

УДК 577.47:170.49

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РЯДА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МЯГКИХ ТКАНЯХ *MYTILUS TROSSULUS* A. GOULD, 1850, *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAMARCK, 1819 (BIVALVIA: MYTILIDAE) И ИХ ГИБРИДНЫХ ФОРМ ИЗ БУХТЫ МИНОНОСОК ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2024 г. В. Я. Кавун^{1,*} (ORCID: 0000-0003-4739-4951)

¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского (ННЦМБ) ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: vkavun11@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принята к публикации 20.09.2023 г.

Проведена сравнительная оценка содержания Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb и Ni в мягких тканях двустворчатых моллюсков *Mytilus trossulus*, *M. galloprovincialis* и их гибридных форм из б. Миноносек зал. Петра Великого (Японское море). Достоверных различий в накоплении Fe и Cd в тканях всех исследованных групп моллюсков не выявлено. Показано, что гибридные формы этих видов имели более интенсивный рост, и на этом фоне накапливали в своих мягких тканях достоверно меньшие концентрации таких металлов, как Cu, Mn, Pb и Ni, по сравнению с родительскими видами. Выявлена достоверная отрицательная корреляционная связь между накоплением этих металлов в тканях моллюсков и длиной, массой их раковин и мягких тканей в целом. *M. trossulus*, имевшая достоверно меньшую массу створок и мягких тканей, отличалась от *M. galloprovincialis* накоплением достоверно больших концентраций Zn, для которого не обнаружено связи его содержания от всех исследованных размерно-весовых характеристик. Проведенное тестирование не выявило значимой зависимости накопления всех исследованных металлов, за исключением Pb, в тканях моллюсков от их индекса кондиции. Полученные результаты указывают на необходимость учета вышеперечисленных особенностей микроэлементного состава мягких тканей исследованных видов, при использовании их в мониторинге загрязнения среды тяжелыми металлами.

Ключевые слова: Японское море, зал. Петра Великого, *Mytilus trossulus*, *Mytilus galloprovincialis*, гибридные формы, тяжелые металлы, мониторинг

DOI: 10.31857/S0134347524010027

Мониторинг загрязнения водных экосистем металлами по их содержанию в тканях массовых видов моллюсков и водорослей широко применяется и в мире (Шулькин, Кавун, 2018; Phillips, 1976; Goldberg et al., 1983; Rainbow, Phillips, 1993; Azizi et al., 2018), и в прибрежных водах морей РФ, в том числе в зал. Петра Великого (Христофорова, 1989; Шулькин, Кавун, 2023). Тихоокеанская мидия *Mytilus trossulus* — основной массовый вид, который используется в качестве организма-монитора для контроля над содержанием тяжелых металлов в прибрежных

водах северо-западной части Тихого океана (Христофорова, Кавун, 1988; Кавун и др., 1989; Христофорова и др., 1993; Kavun et al., 2002). Однако в последние три десятилетия значительно расширился ареал средиземноморской мидии *M. galloprovincialis* в этой части Пацифики. Новые данные свидетельствуют о продолжении инвазии *M. galloprovincialis* в зал. Петра Великого и сопредельные воды. Более того, показано, что граница ареала *M. galloprovincialis* пролегает севернее районов, документированных ранее в генетических исследованиях, достигая заливов Ольги и

