

УДК 574.21:594.1:546.06

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МЯГКИХ ТКАНЯХ ТРЕХ ВИДОВ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ИЗ РЕКИ СУНГАРИ ВБЛИЗИ Г. ХАРБИНА (КИТАЙ)

© 2020 г. В. В. Зарыхта<sup>1</sup>, Z. H. Zhang<sup>1,\*</sup>, Т. В. Кузнецова<sup>2</sup>, П. В. Озерский<sup>3</sup>, Y. J. Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, No. 73, Huanghe Road, Nangang District, Harbin 150090, China

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, ул. Корпусная, д. 18, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, д. 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

\*e-mail: hitzjh@hit.edu.cn

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

После доработки 11.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Для индикации уровня антропогенного загрязнения акватории реки Сунгари вблизи г. Харбин (Китай) были определены концентрации тяжелых металлов (ТМ) в воде, донных отложениях и в мягких тканях местных двустворчатых моллюсков. Полученные результаты показали, что концентрации шести тяжелых металлов (Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) в воде находились в диапазоне от 0.001 до 0.007 мг/л, в то время как в донных отложениях эти значения варьировали от 0.07 до 5617.13 мг/кг. Разные виды двустворчатых моллюсков из исследуемого участка, подверженного сильному антропогенному загрязнению, демонстрировали различные показатели накопления тяжелых металлов в их мягких тканях. Коэффициенты биоаккумуляции (BCF) в моллюсках были рассчитаны для каждого металла и достоверно отличались для разных тканей (жабры и гепатопанкреас). Полученные результаты исследований подтвердили межвидовые различия в накоплении металлов в тканях изучаемых местных моллюсков. Такого рода исследования могут быть полезными в сравнительной физиологии моллюсков, а также при выборе оптимальных организмов-индикаторов для оценки антропогенного загрязнения природных водоемов Северного Китая и Российского Дальнего Востока.

*Ключевые слова:* накопление тяжелых металлов в тканях, двустворчатые моллюски, биоиндикаторы, донные отложения, Северный Китай

DOI: 10.31857/S0044452920020114

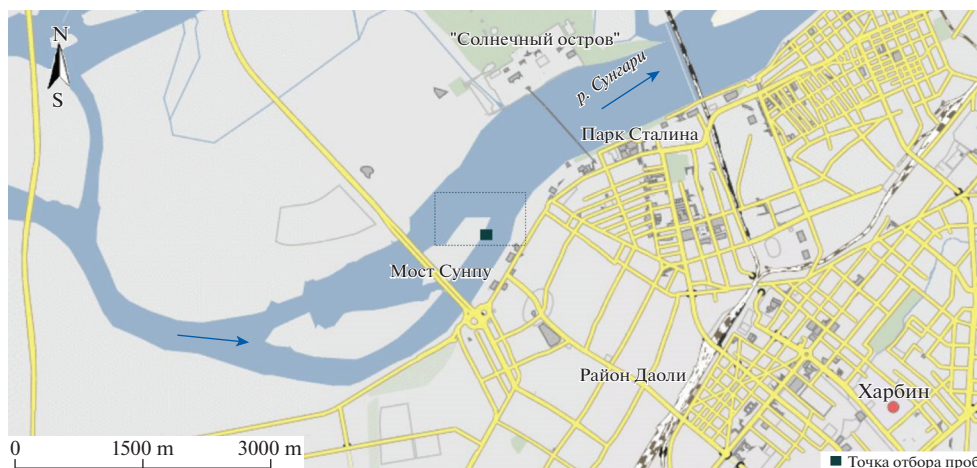
### ВВЕДЕНИЕ

Экосистемы многих внутренних рек Китая загрязнены в результате быстрой индустриализации и урбанизации [1, 2]. Например, только в Харбинском регионе приблизительно 450 миллионов тонн сточных вод ежегодно сбрасываются в реку Сунгари, что создает опасность ее водным экосистемам [3]. Присутствие тяжелых металлов (ТМ) в сточных водах промышленных предприятий г. Харбина представляет особую опасность для биоты [4]. ТМ накапливаются в воде, в донных отложениях, а также в различных тканях животных. Актуальность изучения содержания ТМ в донных отложениях и в тканях пресноводных двустворчатых моллюсков заключается в их особой токсичности и способности накапливаться.

В экотоксикологическом отношении элементы Hg, Cd, Cu и Zn являются самыми опасными для

живых организмов [5, 6]. Даже сравнительно небольшие концентрации этих металлов могут повлиять на физиолого-биохимические показатели, например, на гидролиз углеводных компонентов, ферментные показатели состояния оксидативного стресса и т.д. [7, 8]. Под влиянием ТМ ослабляется иммунитет, снижаются интенсивность дыхания, активность пищеварительных ферментов и эффективность ассимиляции пищи, замедляется рост тела, увеличивается смертность, уменьшается плодовитость [7–11]. Следует заметить, что эти металлы представляет потенциальную опасность также и для здоровья человека как конечного звена трофической цепи.

