (n = 36)	45,61 ± 5,11	111,33 ± 13,18	441,58 ± 38,39	1,93 ± 0,17	8,11 ± 0,77	18,24 ± 1,74	10,42 ± 1,68
<i>Anodonta cygnea</i> (n = 27)	16,11 ± 1,71	156,66 ± 11,97	2 511,42 ± 249,42	0,81 ± 0,17	2,53 ± 0,21	4,62 ± 0,42	1,76 ± 0,28
<i>Unio pictorum</i> (n = 39)	17,14 ± 1,88	207,79 ± 13,78	2 676,82 ± 271,16	0,91 ± 0,17	2,74 ± 0,24	2,64 ± 0,22	2,95 ± 3,01

маскируются индивидуальной изменчивостью микроэлементного состава этих гидробионтов.

Реакция беспозвоночных на загрязнение среды тяжёлыми металлами зависит от многих факторов и проявляется по-разному: в изменении численности и биомассы популяций, видового разнообразия, ценотической структуры сообществ [18] и др. В загрязнённых акваториях резко снижается видовое разнообразие беспозвоночных, исчезают ракообразные и некоторые виды моллюсков [5, 7, 10]. За время исследований в изучаемых экосистемах заметно сократилась численность популяций прудовика, а в водоёмах, принимающих поверхностный сток с территории промышленных предприятий, троллейбусного парка и автостоянок, особи данного вида с 2005 г. встречаются единично или отсутствуют. Также резко уменьшилась численность беззубок, причем популяции представлены преимущественно молодыми особями (до трёх лет). По нашим предположениям, в водоёмы стали поступать токсичные для гидробионтов формы металлов, поскольку за период исследований отмечена общая тенденция к снижению их содержания, за исключением летних месяцев. Возможно также влияние вторичного загрязнения, которое возникает при создании условий для десорбции металлов из донных отложений. Эти факты требуют дальнейшего изучения.

Украинские исследователи считают, что наиболее эффективными концентраторами тяжёлых металлов являются двустворчатые (*Anodonta cygnea* и *Unio tumidus*) и брюхоногие (*Viviparus viviparus* и *Limnaea stagnalis*) моллюски [5, 10]. Однако в каждой контролируемой экосистеме очень важно выделить виды, которые могут наиболее ярко отражать изменения уровня загрязнения среды с учётом специфики водоёма [5]. В наших исследованиях концентраторами марганца были двустворчатые моллюски, всех остальных металлов — прудовик и живородка.

Организмы-мониторы должны быть пригодными для количественного определения относительного уровня загрязнения водной среды, корреляция содержания металлов в организме и водной среде должна быть высокой независимо от места отбора проб и условий обитания [5]. Практически во всех исследованных водоёмах получены достоверные значения коэффициента корреляции содержания отдельных металлов в мягких тканях моллюсков и компонентах водных экосистем (табл. 3). Не отмечено достоверных зависимостей содержания металлов в тканях катушки и беззубки (кроме свинца, а для катушки — свинца и хрома) и воде. Наиболее тесные связи содержания металлов в воде и мягких тканях характерны для прудовика и живородки, причём сложно выделить вид, у которого значения коэффициента корреляции максимальны для большинства металлов. Между содержанием хрома в тканях катушки и его концентрацией в воде наблюдается обратная связь, у остальных видов зависимость недостоверна. В работе [13] указывается на сложность установления зависимости между содержанием данного элемента в моллюсках и в воде, что связано со значительным многообразием форм миграции металлов в пресноводных экосистемах, а также его токсичности. При помощи радиоактивных изотопов показано, что моллюски-фильтраторы более интенсивно поглощают тяжёлые металлы из фитопланктона, чем непосредственно из воды [22].

3. Значения коэффициента корреляции содержания тяжёлых металлов в мягких тканях моллюсков и воде (над чертой) и донных отложениях (под чертой)