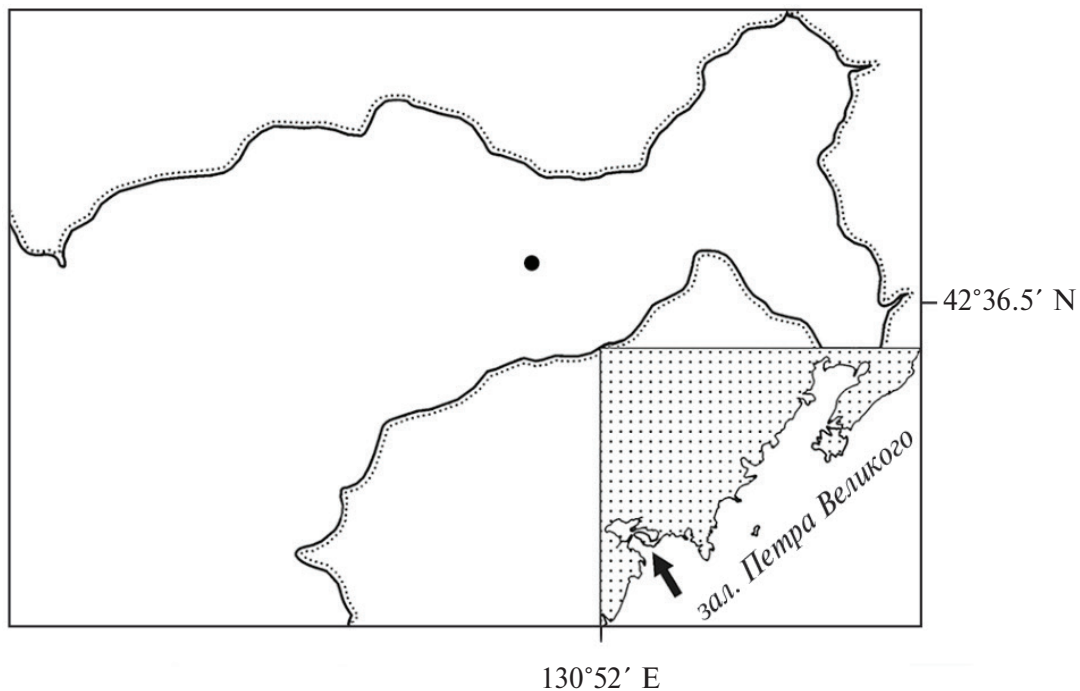


Рис. 1. Карта-схема района проведения работ в б. Миноносок зал. Петра Великого. Черный кружок — место отбора проб моллюсков.

Владимира, о-ва Монерон (юго-западный Сахалин) (Ivanova, Lutaenko, 1998), а с тихоокеанской стороны Южных Курильских о-вов — о-ва Кунашир (Лутаенко, Колпаков, 2016).

В большинстве современных работ *M. edulis*, *M. trossulus* и *M. galloprovincialis* рассматриваются как отдельные виды. Тем не менее, высказываются мнения о том, что только *M. trossulus* является видом, а остальные следует рассматривать в ранге подвидов (Kartavtsev et al., 2005), но это утверждение может быть отнесено только к исследуемому региону. Причиной большинства таксономических споров в данной группе видов является генетическая и морфологическая близость трех номинально признаваемых видов таксона. Осложняет ситуацию также то, что особи этих видов имеют зоны симпатрии и дают гибридные формы друг с другом в различных районах Мирового океана (Скурихина и др., 2001; Heath et al., 1995; Inoue et al., 1997; Kartavtsev et al., 2005). В частности, в зал. Петра Великого Японского моря образована гибридная зона *M. trossulus* и *M. galloprovincialis* (Скурихина и др., 2001; Hilbish et al., 2002; Kartavtsev et al., 2005, 2018). На основании

генетико-биохимических методов выявлено преобладание в поселениях мидий особей местного вида *M. trossulus* (Kartavtsev et al., 2005, 2018). Однако в поселениях зал. Посыета не только выявлена значительная доля вида-интродуцента *M. galloprovincialis*, но и показан довольно значительный рост доли гибридов этих двух видов (Шепель, 2010; Картавцев и др., 2014). В составе южноприморской малакофауны этот вид чаще встречался в форме гибридов с *M. trossulus* (Ivanova, Lutaenko, 1998).

В связи с вышеперечисленным встает вопрос о возможной видоспецифичности микро-элементного состава мягких тканей этих двух видов и их гибридных форм. Однако данный важный аспект при использовании этих видов в мониторинге тяжелых металлов в прибрежных водах северо-западной части Тихого океана до сих пор не изучался.

Цель данного исследования — сравнительная оценка содержания ряда тяжелых металлов в тканях *M. trossulus* и *M. galloprovincialis* и их гибридных

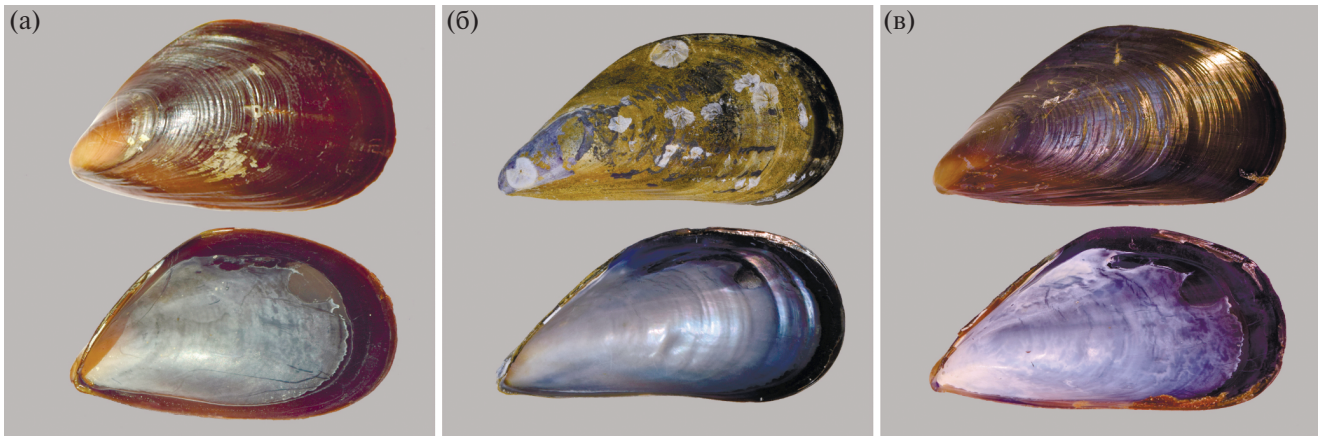


Рис. 2. Образцы раковин исследованных моллюсков: а – *Mytilus trossulus* (L = 32.9 мм), б – *M. galloprovincialis* (L = 35.9 мм), в – гибридные формы (L = 52.3 мм).