Исследуемый в работе участок реки Сунгари расположен в провинции Хэйлуцзян на территории северо-восточной части Китая. Сунгари протекает с юга-запада на северо-восток вблизи цен-



**Рис. 1.** Место отбора образцов воды, донных отложений и двустворчатых моллюсков в реке Сунгари вблизи города Харбин (Северо-Восточный Китай).

тра города Харбин и имеет протяженность в границах города около 50 км. Сунгари – равнинная река с песчаным дном и извилистым руслом. Ширина фарватера от 400 до 800 м, глубина от 2 до 12 м. В донных отложениях реки Сунгари вблизи г. Харбин, по сравнению с другими реками и озерами Северного Китая, в особенно высоких концентрациях содержатся Pb, Zn и Ni, отмечены также высокие значения для Cd и As [6, 12].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка степени антропогенного загрязнения водной экосистемы реки Сунгари определялась в данной работе по концентрации типичных для этого региона тяжелых металлов в воде и донных отложениях, а также в мягких тканях местных видов пресноводных двустворчатых моллюсков из семейства Unionidae отряда Unionida (*Unio douglasiae*, *Anodonta woodiana* и *Cristaria plicata*). Преимущественное значение отдавали сравнительному изучению накопления ТМ в тканях моллюсков. После измерения возраста и размеров отобранные группы моллюсков подвергались вскрытию для проведения анализа содержания ТМ в их тканях.

*Место отбора воды, донных отложений и двустворчатых моллюсков.* Образцы воды отбирали с помощью пластиковой емкости на глубине 10–20 см ниже поверхности воды. Двустворчатых моллюсков отбирали в реке Сунгари с помощью рыболовных драг, с поверхности их раковин получали образцы донных отложений. Отбор всех образцов производили в конце сентября и начале октября 2016 г. дважды (рис. 1). Количество донных отложений и проб воды было одинаковым. Все образцы были перенесены в лабораторию в полиэтиленовых пакетах, а затем хранились замороженными при  $-20^{\circ}\text{C}$  до проведения анализа.

Пробоподготовку воды проводили следующим способом: к 10 мл образца добавляли 2 мл азотной кислоты (ЧДА, Tianjin Fengchuan Chemical Reagent Technologies Co., Ltd., Китай). Пробу нагревали до  $100^{\circ}\text{C}$  и оставляли на выпаривание еще на 10 мин. Далее повышали температуру до  $120^{\circ}\text{C}$  и выпаривали до объема 10 мл.

Для анализа донных отложений образцы просушивали в духовом шкафу при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  в течение 6 ч, затем просеивали через пластиковое сито диаметром 0.75 мм. Навеску (около 0.5 г) оставляли на ночь с добавлением 10 мл азотной кислоты. Далее раствор нагревали до  $70^{\circ}\text{C}$  в течение 8 ч остужали, добавляли 4 мл пероксида водорода (30%) и отправляли на анализ.

Концентрации таких тяжелых металлов как Mn, Zn, Pb, Cu, Cr, и Cd в образцах воды и в донных отложениях определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, США). Результаты представлены в мг/кг.

*Отбор двустворчатых моллюсков.* Моллюсков собирали драгированием в среднем течении реки Сунгари вблизи г. Харбина (координаты места сбора –  $45.77\text{ N}$ ,  $126.59\text{ E}$ ). Длина раковины моллюсков была измерена с помощью электронного цифрового штангенциркуля. Возраст был определен визуально по кольцам зимней остановки роста раковины для каждого моллюска индивидуально. Размерно-возрастные характеристики двустворчатых моллюсков из р. Сунгари, представлены в табл. 1.

*Подготовка образцов тканей для анализа концентрации тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков.* Вскрытие и препарирование тканей моллюсков (гепатопанкреас и жабры) проводили сразу после доставки в лабораторию. Образцы хранились в холодильнике при  $-20^{\circ}\text{C}$ . Мягкие ткани моллюсков исследовали методом “мокрого” озоления [13].

