

УДК 574.633:594.1(571.63+597)

В.В. БОГАТОВ, Л.А. ПРОЗОРОВА,
Е.Н. ЧЕРНОВА, Е.В. ЛЫСЕНКО

Особенности биоаккумуляции тяжелых металлов у двустворчатых моллюсков (*Bivalvia*) в природных водоемах Восточной Азии

Определены концентрации семи тяжелых металлов (ТМ) в тканях двустворчатых моллюсков семейств *Unionidae* (роды *Ensisens*, *Scabies*, *Kunashiria*) и *Cyrenidae* (род *Corbicula*) из четырех незагрязненных природных озер Приморского края (Россия) и Вьетнама. Установлено, что независимо от географического положения водных объектов содержание ТМ у исследованных *Unionidae* и *Cyrenidae* специфично для семейства и убывание концентрации металлов происходит в одинаковой последовательности: для *Unionidae* – $Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Cd > Pb$, для *Cyrenidae* – $Fe > Zn > Cu > Mn > Ni \geq Cd > Pb$. Показано, что изученные *Unionidae* избирательно накапливали *Mn*, а *Cyrenidae* – *Cu*. Отклонения от установленной последовательности накопления ТМ моллюсками могут указывать на загрязнение водоемов микроэлементами или наличие природной геохимической аномалии.

Ключевые слова: тяжелые металлы, *Mn*, *Fe*, *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Cd*, *Pb*, биоаккумуляция, моллюски, *Cyrenidae*, *Corbicula*, *Unionidae*, *Ensisens*, *Scabies*, *Kunashiria*, природные озера, Приморский край, дельта Меконга.

Bioaccumulation patterns of heavy metals in bivalve mollusks from natural water bodies of the East Asia.
V.V. BOGATOV¹, L.A. PROZOROVA¹, E.N. CHERNOVA², E.V. LYSENKO² (¹Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, ²Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok).

Concentrations of seven heavy metals in tissues of bivalve mollusks of the families *Unionidae* (genera *Ensisens*, *Scabies*, *Kunashiria*) and *Cyrenidae* (genus *Corbicula*) from four natural lakes in Primorsky Krai (Russia) and Vietnam are determined. Heavy metal accumulation of studied bivalve species in *Unionidae* and *Cyrenidae* is specific for every family and does not depend on the species occurrence. The mean concentrations of metals in *Unionidae* decreased in the following order: $Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Cd > Pb$, and in *Cyrenidae*: $Fe > Zn > Cu > Mn > Ni \geq Cd > Pb$. All studied *Unionidae* selectively accumulate *Mn*, while *Cyrenidae* mainly accumulates *Cu*. Deviations from the revealed heavy metals accumulation by mollusks may be indicative the microelements pollution of water bodies or the presence of natural geochemical anomaly.

Key words: heavy metals, *Mn*, *Fe*, *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Cd*, *Pb*, bioaccumulation, mollusks, *Cyrenidae*, *Corbicula*, *Unionidae*, *Ensisens*, *Scabies*, *Kunashiria*, natural lakes, Primorsky Krai, Mekong River Delta.

Тяжелые металлы (ТМ) – одна из важнейших и опаснейших в силу своей токсичности групп химических поллютантов, распространение и концентрации которых в водных экосистемах постоянно растут в ходе хозяйственной деятельности человека.

*БОГАТОВ Виктор Всеволодович – член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, ПРОЗОРОВА Лариса Аркадьевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник (Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток), ЧЕРНОВА Елена Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ЛЫСЕНКО Евгения Валерьевна – младший научный сотрудник (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: vibogatov@mail.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (грант ВАНТ 17-000).

Представители макробентоса наиболее часто используются как объекты биомониторинга и оценки состояния окружающей среды [16, 23, 25, 30, 32]. Особый интерес в этом плане представляют двустворчатые моллюски, обладающие фильтрационным типом питания, в связи с чем их привлечение к анализу пространственных и временных изменений состояния водной среды считается перспективным. Действительно, по отношению к накоплению двустворками ТМ имеются обширные сведения по культивируемым морским моллюскам [5, 13], а также пресноводным и солоноватоводным моллюскам, обитающим в водах, подверженных интенсивному антропогенному загрязнению [1, 4, 7, 8, 33]. В то же время имеется лишь отрывочная информация по накоплению ТМ двустворчатыми моллюсками в незагрязненных водоемах с природными (фоновыми) концентрациями микроэлементов. Кроме того, работы, посвященные микроэлементному составу двустворчатых моллюсков из континентальных вод Вьетнама, малочисленны, зачастую в них рассматриваются лишь 3–4 металла [24, 26, 29, 35, 36], а по моллюскам из водоемов дельты Меконга первые результаты исследований по данной тематике опубликованы нами в 2017–2018 гг. [19, 30].