форм из общего района обитания в б. Миносок зал. Петра Великого Японского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Особи мидий *Mytilus trossulus* и *M. galloprovincialis*, а также их гибридных форм были собраны 20 октября 2019 г. из обрастания канатов заброшенной коллекторной установки для выращивания гребешка в б. Миносок зал. Петра Великого (42°36'57" С 130°51'84" В) (рис. 1).

Определение отобранных мидий и их гибридных форм проводили по морфологическим признакам (Кепель, Озолинш,1992; Золотарев, 2002). У *M. trossulus* призматический слой проходит под всем лигаментом полосой, доходящей до вершины раковины. Нижний край раковины округлый. Отпечаток заднего ретрактора примыкает к кайме (рис. 2а).

У *M. galloprovincialis* призматический слой не заходит под лигамент. Нижний край раковины угловат. Отпечаток заднего ретрактора отделен

от каймы светлой полоской перламутрового слоя (рис. 2б). У гибридных форм призматический слой заходит под лигамент частично (примерно до середины). Отпечаток заднего ретрактора может примыкать или отставать от каймы в зависимости от степени гибридизации (рис. 2в).

Годовалых моллюсков отбирали с глубины 2–3 м по 25 экз. для каждой группы. Гонады всех отловленных особей находились в постнерестовом состоянии. У каждого отобранного экземпляра взвешиванием определяли массу сырой (WW, г) и сухой ткани целиком (DW, г), а также массу створок (SW, г). Кроме того, штангенциркулем измеряли длину створки (L) моллюсков (L, мм) (табл. 1).

Кондиционный индекс рассчитывали по следующей формуле: $CI = \frac{WW}{SW} \times 100$, где CI – индекс кондиции, %; WW – масса сырой ткани; SW – масса створок моллюсков (Davenport, Chen, 1987).

Для микроэлементного анализа 25 отобранных мидий объединяли в пять проб по 5 экз. в каждой, которые далее анализировали как отдельные.

Таблица 1. Размерно-весовые характеристики *Mytilus trossulus*, *M. galloprovincialis* и их гибридных форм (n = 25)

Объект	L, мм	SW, г	DW, г	CI, %
<i>Mytilus trossulus</i>	32.6 ± 5.81	0.77 ± 0.19*	0.12 ± 0.03*	66 ± 15*
<i>M. galloprovincialis</i>	35.9 ± 7.32*	1.69 ± 0.84*	0.22 ± 0.07*	52 ± 12
Гибридные формы	54.0 ± 3.53*	4.67 ± 0.74*	0.44 ± 0.06*	37 ± 4*

* Достоверно различающиеся значения (при p = 0.05).

Примечание. Условные обозначения: L – длина створок, SW – масса створок, DW – сухая масса ткани целиком, CI – индекс кондиции.