**Таблица 1.** Размерно-возрастные характеристики изучаемых моллюсков

Вид	Количество, шт.	Длина раковины, см	Возраст
<i>Anodonta woodiana</i>	10	9–13	5–6
<i>Cristaria plicata</i>	10	16–20	5–7
<i>Unio douglasiae</i>	10	5.5–7.5	5

Содержание некоторых ТМ, таких как Cu, Cd, Pb и Zn, в мягких тканях моллюсков измеряли с помощью оптического эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 8300 (ICP-OES PerkinElmer, Optima 8300, США). Результаты представлены в мг/кг сырого веса. Фактор биоаккумуляции (BCF) для каждого из металлов был рассчитан для каждого из изучаемых видов моллюсков по формуле [14]:

$$BCF = \frac{C_{\text{биота}}}{C_{\text{вода}}},$$

где  $C_{\text{биота}}$  – концентрация металла в мягких тканях двустворчатого моллюска (мг/кг, при “мокром” озолении) и  $C_{\text{вода}}$  – концентрация металлов в воде (мкг/л). Согласно работе Варола и Санбула (2018) [14] [6], металл считается не биоаккумулятивным, если его коэффициент BCF меньше 1000. Если коэффициент принимает значения от 1000 до 5000, то металл считается биоаккумулятивным, а в случае превышения 5000 – очень биоаккумулятивным.

**Статистический анализ.** Все данные по химическому анализу тканей были представлены как среднее значение и стандартная ошибка ( $M \pm SE$ ). Проверки нормальности распределения данных проводили с помощью критерия Шапиро–Уилка (нулевая гипотеза отвергалась при  $p < 0.05$ ). Для сравнения данных по тяжелым металлам в мягких тканях двустворчатых моллюсков был применен U-критерий Манна–Уитни, различия считались статистически значимыми при  $p < 0.05$  (использовалось программное обеспечение Statistica for Windows). Межгрупповые различия содержания тяжелых металлов у моллюсков были оценены с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA с использованием программного обеспечения OriginPro 9.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены средние концентрации ТМ в пробах донных отложений для исследуемого участка реки Сунгари вблизи Харбина, которые имеют следующую последовательность:  $Zn > Pb > Cr > Mn > Cu > Cd$ . Для всех измеряемых металлов концентрации в донных отложениях были выше, чем в воде.

Сходные результаты приведены в работе других авторов [15], которые указывали, что накопление ТМ в донных отложениях может оказывать неблагоприятное воздействие на состояние бентосных животных. 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 [7].

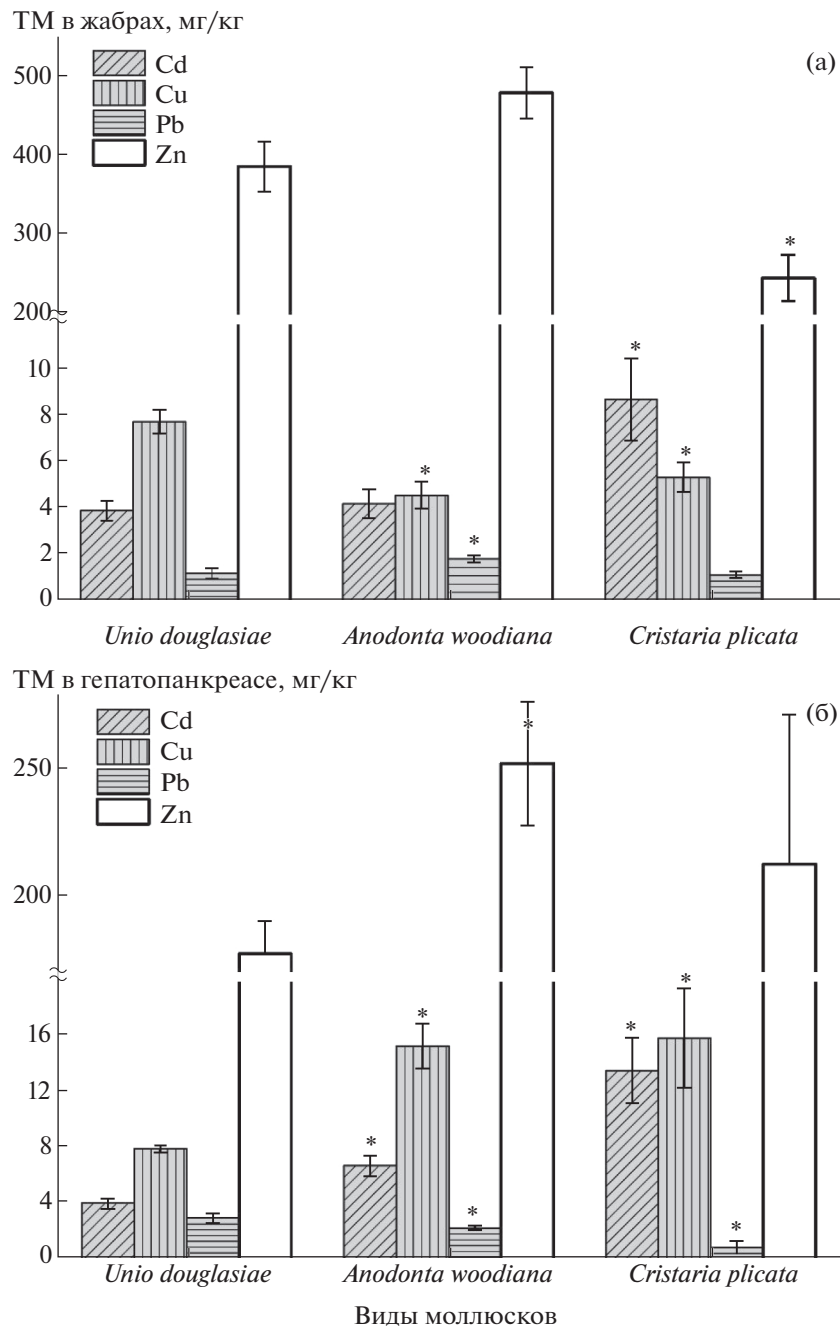
**Биоаккумуляция ТМ в тканях двустворчатых моллюсков.** Содержание ТМ в мягких тканях двустворчатых моллюсков представлено в виде гистограмм (рис. 2а, 2б).