Цель данной работы – выявление общих закономерностей в уровнях накопления ТМ двустворчатыми моллюсками различных таксонов, обитающими в незагрязненных водоемах разных зоогеографических зон, а также возможности использования исследованных видов моллюсков для биомониторинга водных экосистем.

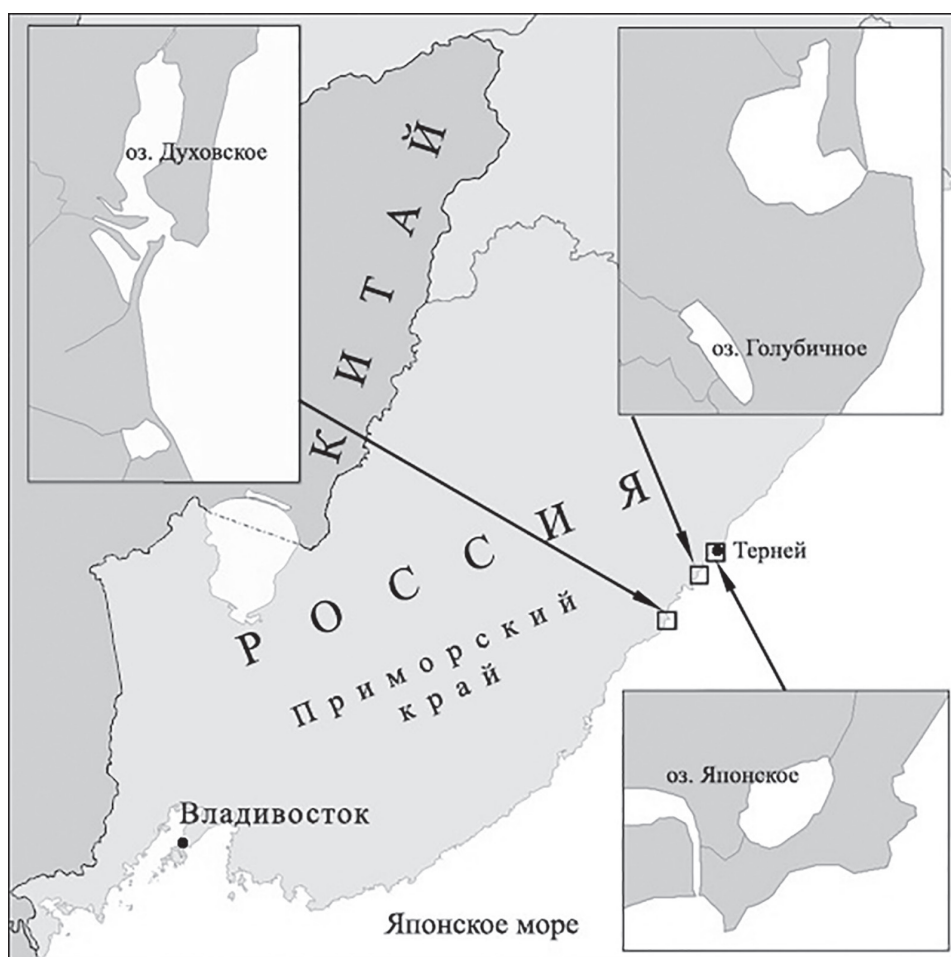


Рис. 1. Карта-схема расположения озер Японское, Голубичное и Духовское

Основные водные объекты, на примере которых решались эти задачи, – озера лагунного типа Японское, Голубичное и Духовское, расположенные в пределах восточного склона Сихотэ-Алиня (Приморский край, Россия) (рис. 1), и тропическое оз. Бинтьен (Binh Thien или Bung Binh Thien) из поймы дельты р. Меконг (Вьетнам) (рис. 2). Исследованные водоемы Приморского края представляют собой эталонные водные экосистемы с фоновыми природными уровнями содержания ТМ [9, 10, 14]. Озеро Бинтьен известно также как эталонная пресноводная озерная экосистема Вьетнама и как центр биоразнообразия водных и околотовных животных [27, 31, 34].

Необходимо отметить, что если в Приморском крае накопление ТМ гидробионтами изучается уже более 50 лет учеными из различных организаций, то для дельты Меконга подобное исследование выполнено впервые.