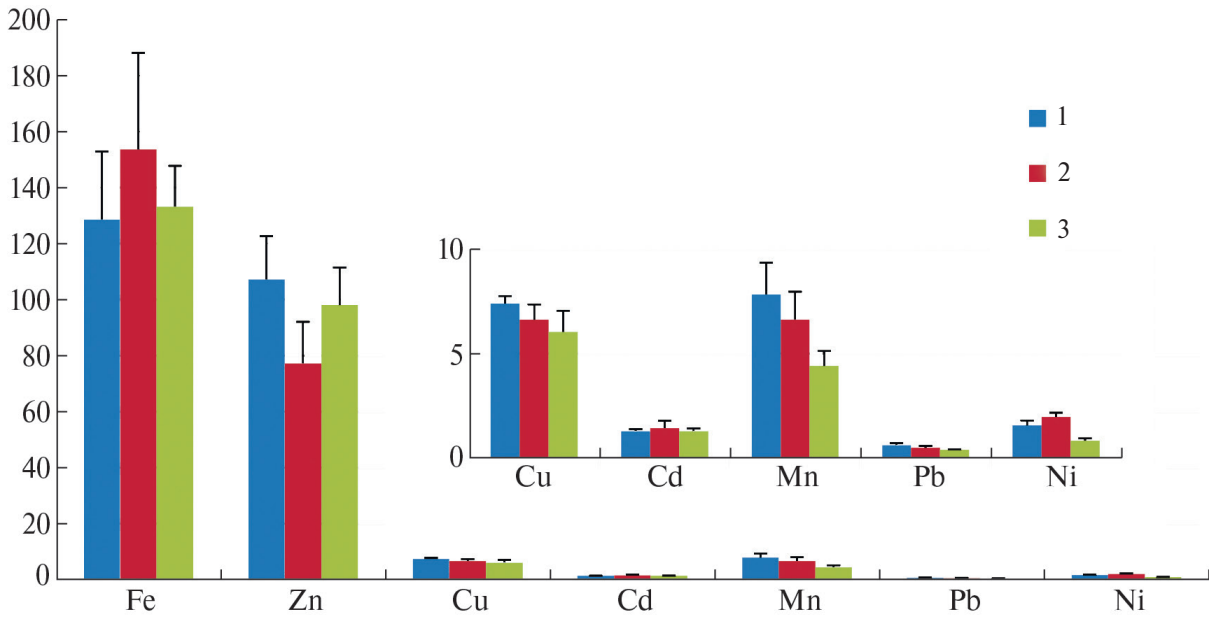


Рис. 3. Средние концентрации металлов (мкг/г сух. массы) в мягких тканях целиком (n = 5): 1 – *Mytilus trossulus*, 2 – *M. galloprovincialis*, 3 – гибридные формы.

Мягкие ткани мидий сушили при температуре 85 °С до постоянной массы, затем гомогенизировали, растирая в агатовой ступке. Навеску 0.5 г минерализовали концентрированной азотной кислотой в микроволновой установке Mars-6 и переводили в раствор 1М HNO₃. Определение количества металлов проводили методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС)

на приборе Shimadzu 6800 с пламенной и электротермической атомизацией в лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН (Центр коллективного пользования ЦЛЭДГИС). Правильность анализа контролировали регулярным разложением холостых проб и анализом стандартного образца тканей мидий ERM-CE278k. Воспроизводимость стандарта составляла 103–112%.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона для исследованных металлов в тканях *Mytilus trossulus*, *M. galloprovincialis* и их гибридных форм, а также размерно-весовых характеристик их раковин и тканей

Пере- менная	Fe	Zn	Cu	Cd	Mn	Pb	Ni	CI	L	SW	DW
Fe	1.00										
Zn	-0.18	1.00									
Cu	0.15	-0.07	1.00								
Cd	0.50	0.08	0.35	1.00							
Mn	0.33	0.48	0.60	0.25	1.00						
Pb	0.18	-0.38	0.65	0.14	0.71	1.00					
Ni	0.48	0.29	0.41	0.32	0.71	0.45	1.00				
CI	-0.42	-0.01	0.31	-0.15	0.39	0.67	0.29	1.00			
L	-0.20	-0.10	-0.66	-0.14	-0.89	-0.74	-0.81	-0.60	1.00		
SW	-0.13	-0.06	-0.67	-0.19	-0.84	-0.79	-0.77	-0.70	0.98	1.00	
DW	-0.24	0.10	-0.77	-0.25	-0.85	-0.77	-0.79	-0.54	0.96	0.96	1.00

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения с вероятностью $p < 0.05$. Условные обозначения: CI – индекс кондиции, %; L – длина створок, мм; SW – масса створок, г; DW – сухая масса ткани целиком, г.

Таблица 3. Нагрузки факторов, полученных методом главных компонент и вращением квартимакс при анализе концентраций металлов и размерно-весовых характеристик раковин и тканей исследованных моллюсков

Переменная	Факторы		
	1	2	3
Fe	0.266983	0.785573	-0.314144
Zn	0.103628	-0.623205	-0.711903
Cu	0.751892	0.020716	-0.235082
Cd	0.287001	0.591851	-0.482020
Mn	0.896058	0.095808	-0.006966
Pb	0.841085	-0.300286	-0.316525
Ni	0.784890	0.431095	0.341271
CI	0.600295	-0.656396	0.200120
L	-0.967138	0.020807	-0.188901
SW	-0.975722	0.111549	-0.126044
DW	-0.975726	-0.021275	-0.052820
Объясняемая дисперсия	6.055911	2.085603	1.204211
Доля объясняемой дисперсии	0.550537	0.189600	0.109474

Примечание. Жирным шрифтом выделены нагрузки, превышающие 0.7 (50% и более дисперсии переменной объясняется данным фактором). Условные обозначения: CI – индекс кондиции, %; L – длина створок, мм; SW – масса створок, г; DW – сухая масса ткани целиком, г.

Средние концентрации металлов в тканях мидий исследованных видов и их гибридных форм сравнивали по непараметрическому критерию Манна-Уитни. Статистические параметры (среднее, стандартное отклонение, коэффициенты корреляции) результатов анализа определяли в программе Excel. Тест на нормальность распределения данных проводили по критерию Шапиро-Уилка, $p < 0.05$. Факторный анализ был проведен с использованием программы STATISTICA 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по размерно-весовым характеристикам исследованных видов моллюсков и их гибридных форм представлены в табл. 1.