Обобщенные данные по содержанию ТМ в двух разных тканях (жабры и гепатопанкреас) представлены в табл. 3.

**В жабрах** изученных видов моллюсков были выявлены следующие показатели ТМ. Наименьшая концентрация Cd в жабрах наблюдалась у *U. douglasiae* (см. табл. 3), в то время как для *A. woodiana* этот показатель был ниже. Существенные различия от *U. douglasiae* по содержанию Cd в жабрах были обнаружены у *C. plicata* ( $p < 0.05$ ). Концентрация Cu в жабрах *U. douglasiae* была выше, чем у других двух видов – *A. woodiana* и *C. plicata*. По содержанию Pb в жабрах между *U. douglasiae* и *C. plicata* не было обнаружено статистически значимых различий. Но в жабрах *A. woodiana* концентрация Pb была статистически значимо ниже, чем в жабрах *U. douglasiae* ( $p \leq 0.05$ ). Наиболее высокая концентрация, по сравнению с другими определяемыми металлами, была обнаружена в жабрах для такого металла, как Zn. Так, у *A. woodiana* отмечали наибольшую концентрацию (480.92 мг/кг). Наименьшее содержание Zn в жабрах было обнаружено у *C. plicata*, что статистически значимо отличалось от такого у *U. douglasiae* (см. табл. 3). Градация по содержанию ТМ у исследуемых моллюсков была представлена в следующем виде:  $Zn > Cu > Cd > Pb$

**Таблица 2.** Концентрация тяжелых металлов в донных отложениях и в воде реки Сунгари вблизи г. Харбина

	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
Донные отложения (мг/кг)	0.07 ± 0.03	6.57 ± 0.80	3.95 ± 0.13	5.37 ± 0.54	21.93 ± 2.65	5617.13 ± 562.92
Вода (мг/л)	0.001 (±0)	0.007 (±0.002)	0.007 (±0.002)	0.033 (±0)	0.002 (±0)	0.007 (±0.002)
Стандарты показателей поверхностных вод для Китая	≤0.01	≤0.05	≤1.0	≤0.1	≤0.05	≤1.0



**Рис. 2.** Концентрация ТМ в жабрах (а) и гепатопанкреасе (б) в местных моллюсках реки Сунгари рядом с Харбином. \* – указывает на достоверные различия (*U*-критерий Манна–Уитни,  $p \leq 0.05$ ) с видом *Unio douglasiae*.

(*A. woodiana*),  $Zn > Cd > Cu > Pb$  (*C. plicata*),  $Zn > Cu > Cd > Pb$  (*U. douglasiae*).

**В гепатопанкреасе** изученных видов моллюсков были выявлены следующие показатели ТМ.

По Cd наименьшее значение было получено для *U. douglasiae* (табл. 3). У *A. woodiana* и *C. plicata* эти показатели были статистически значимо выше, чем у *U. douglasiae* (*U*-критерий Манна–Уитни,  $p < 0.05$ ). По содержанию Cu в гепатопанкреасе

*A. woodiana* и *C. plicata* между собой не отличались, но статистически значимо отличались от *U. douglasiae*. Наименьшая концентрация Pb была выявлена у *C. plicata* (0.86 мг/кг), что статистически значимо отличалось от таковой в гепатопанкреасе *U. douglasiae* и *A. woodiana* ( $p < 0.05$ ). Из всех металлов преимущественное накопление в гепатопанкреасе, как и в жабрах, было выявлено для Zn. Наименьшие концентрации некоторых ТМ были обнаружены у *U. douglasiae*, поэтому этот вид был принят в