Рис. 2. Карта-схема дельты Меконга и местоположения оз. Бинтьен

Характеристика исследованных водоемов

Озера Японское, Голубичное и Духовское расположены на побережье Японского моря в Тернейском районе Приморского края (рис. 1). Первые два озера пресноводные и находятся в охранной зоне Сихотэ-Алинского государственного биосферного природного заповедника. Солонатоводное оз. Духовское, хотя и не является

охраняемым природным объектом, имеет чистые воды, а по концентрации тяжелых металлов в планктоне и озерной взвеси сопоставимо с заповедным солоноватоводным оз. Благодатное [9, 11]. Несмотря на отсутствие антропогенного загрязнения, взвешенное вещество и донные осадки в более крупных озерах Японское и Духовское заметно обогащены железом, марганцем, цинком, кадмием и свинцом [9], имеющим естественное происхождение в связи с геологическими особенностями местности. Озеро Японское отделено от моря штормовым валом и соединено протокой с устьем р. Серебрянка. Озеро Голубичное расположено в пойме р. Голубичная, стока не имеет. Площадь зеркала и удельный водосбор озера Японское и Голубичное – 0,25 и 28,2 км², 0,45 и 13,6 км² соответственно [14]. Оба озера характеризуются хорошо развитой пресноводной малакофауной, наиболее крупные представители которой относятся к виду *Kunashiria coptzevi* (Zatravkin et Bogatov, 1987) из сем. Unionidae [6].

Озеро Духовское связано постоянной протокой с бухтой Озёра Японского моря. В южную часть озера впадает р. Кедровка, в северную – крупный ручей. Площадь зеркала и удельный водосбор оз. Духовское – 1,47 и 122 км² соответственно, максимальная глубина – 4,5 м [15]. Вне заболоченной части озера обитает *Corbicula japonica* Prime, 1864 (сем. Cyrenidae) – солоноватоводный вид, широко распространенный вдоль Япономорского побережья [11].

Озеро Бинтьен – одно из наиболее крупных пресноводных озера в дельте Меконга, его площадь около 1,2 км² в сухой сезон и 2,5 км² в сезон дождей, максимальная глубина в сухой сезон до 4 м. Это пойменное озеро расположено у границы с Камбоджей на территории района Анфу (An Phu) провинции Анзянг (An Giang) и связано протокой с р. Бинди (Binh Di) из системы правого основного рукава дельты – р. Бассак (вьетнамское название р. Хау) (рис. 2). Несмотря на высокую плотность сельского населения на его берегах, озеро относится к охраняемым природным акваториям, где запрещена хозяйственная деятельность, за исключением отлова традиционными методами рыбы и моллюсков. Характерной особенностью озера является гораздо большая прозрачность воды по сравнению с водотоками дельты Меконга благодаря широкому прибрежному поясу высшей водной растительности, выступающей в роли естественного фильтра, а также высокая рыбопродуктивность и биоразнообразие водной фауны. Особенно это касается организмов макробентоса, плотность которых в озере составляет 40–1950 экз./м² при высоких показателях индексов биоразнообразия по Маргалёфу (до 2,62) и Шеннону (до 3,13) [27]. В макробентосе озера преобладают моллюски, среди которых отмечено 15 видов брюхоногих и 10 видов двустворчатых из 14 семейств [31]. Среди двустворчатых моллюсков наибольшего количественного развития достигают *Corbicula* sp. и представители сем. Unionidae – *Ensidens ingallsianus* (Lea, 1852) и *Scabies crispata* (Gould, 1843).

Материалы и методы

Исследовано содержание Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в двустворчатых моллюсках рода *Corbicula* Megerle von Muehlfeld, 1811: *C. japonica* из оз. Духовское и *Corbicula* sp. из оз. Бинтьен, а также крупных двустворок из сем. Unionidae – *Kunashiria coptzevi* из озера Японское и Голубичное и тропических видов *Ensidens ingallsianus* и *Scabies crispata* из оз. Бинтьен [31]. Выбор указанных 7 элементов для исследования определялся их биологической значимостью и металлогенической спецификой Дальневосточного региона [13].

В озерах Японское, Голубичное и Духовское сборы моллюсков проведены в июле 2013 г., в оз. Бинтьен – в апреле и сентябре 2017 г. Сбор крупных унионид *Kunashiria coptzevi* (длина раковины 50–68 мм), *Ensidens ingallsianus* (длина раковины 54–58 мм) и *Scabies crispata* (длина раковины 34–38 мм) производился ручным способом, а менее крупных *Corbicula* (длина раковины 17–26 мм) – вручную и с помощью скребка с глубины до 1–2 м.

Собранных живых моллюсков отмывали от взвеси, помещали в пластиковый контейнер с водой из места обитания и выдерживали в течение 48 ч для очистки кишечника. Затем формировали 3–5 размерно-возрастных групп по 2–10 экземпляров в каждой и препарировали моллюсков, чтобы получить по 2,5 г сырой массы для каждой группы. Мягкие ткани высушивали в сушильном шкафу при температуре 85 °С до постоянного веса. Пустые раковины отмывали, сушили на воздухе, измеряли, взвешивали и этикетировали.