Максимальными показателями этих характеристик обладали гибридные формы, которые достоверно отличались длиной и массой раковины, а также массой сухих тканей целиком от своих родительских видов. Кондиционный индекс, напротив, был достоверно меньшим у гибридных форм по сравнению с двумя исследованными видами моллюсков.

Данные по содержанию исследованных металлов в мягких тканях целиком двух видов мидий и их гибридных форм приведены на рис. 3.

Достоверных различий в накоплении Fe и Cd в тканях всех исследованных групп моллюсков не выявлено. Что касается различий в содержании Zn, то этот металл в достоверно меньших количествах накапливался в тканях средиземноморской мидии *Mytilus galloprovincialis*, по сравнению с тихоокеанской *M. trossulus* и гибридными формами. Средние концентрации Cu, Mn, Pb и Ni в тканях двух исследованных видов мидий не имели достоверных различий, но их содержание в мягких тканях гибридных форм отличалось достоверно более низкими уровнями, по сравнению с родительскими видами (рис. 3).

Для изучения взаимосвязи между накоплением исследованных металлов и размерно-весовыми характеристиками створок и тканей моллюсков был проведен корреляционный анализ. Коэффициент корреляции Пирсона был рассчитан с использованием простого линейного регрессионного анализа. В целом, коэффициенты более 0.60 были статистически значимыми с вероятностью $p < 0.05$ (табл. 2).

Для Fe, Zn и Cd не выявлено достоверных связей между исследованными параметрами. Содержание Cu положительно значимо коррелировало с уровнями концентрации Mn и Pb, и отрицательно со всеми исследованными размерно-весовыми характеристиками. Уровень накопления Mn в тканях моллюсков также положительно коррелировал с содержанием в них Cu, Pb и Ni, и отрицательно со всеми исследованными размерно-весовыми характеристиками (табл. 2). Длина, масса створок и сухая масса тканей целиком закономерно положительно коррелировали между собой с самыми высокими коэффициентами (0.96 и 0.98) и отрицательно с индексом кондиции. Тестирование не показало значимой зависимости накопления всех исследованных металлов, за исключением Pb, от индекса кондиции (табл. 2).

Факторный анализ выявил три значимых фактора варимакс (с собственным значением больше 1), которые объясняли 84.8% общей дисперсии всех исследованных параметров. Самый значительный фактор (1), объясняющий 55% общей дисперсии, имел высокие значения нагрузки (более 0.7) с четырьмя металлами (Cu, Mn, Pb и Ni) и всеми размерно-весовыми характеристиками, за исключением индекса кондиции. Второй по важности фактор (2), объясняющий 18.9% общей дисперсии, имел высокий коэффициент корреляции с Fe. Фактор (3), объясняющий 10.9% общей дисперсии, имел тесную связь только с Zn (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

В б. Миносок максимальное развитие гонад у мидий наблюдается в мае, когда гонадный индекс достигает 32–48%. Нерест начинается в мае при температуре воды на поверхности 9–11 °C и продолжается до августа. Посленерестовая стадия наступает в сентябре. Личинки в планктоне появляются в первой декаде июня при температуре воды 12–15 °C. Период развития от момента оплодотворения до стадии оседания в зал. Посъета в среднем составляет 30 сут. К концу сентября оседание на субстрат завершается. Темпы линейного роста и массы тела мидий подвержены сезонным колебаниям. С ноября по апрель рост замедленный и прекращается при температуре воды ниже 7 °C. Кратковременное снижение темпов роста отмечается в сентябре, в период после нереста.

Наиболее интенсивно моллюски растут весной и летом. Наибольшей скоростью роста отличаются молодые мидии. Если в августе средний размер раковины у них 2–4 мм, то в сентябре уже 6–7 мм, в октябре 14–15 мм, к ноябрю молодые особи достигают размеров 21–24 мм, а к весне первого года жизни средний размер раковины достигает 40–55 мм (Шепель, 1986).

Полученные нами данные о размерно-весовых характеристиках исследованных видов моллюсков и их гибридных форм (табл. 2) хорошо согласуются с ранее полученными экспериментальными результатами по выращиванию гибридных форм этих мидий, отобранных в зал. Посъета (Шепель, 2010). Этим автором в эксперименте было показано, что гибридные формы исследованных видов имели более интенсивный рост как мягких тканей, так и раковины. Далее по этим показателям следовала средиземноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*, а минимальная интенсивность роста была характерна для тихоокеанской мидии *M. trossulus*. Однако по индексу кондиции именно *M. trossulus* имела максимальные показатели, прежде всего, за счет крайне низкого значения массы раковины (табл. 1). При использовании мидий в качестве организмов-мониторов именно индексу кондиции уделяется важное внимание (Azizi et al., 2018). Но проведенная нами проверка не выявила значимой зависимости накопления в тканях моллюсков всех исследованных металлов (за исключением Pb) от этого показателя.