**Таблица 3.** Концентрация тяжелых металлов ( $M \pm SE$ , мг/кг, в.в.) в гепатопанкреасе и жабрах двустворчатых моллюсков из реки Сунгари вблизи г. Харбин (Китай)

Вид	Cd		Cu		Pb		Zn	
	гепато-панкреас	жабры	гепато-панкреас	жабры	гепато-панкреас	жабры	гепато-панкреас	жабры
<i>Anodonta woodiana</i>	6.75* ( $\pm 0.77$ )	4.24 ( $\pm 0.62$ )	15.39* ( $\pm 1.64$ )	4.60* ( $\pm 0.6$ )	2.25* ( $\pm 0.14$ )	1.85* ( $\pm 0.15$ )	252.82* ( $\pm 24.54$ )	480.92 ( $\pm 32.88$ )
<i>Cristaria plicata</i>	13.62* ( $\pm 2.4$ )	8.76* ( $\pm 1.79$ )	15.95* ( $\pm 3.59$ )	5.38* ( $\pm 0.66$ )	0.86* ( $\pm 0.44$ )	1.16 ( $\pm 0.15$ )	213.02 ( $\pm 59.44$ )	246.61* ( $\pm 29.48$ )
<i>Unio douglasiae</i>	4.05 ( $\pm 0.38$ )	3.94 ( $\pm 0.43$ )	7.97 ( $\pm 0.28$ )	7.79 ( $\pm 0.5$ )	2.98 ( $\pm 0.34$ )	1.23 ( $\pm 0.21$ )	177.41 ( $\pm 12.65$ )	387.65 ( $\pm 32$ )

\* – Отмечены достоверные отличия ( $U$ -критерий Манна–Уитни,  $p < 0.05$ ) от *Unio douglasiae*.

**Таблица 4.** Межгрупповые различия в содержании тяжелых металлов у двустворчатых моллюсков на основе ANOVA (One-way),  $p < 0.05$ 

Мягкие ткани исследуемых моллюсков	Металл	Группы	Сумма квадратов	df	Среднее значение квадратов	F	p
Жабры	Cd	Между группами	145.79	2	72.89	5.82	0.008
	Cu	Между группами	55.26	2	27.63	7.99	0.002
	Pb	Между группами	2.87	2	1.44	4.95	0.015
	Zn	Между группами	278322	2	139161	14	0.000
Гепатопанкреас	Cd	Между группами	487.43	2	243.71	11.21	0.000
	Cu	Между группами	396.62	2	198.31	3.80	0.035
	Pb	Между группами	23.26	2	11.63	10.64	0.000
	Zn	Между группами	28466.30	2	14233.15	0.99	0.383

качестве референтного. По накоплению Zn моллюски *A. woodiana* достоверно отличались от референтного вида ( $p < 0.05$ ). Градация по содержанию всех изученных ТМ в гепатопанкреасе оказалась одинаковой для всех трех исследованных видов и может быть представлена в следующем виде:  $Zn > Cu > Cd > Pb$ .

Накопление тяжелых металлов в различных органах двустворчатых моллюсков зависит от многих факторов: тип питания, сезон, размеры и возраст животного и т.д. При этом отмечают, что моллюски могут регулировать содержание в организме таких металлов, как Cu и Zn (биогенные элементы), но не Cd [7, 16].

Все средние значения концентрации металлов, за исключением Zn в гепатопанкреасе, показали статистически значимые различия между моллюсками (ANOVA,  $p < 0.05$ ) (табл. 4). Наибольшие различия между видами были отмечены для Cu и Zn в жабрах, а также для Cd и Pb – в гепатопанкреасе.

В целом отмечалось, что Cu и Cd накапливались больше в гепатопанкреасе, чем в жабрах. Ранее преимущественное накопление Cu и Cd в гепатопанкреасе также отмечалось для морского дву-

створчатого моллюска *Laternula elliptica* [17]. Механизмы выведения тяжелых металлов из организма имеют различный характер у близкородственных видов. Так, например, 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* это связывание происходит на уровне мембранных структур [18].