Высушенные пробы мягких тканей взвешивали, навески (0,25–0,5 г сухой массы) минерализовали азотной кислотой марки ОСЧ в микроволновой печи MARS 5 (CEM Corporation, USA) в лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Концентрацию металлов определяли атомно-абсорбционным методом на приборах Shimadzu AA 6800 в пламенном (Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd) и беспламенном (Pb) вариантах. Точность определения концентрации металла контролировали, анализируя стандартные образцы – лист березы (ЛБ-1 ГСО 8923–2007, г. Иркутск) (табл. 1). Загрязнение реактивов контролировали, используя холостые пробы, включенные в партию подготовленных к анализу образцов.

Полученные показатели концентраций металлов выражены в мкг/г сухой массы. Поскольку официальные данные предельно допустимых концентраций ТМ в рыбном сырье или пищевых продуктах, предназначенных для России и зарубежных стран, приводятся на единицу сырой массы [2, 3, 18], эти цифры пересчитаны на сухую массу с коэффициентом 5 (табл. 2), который используется в российской и иностранной научной литературе [14,

Таблица 1
Содержание металлов (мкг/г сухой массы) в листьях березы* в сравнении с паспортными данными

Металл	Получено		Паспортные данные
	апрель	сентябрь	
Mn	929	933	930 ± 70
Fe	763	713	730 ± 70
Ni	6,41	5,34	5,8 ± 0,8
Cu	7,8	7,8	7,3 ± 0,6
Zn	95	81,3	94 ± 6
Cd	0,20	0,20	0,16 ± 0,03
Pb	–	2,6	3,7 ± 0,5

*ЛБ-1 (ГСО 8923–2007), г. Иркутск. Прочерк – данные отсутствуют.

Таблица 2
Содержание тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков из природных озер российского Дальнего Востока и Вьетнама, мкг/г сухой массы

Вид	Озеро	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<i>Kunashiria coptzevi</i>	Японское	5997 ± 2450	5023 ± 3090	4,2 ± 0,9	5,4 ± 0,9	263 ± 48	1,6 ± 0,4	1,11 ± 0,31
<i>Kunashiria coptzevi</i>	Голубичное	3089 ± 1705	2826 ± 1542	2,9 ± 0,9	4,5 ± 0,8	173 ± 29	0,9 ± 0,2	1,35 ± 1,23
<i>Ensidens ingallsianus</i>	Бинтьен	7786 ± 3356	1696 ± 616	2,8 ± 0,8	5,3 ± 2,2	251 ± 93	0,7 ± 0,2	0,22 ± 0,10
<i>Scabies crispata</i>	Бинтьен	4565 ± 1194	1579 ± 211	2,2 ± 0,2	6,2 ± 0,9	90 ± 24	0,4 ± 0,1	0,35 ± 0,30
<i>Corbicula japonica</i>	Духовское	12 ± 8	283 ± 14	1,3 ± 0,1	13,2 ± 0,9	119 ± 3	1,3 ± 0,1	0,31 ± 0,04
<i>Corbicula</i> sp.	Бинтьен: апрель	4 ± 3	392 ± 111	1,5 ± 0,3	52,0 ± 21,9	81 ± 14	0,4 ± 0,2	0,06 ± 0,03
	сентябрь	1,2 ± 0,9	212 ± 19	0,96 ± 0,1	49,9 ± 4,4	70 ± 3	0,99 ± 0,05	0,16 ± 0,01
ПДК*		–	–	–	150 (30)	1000 (200)	10 (2)	10 (2)
MPL**		–	–	–	133–150 (26,6–30)	250–667 (50–133)	5–20 (1–4)	6,65–30 (1,33–6,0)

*Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в пищевом нерыбном сырье согласно российским нормам СанПиН [2, 3].

**Предельно допустимые концентрации металлов в рыбном и нерыбном сырье согласно государственным стандартам различных стран Евросоюза, Гонконга, Австралии, США, Бразилии, Таиланда, Малайзии – диапазон значений, составлено по литературным данным [18]. В скобках приведены концентрации металлов в мягких тканях моллюсков (мкг/г сырой массы). Прочерк – данные отсутствуют.

18], с учетом того, что средняя сухая масса мягких тканей моллюсков составляет около 20 % от сырой.

В качестве показателя упитанности моллюсков использован индекс мягких тканей (СИ), рассчитанный как отношение сухой массы мягких тканей к условному объему раковины в литрах, равному произведению ее высоты, длины и выпуклости [20].