Одним из основных факторов, определяющих биоаккумуляцию металлов и скорость их экскреции, является интенсивность роста моллюсков, которая, как правило, видоспецифична (Wang, Fisher, 1997; Cubadda et al., 2001; Azizi et al., 2018). По литературным данным у моллюсков рода *Mytilus* наиболее распространенной является отрицательная связь содержания металлов с массой их тела или отсутствие такого рода связи для отдельных металлов (Riget et al., 1996; Wang, Fisher, 1997; Mubiana et al., 2006). Принято считать, что снижение концентрации металла у более крупных особей частично вызвано эффектом разбавления из-за неравномерной скорости роста, по сравнению с накоплением металла (Кавун, 1994; Newman, 1995).

Выявленные нами достоверно более низкие уровни содержания Cu, Mn, Pb и Ni в мягких

тканях гибридных форм, несомненно, являются следствием их более интенсивного роста, что подтверждается результатами корреляционного и факторного анализов (табл. 2 и 3). Эти данные, как и отсутствие подобной связи для других исследованных металлов, хорошо согласуются с результатами работ других авторов. Интенсивный рост гибридных форм проявляется уже на стадии личинки, что и обеспечивает их более раннее оседание на субстрат (Шепель, 2010). Поэтому гибридные формы, осевшие раньше родительских видов на субстрат, и опережали их в росте. Бесспорно, этим фактом обусловлена значительная достоверная разница в интенсивности роста исследованных нами одновозрастных групп моллюсков. Достоверные различия накопления Zn в тканях двух исследованных видов мидий можно признать видоспецифичными. Отсутствие связи между накоплением этого металла и размерно-весовыми характеристиками, а также результаты факторного анализа (выделение Zn в отдельную группу) позволяют нам сделать такого рода заключение. Очевидно, более низкие уровни содержания цинка в тканях *M. galloprovincialis* (77 мкг/г сух. массы) являются результатом контроля над его накоплением в организме. Дополнительным аргументом для такого вывода являются наши неопубликованные данные о подобных различиях в накоплении цинка в тканях этих двух видов мидий из прибрежных вод о-ва Большой Пелис, отобранных на одной станции в 2019 г. (198 и 75 мкг/г сух. массы соответственно). Такого рода строгая регуляция Zn выявлена в тканях разных видов моллюсков (Подгурская, Кавун, 2012; George et al., 1978; Medas et al., 2018; Kavun, Podgurskaya, 2023), но до сих пор причины и механизмы контроля над содержанием этого металла в организме моллюсков не исследованы. Вероятно, содержание Zn в мягких тканях *M. galloprovincialis* также регулируется на уровне 80 мкг/г сух. массы. Однако для проверки факта строгого регулирования накопления Zn в тканях средиземноморской мидии *M. galloprovincialis* требуется дополнительное исследование и в других совместных районах обитания этих видов.

Таким образом, проведенная сравнительная оценка содержания Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb и Ni в мягких тканях двустворчатых моллюсков *M. trossulus*, *M. galloprovincialis* и их гибридных форм