Виды	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni	Pb
<i>Viviparus viviparus</i> (n = 36)	0,39 *	0,52 *	-0,38 *	0,21	0,28	0,21	0,65 *
	0,76 *	0,52 *	-0,38 *	0,42 *	0,25	0,42 *	0,71 *
<i>Planorbis planorbis</i> (n = 27)	0,29	0,03	-0,43 *	0,15	-0,53 *	0,16	0,80 *
	0,25	0,19	-0,36 *	-0,19	-0,31	0,15	0,12
<i>Limnaea stagnalis</i> (n = 36)	0,52 *	0,36 *	-0,38 *	0,10	-0,21	-0,19	0,51 *
	0,43 *	-0,20	-0,40 *	0,27	-0,11	0,36 *	0,57 *
<i>Anodonta cygnea</i> (n = 27)	0,16	0,03	-0,50 *	0,09	0,15	-0,11	0,75 *
	0,52 *	0,38 *	-0,50 *	0,11	0,40 *	0,26	0,45 *
<i>Unio pictorum</i> (n = 39)	0,39 *	0,31 *	-0,41 *	-0,23	0,06	-0,01	0,35 *
	0,75 *	0,68 *	-0,34 *	-0,37 *	0,86 *	0,92 *	0,83 *

* Уровень значимости $p < 0,05$.

Связь концентрации тяжёлых металлов в тканях моллюсков и в донных отложениях более ярко выражена, чем в водных массах, что отмечают и другие исследователи [5, 12]. Металлы в организм большинства видов поступают преимущественно либо из придонных слоёв воды, либо из органической фракции донных отложений (вещество донных осадков неизбежно поглощается моллюсками-фильтраторами при ресуспензии отложений) [12, 11, 22]. Основная часть тяжёлых металлов попадает в организм моллюсков с пищей, а илистая фракция донных отложений формируется продуктами разложения фитопланктона. Отмечена обратная связь содержания марганца в тканях моллюсков и донных отложениях (как и в воде). Высока вероятность того, что основной источник этого металла — взвешенное вещество, а повышение его содержания в воде и донных отложениях блокирует поступление в организм моллюсков. У прудовика значимые зависимости рассчитаны только для меди, никеля и свинца. Максимальные значения коэффициента корреляции характерны для живородки и перловицы, а содержание металлов в тканях катушки не зависит от концентрации в абиотических компонентах. Учитывая фильтрующую активность беззубки, можно было ожидать высокую степень связи содержания металлов в мягких тканях этого вида и донных отложениях, однако она была ниже, чем у живородки. Установленная разнонаправленность связи содержания металлов в теле моллюсков и абиотических компонентах не отрицает наличие такой связи.

Заключение

В тканях моллюсков в изучаемых водоёмах содержание металлов в 1,5—21,0 раза выше, чем в слабозагрязнённых водоёмах Беларуси и России.

В максимальной степени в раковинах всех видов моллюсков накапливается свинец, в мягких тканях — медь и цинк. Содержание кобальта в мягких тканях и

раковинах достоверно не различалось. Накопление хрома, никеля и марганца видоспецифично.

Наибольшей способностью к накоплению металлов характеризуются прудовик и живородка, что даёт возможность использовать их для мониторинга общего загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами. Наименьшее содержание отмечено у беззубки.

Установлена значимая корреляционная связь содержания свинца, меди и цинка в мягких тканях моллюсков и абиотических компонентах, для донных отложений она более выражена, чем для водных масс. Наиболее тесные связи содержания металлов в воде и мягких тканях характерны для прудовика и живородки, в донных отложениях и мягких тканях — для перловицы и живородки.

**

Показано, що у молюсках з водойм і водотоків м. Гомеля та прилеглих територій вміст важких металів у 1,5—21,0 разу вищий, ніж у молюсках слабкозабруднених водойм Росії та Білорусі. Основними забруднюючими речовинами м'яких тканин двостулкових молюсків були нікель, свинець, хром і марганець. Найбільший вміст практично всіх металів відмічений у ставковика та живородки, найменший — у беззубки. Показано достовірний зв'язок між вмістом металів у м'яких тканинах молюсків і абиотичних компонентах екосистем. Для моніторингу загального забруднення екосистеми важкими металами доцільно використовувати м'які тканини та черепашки ставковика, живородки та перлівниці.

**

*Metal content in the soft tissues of mollusks of the water bodies of the town of the Gomel and adjacent territories was shown to be 1.5 — 21.0 times higher than in the slightly polluted reservoirs of Belarus and Russia. Nickel, lead, chromium and manganese are the main pollutants of the bivalve mollusks' soft tissues. Maximal content of the considered metals was noted in *Limnaea stagnalis* and *Viviparus viviparus*, minimum — in *Anodonta cygnea*. The results showed a reliable correlation between heavy metals content in the soft tissues of mollusks and abiotic components. For the monitoring purposes of total pollution of the aquatic ecosystems by heavy metals use of *Limnaea stagnalis*, *Viviparus viviparus*, and *Unio pictorum* is more preferable.*