Результаты и их обсуждение

Оригинальные сведения по среднему содержанию Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в мягких тканях исследованных моллюсков представлены в табл. 2, из которой видно, что согласно отечественным и зарубежным санитарно-гигиеническим нормативам [2, 3, 18] все обследованные нами моллюски из озер Японское, Голубичное, Духовское и Бинтъен безопасны, поскольку концентрации ТМ в их мягких тканях в большинстве случаев на порядок меньше указанных ПДК и МРЛ, за исключением цинка, концентрации которого у двух видов российских и вьетнамских устриц превышают нормы, разработанные для пищевых продуктов Бразилии [18]. Кроме того, из табл. 2 видно, что в теле приморских *Kunashiria coptzevi* концентрации металлов варьировали в следующих пределах: Fe – 2830–5020 мкг/г, Zn – 173–263, Cu – 4,5–5,4, Mn – 3090–5600, Ni – 2,9–4,2, Cd – 0,9–1,6, Pb – 1,1–1,4 мкг/г сухой массы, а в устрицах *Ensisidens ingallsianus* и *Scabies crispata* из оз. Бинтъен – Fe – 1580–1700 мкг/г, Zn – 90–250, Cu – 5,3–6,2, Mn – 4570–7790, Ni – 2,2–2,8, Cd – 0,4–0,7, Pb – 0,22–0,35 мкг/г сухой массы. Из полученных данных следует важный вывод: содержание ТМ у исследованных Unionidae, независимо от географического положения водных объектов с фоновыми уровнями микроэлементов, уменьшается в одинаковой последовательности: Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Cd > Pb. Такая же последовательность снижения степени аккумуляции ТМ оказалась свойственна и устрицам рода *Beringiana* Starobogatov et Zatravkin, 1983 из охраняемого как зоологический памятник природы камчатского оз. Азабачье [15], химический состав воды и грунта которого формируется под воздействием вулканического пепла [12]. Обращает на себя внимание тот факт, что все исследованные нами (табл. 2) и большинство исследованных ранее Unionidae (табл. 3) характеризуются чрезвычайно высоким содержанием в тканях марганца. В частности, у дальневосточных *Kunashiria coptzevi* [1, 14, 15], камчатских *Beringiana* sp. [15], северо-вьетнамских *Pletholophus swinhoi* [36] также зафиксированы высокие уровни Mn, что подтверждает выявленную закономерность.

Из литературных данных следует, что для озер, подверженных существенному антропогенному воздействию, аналогичные ряды аккумуляции ТМ у Unionidae выглядят несколько иначе. Так, устрицы *Kunashiria coptzevi* в загрязненном оз. Васьковское (восточный склон Сихотэ-Алиня) характеризуются существенно большим накоплением Pb, занимающим четвертое место в ряду по убыванию концентраций металлов в мягких тканях этого вида (табл. 3), что объясняется аэротехногенным переносом этого элемента из выбросов расположенного поблизости свинцово-плавильного завода [1, 14]. Данный факт указывает на возможность использования устриц в мониторинге свинца, о чем также имеются литературные свидетельства. Например, положительная корреляция содержания Pb в донных осадках и мягких тканях *Anodonta anatina* (L., 1758), *Anodonta cygnea* (L., 1758) и *Unio tumidus* (L., 1758) из Малтанского водохранилища отмечена на западе Польши [33]. Последовательность уменьшения концентраций ТМ в тканях этих трех видов европейских устриц, а также в донных осадках и тростнике выглядит сходным образом: на первой позиции оказалось железо, а свинец занимает шестую позицию: Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd [31] (табл. 3).

Закономерности накопления отдельных ТМ корбикулами из Приморья и Вьетнама существенно отличались от таковых у устриц. Из полученных результатов видно, что в оз. Духовское Приморского края концентрации ТМ в тканях *Corbicula japonica* летом 2013 г. составляли: Fe – 283 мкг/г, Zn – 119, Cu – 13,2, Mn – 12, Ni – 1,3, Cd – 1,3, Pb –

Содержание тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков по литературным данным, мкг/г сухой массы