из б. Миноносок зал. Петра Великого (Японское море) показала, что последние имели более интенсивный рост и на этом фоне накапливали достоверно меньшие концентрации Cu, Mn, Pb и Ni по сравнению с родительскими видами. Выявлена достоверная отрицательная корреляционная связь между накоплением этих металлов в тканях моллюсков и длиной и массой их раковин. *M. trossulus*, имевшая достоверно меньшую длину и массу створок, отличалась от *M. galloprovincialis* накоплением достоверно больших концентраций Zn. При этом не обнаружено связи его содержания со всеми исследованными размерно-весовыми характеристиками. Проведенное тестирование не выявило значимой зависимости накопления всех исследованных металлов (за исключением Pb) от индекса кондиции у всех исследованных групп моллюсков. Полученные результаты указывают на необходимость учета особенностей микроэлементного состава мягких тканей моллюсков при использовании их в мониторинге загрязнения среды тяжелыми металлами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников ННЦМБ ДВО РАН Е.Б. Лебедева и А.А. Кепеля за отбор проб моллюсков и их видовое определение, а также за помощь, оказанную при оформлении рукописи к печати. Автор выражает искреннюю признательность руководителю ЦКП ЦЛЭДГИС ТИГ ДВО РАН д-ру геогр. наук В.М. Шулькину и вед. инженеру Лаборатории геохимии Г.А. Власовой за помощь в проведении анализа проб моллюсков на содержание в них тяжелых металлов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского в рамках темы гос. задания № 1021062912499-0 “Динамика морских экосистем, адаптации морских организмов и сообществ к изменениям среды обитания”. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все экспериментальные процедуры с животными, необходимые для проведения данного исследования, были одобрены комиссией по биомедицинской этике Национального научного центра морской биологии ДВО РАН (выписка из заседания комиссии № 2-201123 от 20 ноября 2023 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Золотарев В.Н. Морфологические различия мидий группы *Mytilus edulis* // Вісник Житомирського університету. 2002. Вип. 10. Біологічні науки. С. 5–8.
- Кавун В.Я. Возрастная динамика микроэлементного состава тканей долгоживущих митилид *Crenomytilus grayanus* и *Modiolus kurilensis* // Биол. моря. 1994. Т. 20. № 1. С. 62–67.
- Кавун В.Я., Христофорова Н.К., Шулькин В.М. Микроэлементный состав тканей мидии съедобной из прибрежных вод Камчатки и северных Курил // Экология. 1989. № 3. С. 53–58.
- Картавец Ю.Ф., Католикова М.В., Шарина С.Н. и др. Популяционно-генетическое исследование зоны гибридизации *Mytilus trossulus* Gould, 1850 и инвазивного вида *M. galloprovincialis* Lamarck, 1819 (Bivalvia: Mytilidae) в заливе Петра Великого Японского моря // Биол. моря. 2014. Т. 40. № 3. С. 220–228.
- Кепель А.А., Озолини А.В. Морфометрический анализ мидий рода *Mytilus* (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) морей СССР // Зоол. журн. 1992. Т. 71. № 9. С. 33–40.
- Лутаенко К.А., Колпаков Е.В. Расширение ареала инвазивной мидии *Mytilus galloprovincialis* (Bivalvia: Mytilidae) в Японском море // Бюллетень 104 Дальневосточного малакологического общества. 2016. Т. 20. № 1. С. 57–76.
- Подгурская О.В., Кавун В.Я. Оценка адаптационно-защитного потенциала двустворчатых моллюсков *Modiolus modiolus* (Linnaeus, 1758) и *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) в условиях повышенного содержания тяжелых металлов в среде // Биол. моря. 2012. Т. 38. № 2. С. 174–182.
- Скурихина Л.А., Картавец Ю.Ф., Чичвархин А.Ю., Панькова М.В. Исследование двух видов мидий *Mytilus trossulus* и *Mytilus galloprovincialis* (Bivalvia, Mytilidae) и их гибридов в заливе Петра Великого Японского моря с помощью ПЦР-маркеров // Генетика. 2001. Т. 37. № 12. С. 1717–1720.
- Христофорова Н.К., Кавун В.Я. Мониторинг состояния вод дальневосточных морей по мидиям-областателям навигационных буев // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300. № 5. С. 1274–1276.
- Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука, 1989. 192 с.
- Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1993. 296 с.
- Шепель Н.А. Биологические основы культивирования мидии съедобной в Южном Приморье // Биол. моря. 1986. № 4. С. 14–21.
- Шепель Н.А. Рост гибридных форм мидий и методы воспроизводства их в Приморье // Вопр. рыболовства. 2010. Т. 11. № 1. С. 132–147.
- Шулькин В.М., Кавун В.Я. Концентрация металлов в тканях митилиды *Septifer bilocularis* (Linnaeus, 1758) (Bivalvia) как возможный индикатор качества вод коралловых рифов у побережья Вьетнама // Биол. моря. 2018. Т. 44. № 1. С. 58–65.
- Шулькин В.М., Кавун В.Я. Долговременный мониторинг загрязнения прибрежной акватории Уссурийского залива металлами на примере “зеленых” устриц *Magallana gigas* (= *Crassostrea gigas*) (Thunberg, 1793) // Биол. моря. 2023. Т. 49. № 2. С. 105–113.
- Azizi G., Akodad M., Baghour M. et al. The use of *Mytilus* spp. Mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review // J. Mater. Environ. Sci. 2018. № 9. V. 4. P. 1170–1181.
- Cubadda F., Conti M.E., Campanella L. Size-dependent concentrations of trace metals in four Mediterranean gastropods // Chemosphere. 2001. V. 45. P. 561–569.
- Davenport J., Chen X. A comparison of methods for the assessment of condition in the mussel (*Mytilus edulis* L.) // J. Moll. Stud. 1987. V. 53. P. 293–297.
- George S.G., Piris B.J.S., Cheyne A.R. et al. Detoxification of metals by marine bivalves: An ultrastructural study of the compartmentation of Cu and Zn in the oyster *Ostrea edulis* // Mar. Biol. 1978. V. 45. P. 147–156.
- Goldberg E.D., Koide M., Hodge V. et al. US Mussel Watch: 1977–1978 results on trace metals and radionuclides // Estuar. Coast. Shelf. Sci. 1983. V. 16. P. 69–93.
- Heath D.A., Rawson P.D., Hilbish T.J. PCR-based nuclear markers identify alien blue mussel (*Mytilus* spp.) genotypes on the west coast of Canada // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1995. V. 52. P. 2621–2627.
- Hilbish T.J., Carson E.W., Plante J.R. et al. Distribution of *Mytilus edulis*, *M. galloprovincialis*, and their hybrids in open-coast populations of mussels in southwestern England // Mar. Biol. 2002. V. 140. P. 137–142.
- Inoue K., Odo S., Nakao S. et al. A possible hybrid zone in the *Mytilus edulis* complex in Japan revealed by PCR markers // Mar. Biol. 1997. 128. V. 1. P. 91–95.