Известно [3], что в разных органах одного и того же вида моллюсков накопление ТМ может достоверно различаться. Среди исследованных металлов более низкое значение накопления было обнаружено для Pb, а самое высокое – для Zn. Содержание Zn в гепатопанкреасе *A. woodiana* превышало референтные показатели на 45.8%, а в жабрах – на 52.6%. Было показано, что в жабрах происходит большее накопление Zn, чем в гепатопанкреасе. Как и в работе [17] самые высокие значения биоаккумуляции ТМ у пресноводных моллюсков были отмечены в жабрах, а самые низкие значения – в ноге. Некоторые ТМ, в частности, Zn, Pb и Cd, накапливаются в жабрах моллюсков в большей степени, чем в висцеральных органах [18, 19], из чего делался вывод о том, что содержание этих металлов

**Таблица 5.** Коэффициент биоаккумуляции тяжелых металлов ( $M \pm SE$ ) в тканях исследуемых моллюсков

Мягкие ткани	Вид моллюска	BCF			
		Cd	Cu	Pb	Zn
Гепатопанкреас	<i>Unio douglasiae</i>	4048 ( $\pm 382.82$ )	1138.71 ( $\pm 39.92$ )	1490 ( $\pm 171.64$ )	25343.71 ( $\pm 1807.12$ )
	<i>Anodonta woodiana</i>	6749 ( $\pm 771.96$ )	2197.86 ( $\pm 234.32$ )	1127 ( $\pm 68.53$ )	36117.29 ( $\pm 3505.86$ )
	<i>Cristaria plicata</i>	13623 ( $\pm 2403.51$ )	2278.86 ( $\pm 513.18$ )	429 ( $\pm 218.64$ )	30431.57 ( $\pm 8492.03$ )
Жабры	<i>Unio douglasiae</i>	3935 ( $\pm 425.36$ )	1112.14 ( $\pm 71.08$ )	612.5 ( $\pm 104.19$ )	55379.14 ( $\pm 4571.62$ )
	<i>Anodonta woodiana</i>	4237 ( $\pm 618.31$ )	656.71 ( $\pm 85.68$ )	923 ( $\pm 73.85$ )	68703.29 ( $\pm 4697.5$ )
	<i>Cristaria plicata</i>	8755 ( $\pm 1787.81$ )	767.86 ( $\pm 93.73$ )	579.5 ( $\pm 73.92$ )	35229.71 ( $\pm 4211.24$ )

в жабрах моллюсков может являться надежным биомаркером загрязнения природных поверхностных вод [19].

Существует мнение, что содержание ТМ в гепатопанкреасе характеризует хроническое загрязнение воды и донных отложений, в то время как содержание ТМ в жабрах в большей степени связано с текущим ухудшением качества природных вод [20].

Полученные данные по BCF представлены в табл. 5. Для всех определенных в данной работе тяжелых металлов (кроме Zn), оказалось, что значения BCF варьируют от не биоаккумулятивного до очень аккумулятивного. В качестве очень биоаккумулятивного металла выделяется Cd в гепатопанкреасе для моллюсков *A. woodiana* и *C. plicata*, у последнего эти значения были самыми высокими среди изученных трех видов. По результатам нашего исследования к не биоаккумулятивному металлу можно было отнести Pb. Его минимальные значения были в жабрах *U. douglasiae*, у *A. woodiana* этот показатель был значительно выше. BCF для Cu в жабрах и *A. woodiana*, и *C. plicata* был невысоким, т.е. подобно Pb, Cu выявился как не биоаккумулятивный металл. У *U. douglasiae* в гепатопанкреасе биоаккумулятивными оказались все три металла – Cd, Cu, Pb; у *A. woodiana* – Cu и Pb; у *C. plicata* – Cu. В жабрах *U. douglasiae* биоаккумулятивными металлами оказались Cd и Cu, у *A. woodiana* – Cd.

Таким образом, значения BCF для биоаккумулятивных металлов варьировали в широких пределах от 1112.14 до 4237.00. Результаты показали, что вид *U. douglasiae* обладает потенциалом для биоаккумуляции таких металлов, как Cd и Cu (как в гепатопанкреасе, так и в жабрах). Вид *A. woodiana* также обладает потенциалом для биоаккумуляции, однако только в гепатопанкреасе, для Cd, Cu и Pb. В жабрах этого вида было зафиксировано активное накопление Cd, и при этом низкий коэффициент накопления Cd и Pb. Вид *C. plicata* по BCF в жабрах оказался очень схож с *A. woodiana*, а именно: оба вида моллюсков содержали мало Cu и Pb. В то же время в гепатопанкреасе у *C. plicata* содержание Cd и Cu было очень высоким, т.е. был отмечен по-

тенциал для их накопления именно в этом органе. Таким образом, накопление характеризовалось тканевой специфичностью.