Вид [источник информации]	Водоём	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<i>Kunashiria</i> <i>copzevi</i> [15]	Оз. Ваевское, Приморье	455 ± 267	373 ± 20	0,68 ± 0,38	3,3 ± 0,2	321 ± 41	0,03 ± 0,001	9,7 ± 1,4
<i>Kunashiria</i> sp. [1, 15]	– « –	2600–8100	4300–8200	–	6,7–9,1	430–850	–	30–40
<i>Beringiana</i> sp. [15]	Оз. Азабачье, Камчатка	317 ± 181	56,7 ± 26,8	0,6 ± 0,3	5,4 ± 1,8	94 ± 27	0,01 ± 0,005	0,18 ± 0,06
<i>Pletholophus swinhoei</i> [36]	Водоём у с. Дуймин Канал у с. Ангин (Ханам, Вьетнам)	520 ± 190 1600 ± 1000	390 ± 90 1900 ± 770	–	2,4 ± 0,9 3,2 ± 2,5	120 ± 18 150 ± 54	0,05 ± 0,04 0,08 ± 0,04	0,49 ± 0,39 0,53 ± 0,21
<i>Unio tumidus</i>	Водоохранилище Малтанское (Западная Польша)	19,1 ± 6,0	66,8 ± 23,1	0,77 ± 0,09	4,6 ± 2,4	51,3 ± 25,2	0,04 ± 0,02	0,21 ± 0,11
<i>Anodonta anatina</i>	– « –	29,4 ± 8,0	78,3 ± 15,1	0,06 ± 0,04	9,3 ± 1,1	42,2 ± 11,4	0,04 ± 0,03	0,15 ± 0,07
<i>A. cygnea</i> [33]	– « –	33,4 ± 9,3	77 ± 14,6	0,86 ± 0,24	5,3 ± 2,3	31,1 ± 11,6	0,08 ± 0,03	0,16 ± 0,05
<i>Corbicula fluminea</i> [21]	Р. Шенандоа (Вирджиния, США):	–	–	–	–	–	0,75 (0,09–3,8)	1,5 (0,6–3,2)
<i>Corbicula fluminea</i> [22]	Бассейн р. Новая (Вирджиния, США)	–	–	–	285 ± 101	104 ± 21,3	15 ± 12,7	–
<i>Corbicula fluminea</i> [28]	Оз. Семинюул (Джорджия, США)	–	–	–	45 ± 20	220 ± 90	–	–

Примечание. В скобках – диапазон. Прочерк – данные отсутствуют.

0,31 мкг/г сухой массы и уменьшались в последовательности Fe > Zn > Cu > Mn > Ni = Cd > Pb. Практически в той же последовательности изменялось в апреле и сентябре 2017 г. среднее содержание ТМ в корбикулах из оз. Бинтьен: Fe – 212–392 мкг/г, Zn – 70–81, Cu – 50–52, Mn – 1,2–4,0, Ni – 1–1,5, Cd – 0,4–1,0, Pb – 0,06–0,16 мкг/г сухой массы.

При этом показатели упитанности корбикул из оз. Бинтьен, собранных в сухой и дождливый сезоны 2017 г., оказались близки, поскольку индекс мягких тканей вьетнамских *Corbicula* sp. в апреле 2017 г. составил CI = 24,9 ± 6,4, а в сентябре CI = 22,1 ± 1,4. Сходство не только показателей упитанности, но и концентраций одних и тех же металлов в корбикулах из оз. Бинтьен, измеренных в апреле (сухой сезон) и сентябре (сезон дождей) (табл. 2), позволяет нам далее не учитывать сезонные различия при обсуждении биоаккумуляции ТМ корбикулами.

Из полученных данных видно, что в мягких тканях корбикул из дальневосточного оз. Духовское и вьетнамского оз. Бинтьен в наибольших концентрациях содержатся Fe, Zn и Cu, в то время как Mn занимает лишь 4-ю позицию, причем концентрации этого элемента в 10–2000 раз ниже таковых у совместно обитающих с ними Unionidae (табл. 2). Также обращает на себя внимание избирательное накопление корбикулами меди. В частности, в оз. Бинтьен концентрации этого металла в тканях корбикул на порядок превышают содержание меди в теле унионид при сопоставимом содержании цинка (табл. 2). У дальневосточных *Corbicula japonica* концентрации в тканях меди также значительно больше, чем у *Kunashiria copzevi*

из соседних заповедных озер (табл. 2). Отметим, что по литературным данным способность к накоплению меди и цинка другим видом корбикул – *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774), часто используемым в биомониторинге, подтверждается как одним из первых исследований микроэлементного состава этого вида [22], так и наиболее современной из известных нам работ на данную тему [28] (табл. 3). Аналогичная аккумуляционная способность обнаружена у другого азиатского пресноводного представителя рода, интродуцированного ныне во многие страны мира, – *Corbicula fluminalis* (O.F. Müller, 1774) [17] (табл. 3).