**

1. Абакумов В. А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 240 с.
2. Байчоров В. М., Тищиков Г. М., Рощина Н. Н. Экологические риски и оценка состояния водотоков Беларуси. — Минск: Беларус. наука, 2006. — 118 с.
3. Бессонов О. А., Белова С. Л., Боголазкин Д. И. и др. Биохимический цикл тяжёлых металлов в экосистеме Нижнего Дона. — Ростов-н/Д: Изд-во Ростов. ун-та, 1991. — 112 с.
4. Брень Н. В. Использование беспозвоночных для мониторинга загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами // Гидробиол. журн. — 1999. — Т. 35, № 4. — С. 75—88.

5. Брень Н. В. Биологический мониторинг и общие закономерности накопления тяжёлых металлов пресноводными донными беспозвоночными // Там же. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 96—115.
6. Бреховских В. Ф., Кочарян А. Г., Сафронова К. И. Влияние изменения антропогенной нагрузки на гидрохимический и гидробиологический режимы Иваньковского водохранилища // Вод. ресурсы. — 2002. — Т. 29, № 1. — С. 85—91.
7. Евтушенко Н. Ю., Кузьменко М. И., Сиренко Л. А. и др. Гидроэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. — Киев: Наук. думка, 1992. — 267 с.
8. Ермаченко Л. А., Ермаченко В. М. Атомно-адсорбционный анализ в санитарно-гигиенических исследованиях. — М.: Чувашия, 1997. — 89 с.
9. Жадун В. И. Моллюски пресных и солоноватых вод СССР. — Л.: Изд-во АН СССР, 1962. — 376 с.
10. Киричук Г. Е. Особенности накопления ионов тяжёлых металлов в организме пресноводных моллюсков // Гидробиол. журн. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 99—80.
11. Лукашев Д. В. Влияние автомагистрали Киев — Одесса на загрязнение р. Южный Буг тяжёлыми металлами // Вод. ресурсы. — 2006. — Т. 33, № 3. — С. 363—366.
12. Лукашев Д. В. Мониторинг загрязнения тяжёлыми металлами экосистемы р. Днепр в пределах г. Киева с помощью пресноводных моллюсков // Гидробиол. журн. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 86—98.
13. Лукашев Д. В. Сезонная динамика накопления марганца в годичных приростах раковин *Unio tumidus* (Bivalvia: Unionidae) // Там же. — № 6. — С. 91—99.
14. Лукашев Д. В. Использование раковин *Dreissena bugensis* для мониторинга загрязнения тяжёлыми металлами экосистемы реки Днепр в районе Киева // Экол. химия. — 2006. — № 15 (3). — С. 186—195.
15. Никаноров А. М., Жулигов А. В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 311 с.
16. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. — М.: МедиаСфера, 2002. — 312 с.
17. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика. — Минск: Вышэйш. шк., 1973. — 320 с.
18. Ялынская Н. С., Олексив И. Т., Думыч О. Я., Егынак О. П. Мера разнообразия, сложности и устойчивости сообществ зоопланктона и зообентоса прудов // Наук. зап. Терноп. ун-ту. Сер. Біологія. Спец. вип. Гідроекологія. — 2001. — № 3 (14). — С.171—172.
19. Kwan K. M., Chan H. M., Lafontaine Y. Metal contamination in zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) along the St. Lawrence River // Environ. Monitor. Assess. — 2003. — Vol. 88, N 3. — P. 193—219.
20. Foster P., Cravo A. Minor elements and trace metals in the shells of marine gastropods from a shore in tropical East Africa // Water, Air, and Soil pollution. — 2003. — Vol. 145, N 2. — P. 53—65.

21. *Jurkiewicz-Karnkowska E., Krolak E.* Heavy metal concentrations in mollusks from the Zegrzynski reservoir and the rivers supplying it // *Pol. Arch. Hydrobiol.* — 1996. — Vol. 43, N 2. — P. 355—346.
22. *Roditi H. A., Fisher N. S.* Rates and routes of trace element uptake in zebra mussels // *Limnol. Oceanogr.* — 1999. — Vol. 44, N 7. — P. 1730—1749.
23. *Wright D. A.* Heavy metal accumulation by aquatic invertebrates // *Annu. Appl. Biol.* — 1978. — Vol. 35, N 3. — P. 331—394.

Гомельский государственный
университет, Беларусь
Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по биоресурсам, Минск, Беларусь

Поступила 28.07.13