Однако для Zn наблюдался противоположный феномен, и BCF этого металла в жабрах был существенно выше, чем в гепатопанкреасе моллюсков. Это было справедливо для всех исследуемых моллюсков. Действительно, Zn является металлом, необходимым для жизнедеятельности моллюсков, и существует мнение, что моллюски способны контролировать его поступление в организм из окружающей среды [7].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Химический анализ воды показал, что концентрации ТМ в воде реки Сунгари вблизи Харбина были в пределах Стандартов качества поверхностных природных вод Китая [21], в отличие от донных отложений, содержание ТМ в которых значительно превышало указанные стандарты.

Способность моллюсков накапливать ТМ и другие загрязнители в мягких тканях и раковинах делает возможным оценивать биологические эффекты загрязнения среды их обитания на основе соответствующих показателей. Таким образом, токсикологический риск для экосистемы может быть оценен при использовании моллюсков как живых “мониторов” загрязнения окружающей водной среды.

Результаты данного исследования показывают, что изучение особенностей накопления ТМ различными тканями разных видов двустворчатых моллюсков может быть полезным в изучении сравнительной физиологии моллюсков и их адаптации к условиям загрязнения окружающей среды ТМ. Такого рода работы могут способствовать выбору оптимального объекта – биоиндикаторного вида для оценки экологического состояния различных водных объектов Китая и Дальнего Востока России, загрязненных тяжелыми металлами.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (тема АААА-А19 119020190122-6) и при частичной поддержке National Key Research and Development Program of China (2017YFA0207204), Heilongjiang Province Natural Science Foundation (LH2019E042) and State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology (No. 2019TS06). The authors also acknowledged the support of the Innovation Team in Key Areas of the Ministry of Science and Technology.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Настоящая статья не содержит результатов каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fu J., Zhao C.P., Luo Y.P., Liu C.S., Kyzas G.Z., Luo Y., Zhao D.Y., An S.Q., Zhu H.L.* Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors. *Journal of Hazardous Materials*. 270: 102–109. 2014.
2. *Jia Y.Y., Wang L., Qu Z.P., Yang Z.G.* Distribution, contamination and accumulation of heavy metals in water, sediments, and freshwater shellfish from Liuyang River, Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*. 25 (7):7012–7020. 2018.
3. *Zhou Q.F., Zhang J.B., Fu J.J., Shi J.B., Jiang G.B.* Bio-monitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*. 606 (2): 135–150. 2008.
4. *Sarmiento A.M., Bonnail E., Nieto J.M., DelValls A.* Bio-availability and toxicity of metals from a contaminated sediment by acid mine drainage: linking exposure-response relationships of the freshwater bivalve *Corbicula fluminea* to contaminated sediment. *Environmental Science and Pollution Research*. 23 (22): 22957–22967, 2016.
5. *Costanza J., Lynch D.G., Boethling R.S., Arnot J.A.* Use of the bioaccumulation factor to screen chemicals for bioaccumulation potential. *Environ. Toxicol. Chem.* (31): 2261–2268. 2012.
6. *Sun Y.Y.* Study on survey of water quality and sediment adsorption and release of Songhua River in Harbin section. Dissertation. Harbin Institute of Technology. 2012.
7. *Голованова И.Л.* Влияние тяжелых металлов на физиолого-биохимический статус рыб и водных беспозвоночных. *Биология Внутренних Вод*. (1): 99–108. 2008. [*Golovanova I.L.* Effect of heavy metals on the physiological and biochemical status of fish and aquatic invertebrates. *Inland Water Biology*. (1): 99–108. 2008. (In Russ)].
8. *Spry D.J., Wiener J.G.* Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: A critical review. *Environ Pollut*. 71 (2–4): 243–304. 1991.
9. *Gerhard A.* Review of impact of heavy metals on stream invertebrates with special emphasis on acid conditions. *Water Air and Soil Pollution*. 66 (3–4): 289–314. 1993.
10. *Голованова И.Л.* Влияние биогенных металлов Cu и Zn на гидролиз углеводных компонентов корма у пресноводных костистых рыб. Состояние и перспективы развития фермерского рыбоводства аридной зоны: Тез. докл. международ. науч. конф. Азов: 38–40. 2006 [*Golovanova I.L.* Vliyanie biogennykh metallov Cu i Zn na gidroliz uglevodnykh komponentov korma u presnovodnykh kostistykh ryb. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya fermerskogo rybovodstva aridnoy zony [The effect of Cu and Zn biogenic metals on the hydrolysis of feed carbohydrate components in freshwater bony fish. State and prospects of fish farming development of arid zone]. *Proceedings of the international scientific conference*. Azov: 38–40. 2006 (in Russ)].
11. *Микряков В.Р., Балабанова Л.В., Заботкина Е.А., и др.* Реакция иммунной системы рыб на загрязнение воды токсикантами и закисление воды. М.: Наука: 126. 2001. [*Mikryakov V.R., Balabanova L.V., Zobotkina E.A., et al.* Reaction of the fish immune system to water pollution by toxicants and water acidification. Moscow: Nauka. 126. 2001. (in Russ)].
12. *Li N., Tian Y., Zhang J., Zuo W., Zhan W., Zhang J.* Heavy metal contamination status and source apportionment in sediments of Songhua River Harbin region, Northeast China. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 24 (4): 3214–3225. 2017.
13. *Jarvis K.E., Gray A.L., Houk R.S.* Handbook of inductively coupled plasma mass spectrometry. United Kingdom. 1997.
14. *Varol M., Sunbul M.R.* Biomonitoring of Trace Metals in the Keban Dam Reservoir (Turkey) Using Mussels (*Unio elongatulus eucirrus*) and Crayfish (*Astacus leptodactylus*). *Biological Trace Element Research*. 185 (1): 216–224. 2018.
15. *Li F., Huang J.H., Zeng G.M., Yuan X.Z., Li X.D., Liang J., Bai B.* Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China. *Journal of Geochemical Exploration*, (132): 75–83, 2013.
16. *Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А.* Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: Причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей. Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок: Рыбинский Дом печати. 99–123. 2004. [*Komov V.T., Stepanova I.K., Gremyachikh V.A.* Soderzhanie rtuti v myshchah ryb iz vodoemov Severo-Zapada Rossii: Prichiny intensivnogo nakopleniya i ocenka negativnogo effekta na sostoyaniye zdorov'ya lyudej. Aktual'nye problemy vodnoy toksikologii. [Mercury content in fish muscles from water bodies of the North-West of Russia: Causes of intensive accumulation and assessment of the negative effect on human health. Actual problems of aquatic toxicology]. Borok: Rybinsk Printing House: 99–123. 2004 (in Russ)].
17. *Barata C., Markich S.J., Baird D.J., Soares A.M.* The relative importance of water and food as cadmium source to *Daphnia magna* Straus. *Aquat. Toxicol.* 61 (3): 143–154. 2002.