Таким образом, несмотря на значительное отдаление мест обитания изученных моллюсков (юго-восток и северо-восток Азии), содержание ТМ в мягких тканях Unionidae и Cyrenidae оказалось специфичным для семейств и уменьшалось в одинаковой последовательности в пределах каждого из них. Для Unionidae это $Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Cd > Pb$, а для Cyrenidae – $Fe > Zn > Cu > Mn > Ni \geq Cd > Pb$. Показано, что изученные Unionidae избирательно накапливали Mn, а *Corbicula* из Cyrenidae – Cu. Выявленные таксономические особенности накопления ТМ у изученных унионид и корбикул необходимо учитывать при использовании их в качестве индикаторных организмов. По-видимому, отклонения от установленных схем накопления ТМ моллюсками могут указывать на загрязнения водоемов этими элементами или природные аномалии. Полученные абсолютные значения ТМ в телах двустворчатых моллюсков в первом приближении могут быть рекомендованы в качестве фоновых уровней для дальнейших экологических исследований в изученных регионах, включая Сихотэ-Алинский участок Тихоокеанского рудного пояса.

На нынешнем этапе работы мы не можем с достаточной точностью судить обо всем диапазоне фоновых концентраций тяжелых металлов в унионидах и корбикулах рассматриваемых регионов из-за малого количества обследованных водоемов. Необходимо продолжить исследования по содержанию ТМ в представителях данных семейств в других водоемах Приморского края и дельты Меконга.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам из Института тропической биологии Вьетнамской академии наук и технологий (г. Хошимин) Х.К. Нго и Т.Т. Трану за помощь в организации и проведении полевых работ на юге Вьетнама.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатов В.В., Богатова Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов пресноводными гидробионтами в горнорудном районе юга Дальнего Востока России // Экология. 2009. № 3. С. 202–208.
2. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01.2008. – <https://gosstandart.info/data/documents/sanpin3.2.1078-01>
3. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.560-96. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1997. 270 с.
4. Калинина Г.Г. Содержание некоторых металлов в мягких тканях двустворчатого моллюска корбикулы японской *Corbicula japonica* // Научные труды Дальрыбвтуза. 2010. Т. 22. С. 1–8.
5. Ковековдова Л.Т., Симоконов М.В., Кику Д.П. Токсичные элементы в промысловых гидробионтах прибрежных акваторий северо-западной части Японского моря // Вопросы рыболовства. 2006. Т. 7, № 1 (25). С. 185–190.
6. Колпаков Е.В. Рост беззубок рода *Kunashiria* (Bivalvia, Anodontinae) в озере Японское (бассейн реки Сребрянка, Северное Приморье) // Зоол. журн. 2007. Т. 86, № 10. С. 1177–1182.
7. Лукашев Д.В. Метод расчета фоновых концентраций тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков для оценки загрязнения р. Днепр // Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 97–106.
8. Лукашев Д.В. Содержание тяжелых металлов в воде и двустворчатых моллюсках на различных участках русла реки Южный Буг // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 3. С. 351–355.
9. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н., Луценко Т.Н. Биогеохимические особенности лагунных озер (Благодати, Голубичное, Японское) Сихотэ-Алинского биосферного заповедника // Успехи наук о жизни. 2015. № 10. С. 124–132.
10. Лысенко Е.В., Чернова Е.Н. Перенос тяжелых металлов по трофической цепи планктон–моллюски-фильтраторы в солоноватоводных лагунных озерах побережья Японского моря // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 187, № 4. С. 197–204.