- Ivanova M.B., Lutaenko K.B. On the distribution of *Mytilus galloprovincialis* Lamark, 1819 (Bivalvia, Mytilidae) in Russian Far Eastern seas // Bull. Inst. Malacology. 1998. V. 3. № 5. P. 67–71.
- Kartavtsev Y.Ph., Chichvarkhin A.Y., Kijima A. et al. Allozyme and morphometric analysis of two common mussel species of *Mytilus* genus (Mollusca, Mytilidae) in Korea, Japan and Russia waters // Korean J. Genet. 2005. V. 27. № 4. P. 289–306.
- Kartavtsev Y.P., Masalkova N.A., Katolikova M.V. Genetic and morphometric variability in settlements of two mussel species (*Mytilus* ex. gr. *Edulis*), *Mytilus trossulus* and *Mytilus galloprovincialis*, in the northwestern Sea of Japan // J. Shell. Res. 2018. V. 37. № 1. P. 103–119.
- Kavun V.Ya., Podgurskaya O.V. Spatial variation of cadmium concentration in the bivalve *Begonia semiorbiculata* (Linnaeus, 1758) from coastal coral reefs of Vietnam // Mar. Poll. Bull. 2023. V. 191. 114837.
- Kavun V.Ya., Shulkin V.M., Khristoforova N.K. Metal accumulation in mussels of the Kuril Islands, north-west Pacific Ocean // Mar. Environ. Res. 2002. V. 53. № 3. P. 219–226.
- Medas D., Carlomagno I., Meneghini C. et al. Zinc incorporation in marine bivalve shells grown in mine-polluted seabed sediments: a case study in the Malfidano mining area (SW Sardinia, Italy) // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. V. 25. P. 36645–36660.
- Mubiana V.K., Vercauteren K., Blus R. The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis* // Environ. Pollut. 2006. V. 144. P. 272–279.
- Newman M.C. Quantitative methods in aquatic ecotoxicology // CRC Press. 1995. P. 94–98.
- Phillips D.J.H. The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper: effects of environmental variables on uptake of metals. // Mar. Biol. 1976. V. 38. P. 59–69.
- Rainbow P.S., Phillips D.J.H. Cosmopolitan biomonitors of trace metals // Mar. Poll. Bull. 1993. V. 26. P. 593–601.
- Riget F., Johansen P., Asmund G. Influence of length on element concentrations in blue mussels *Mytilus edulis* // Mar. Pollut. Bull. 1996. V. 32. P. 745–751.
- Wang W.-X., Fisher N.S. Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis* // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1997. V. 161. P. 103–115.

A Comparative Assessment of Content of a Number of Heavy Metals in Soft Tissues of *Mytilus trossulus* A. Gould, 1850, *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 (Bivalvia: Mytilidae) and Their Hybrid Forms From Minonosok Bay of Peter the Great Bay (Sea of Japan)

V. Ya. Kavun^a

^aZhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041 Russia

A comparative assessment of the content of Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb, and Ni in the soft tissues of bivalve mollusks *Mytilus trossulus*, *M. galloprovincialis* and their hybrid forms from Minonosok Bay of Peter the Great Bay (Sea of Japan) has been made. No significant differences in the accumulation of Fe and Cd in the tissues of all studied groups of mollusks were found. It has been shown that the hybrid forms of these species had more intensive growth, and against this background, they accumulated significantly lower concentrations of such metals as Cu, Mn, Pb and Ni in their soft tissues compared to the parental species. A significant negative correlation has been found between the accumulation of these metals in the tissues of mollusks and the length and weight of their shells and whole soft tissues. *M. trossulus*, which had a significantly lower weight of valves and soft tissues, differed from *M. galloprovincialis* in the accumulation of significantly higher concentrations of Zn, for which no relationship has been found between its content and all the studied size and weight characteristics. The conducted testing has not revealed any significant dependence of the accumulation of all studied metals, with the exception of Pb, in the tissues of mollusks on their condition index. The results obtained indicate the need to take into account the above features of the trace metal composition of the soft tissues of the studied species, when using them in monitoring environmental pollution with heavy metals.

Keywords: Sea of Japan, Peter the Great Bay, *Mytilus trossulus*, *M. galloprovincialis*, hybrid forms, heavy metals, monitoring