18. Подгурская О.В., Кавун В.Я., Лукьянова О.Н. Аккумуляция и распределение тяжелых металлов в органах мидии *Crenomytilus grajanus* и *Modiolus modiolus* из районов апвеллингов Охотского и Японского морей. Биол. моря, 30 (3): 219–226, 2004. [Podgurskaya O.V., Kavun V.Ya., Lukyanova O.N. Accumulation and distribution of heavy metals in the organs of the mussel *Crenomytilus grajanus* and *Modiolus modiolus* from the upwelling regions of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. Biol. моря. 30 (3): 219–226. 2004. (in Russ)].
19. Wang W.X., Lu G.Y. Heavy metals in bivalve mollusks. Chemical contaminants and residues in food. 553–594. 2017.
20. Soldatov A.A., Gostyukhina O.L., Golovina I.V. Functional states of antioxidant enzymatic complex of tissues of *Mytilus galloprovincialis* Lam. under conditions of oxidative stress. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 50 (3): 206–214. 2014.
21. GB3838-2002. Environmental Quality Standards for Surface Water. Consolidated environmental assessment report. (E1952 v3). 2008.

## Differential Accumulation of Heavy Metals in Soft Tissues of Three Bivalvian Species from the Songhua River Near Harbin (China)

V. V. Zarykhta<sup>a</sup>, Z. H. Zhang<sup>a,#</sup>, T. V. Kuznetsova<sup>b</sup>, P. V. Ozerski<sup>c</sup>, and Y. J. Feng<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Harbin Institute of Technology, Harbin, China

<sup>b</sup> St. Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>c</sup> Herzen State Pedagogical University, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup>e-mail: hitzjh@hit.edu.cn

To indicate the level of anthropogenic pressure on the Songhua River near Harbin, China, concentrations of heavy metals (HM) in water, bottom sediments and soft tissues of native bivalves were determined. It was found that water concentrations of six HM (Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) ranged from 0.001 to 0.007 (mg/L) in water and from 0.07 to 5617.13 (mg/kg) in bottom sediments. At the test site of the river exposed to severe anthropogenic pollution, different bivalvian species exhibited different rates of HM accumulation in their soft tissues. Bioaccumulation coefficients (BCF) in mollusks were calculated for each metal and proved to be significantly different for the tissues studied (gills and hepatopancreas). The obtained data confirmed the existence of inter-species differences in metal accumulation in tissues of the native bivalves. This approach can be useful both in comparative physiological studies of the Bivalvia and in choosing optimal indicator organisms to assess anthropogenic pollution of natural waters of Northern China and the Russian Far East.

*Keywords:* heavy metals, bioaccumulation, bioindicators, bivalves, bottom sediments, Northern China