11. Разработка биологического обоснования на рыбохозяйственное использование некоторых озер Тернейского района: Духовское, Мраморное, Круглое: отчет о НИР № 21718 // Архив ТИНРО. Владивосток, 1990. 37 с.
12. Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Агатова А.И. и др. Результаты химических исследований оз. Азабачьего (Камчатка) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 5. С. 599–605.
13. Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1994. 296 с.
14. Чернова Е.Н., Шулькин В.М., Луценко Т.Н. и др. Гидрохимические и биогеохимические особенности пресных и солоноватых озер восточного Сихотэ-Алиня // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 157–172.
15. Чернова Е.Н., Лобас Л.А., Ковалев М.Ю., Лысенко Е.В. Особенности распределения тяжелых металлов в компонентах водных экосистем памятников природы – озер Благодати, Васьяковское (Приморский край) и Азабачье (Камчатский край) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 3. С. 312–318.
16. Abel P.D. Water Pollution Biology 2nd edition. London: Taylor & Francis Ltd, 1996. 279 p.
17. Al-Jaberi M.H. Heavy metal concentrations in the bivalve *Corbicula fluminalis* shells from Shatt Al-Arab River // International J. of Marine Science. 2015. Vol. 5, N 39. DOI: 10.5376 / ijms.2015.05.0039.
18. Amiard J.C., Amiard-Triquet C., Charbonnier L., Mesnil A., Rainbow P.S., Wang W.X. Bioaccessibility of essential and non-essential metals in commercial shellfish from Western Europe and Asia // Food Chem. Toxicol. 2008. Vol. 46. P. 2010–2022.
19. Bogatov V.V., Prozorova L.A., Chernova E.N., Lysenko E.V., Ngo X.Q., Tran T.T., Hoang N.S. Accumulation of heavy metals in corbiculid clams from the Mekong and Red River deltas // Ann. Meet. of the North American Society for Freshwater Science. 20–24 May, 2018. Detroit, Michigan. – https://sfsannualmeeting.org/Schedule/grid_Topics.cfm?did=1781,1784,1788,1792,1796,1825&pdtid=1929&rid=630
20. Boyden C.R. Trace element content and body size in molluscs // Nature. 1974. Vol. 251. P. 311–314.
21. Ciparis S., Schreiber M.E., Voshell Jr.J.R. Using watershed characteristics, sediment, and tissue of resident mollusks to identify potential sources of trace elements to streams in a complex agricultural landscape // Environ. Monit. Assess. 2012. Vol. 184. P. 3109–3126. DOI: 10.1007/s10661-011-2175-7.
22. Graney R.L.Jr., Cherry D.S., Cairns J.Jr. Heavy metal indicator potential of the Asiatic clam (*Corbicula fluminea*) in artificial stream systems // Hydrobiologia. 1983. Vol. 102. P. 81–88.
23. Hellawell J.M. Biological Indicators of freshwater pollution and environmental management. L.: Elsevier Applied Science Publisher, 1986. 518 p.
24. Khanh N.V., Vinh T.D., Okubo K. et al. Assessment of lead and cadmium contamination by sediments and bivalve species from the estuaries in Da Nang City, Vietnam // J. Environ. Sci. Sustain. Soc. 2015. Vol. 6. P. 1–6.
25. Metcafe J.I. Biological water quality assessment of running water based on macroinvertebrate communities: history and present status in Europe // Environ. Pollut. 1989. Vol. 60. P. 101–139.
26. Mui L.T. Accumulation of lead and copper in some bivalvia mollusks species from coastal water of Danang // Da Nang University J. 2008. N 4–27. [In Vietnamese].
27. Ngo X.Q., Nguyen V.S. Biodiversity of benthic macro invertebrate in the Binh Thien Lake, An Giang province for reserve // Proc. 3rd Nat. Workshop on Ecol. and Biol. Res. 2009. P. 726–731. [In Vietnamese with English abstract].
28. Patrick C.H., Waters M.N., Golladay S.W. The distribution and ecological role of *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in a large and shallow reservoir // BioInvasions Records. 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 39–48. DOI: 10.3391/bir.2017.6.1.07.
29. Phuong T.T.M., Marmier N., Hurel C., Phung N.K. Bioaccumulation and concentrations of heavy metal in the different mollusks collected from Khanh Hoa coastal, Vietnam // J. Sci. Technol. 2012. Vol. 50, N 4A. P. 234–241.
30. Prozorova L.A., Chernova E.N., Bogatov V.V., Lysenko E.V., Ngo X.Q., Hoang N.S. Bioindication of heavy metals in selected edible estuarine clams from the Mekong Delta // Bien Dong 2017, Science for Blue Growth in the South China Sea. Nha Trang, Khanh Hoa, Vietnam, 12–14 September 2017: Abstract Book. Nha Trang: Institute of Oceanology VAST. P. 37.
31. Prozorova L.A., Ngo X.Q. Mollusks of the Mekong Delta: progress in bioassessment // 3rd Int. Sympos. Benthol. Soc. of Asia. Vladivostok, Russian Federation, 24–26 August 2016: Abstract Book. Vladivostok: Dalnauka, 2016. P. 98.
32. Rosenberg D.M., Resh V.H. Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. N.Y.: Chapman & Hall, 1993. 488 p.
33. Rzymiski P., Niedzielski P., Klimaszuk P., Poniedziałek B. Bioaccumulation of selected metals in bivalves (Unionidae) and *Phragmites australis* inhabiting a municipal water reservoir // Environ Monit Assess. 2014. Vol. 186. P. 3199–3212. DOI: 10.1007/s10661-013-3610-8.
34. Thai N.T., Hoang D.D., Nguyen X.D. et al. Research on biodiversity of aquatic fauna in Bung Binh Thien lake, An Giang province for National Conservation in Co-management // Proc. of the 3rd National Workshop on Ecology and Biological Resources. 2009. P. 853–857. [In Vietnamese with English abstract].
35. Tu N.P.C., Ha N.N., Agusa T., Ikemoto T. et al. Concentrations of trace elements in *Meretrix* spp. (Mollusca: Bivalva) along the coasts of Vietnam // Fish. Sci. 2010. Vol. 76. P. 677–686. DOI: 10.1007/s12562-010-0251-5.
36. Wagner A., Boman J. Biomonitoring of trace elements in Vietnamese fresh water mussels // Spectrochimica Acta. 2004. Pt B59. P. 1125–1132.