

Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя

Н. В. Поспелова*, А. С. Приймак, В. И. Рябушко

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

*e-mail: nypospelova@mail.ru

Поступила 20.09.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

Двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis* выращены на мидийно-устричной ферме в прибрежных водах г. Севастополя (Черное море). Данный район характеризуется гидролого-гидрохимическими и гидробиологическими условиями, благоприятными для выращивания двустворчатых моллюсков и функционирования марихозейства, что имеет большое социально-экономическое значение для этого региона. Устойчивое развитие аквакультуры основано на выращивании безопасного продукта. В мидиях могут накапливаться вещества, опасные для здоровья человека, в том числе тяжелые металлы. Поэтому необходима региональная информация о биоаккумуляции поллютантов объектами аквакультуры. Цель данной работы – определить содержание микроэлементов Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, As, Cu и Zn в мягких тканях и раковинах мидии, культивируемой на взморье г. Севастополя. Для аналитического определения концентраций элементов в тканях и раковинах мидий использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Средние концентрации тяжелых металлов в мягких тканях мидий промышленного размера (более 50 мм) не превышали предельно допустимой концентрации для пищевых продуктов, за исключением As, концентрация которого в 2.2 раза превосходила ПДК. Мягкие ткани мидий меньшего размера накапливали Cu, Cd, Zn и As в концентрациях, превышающих предельно допустимую концентрацию. Для моллюсков с размером раковины более 50 мм концентрации микроэлементов в мягких тканях по степени убывания составляли следующий ряд: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. Концентрации элементов в раковинах мидий по степени убывания представляют ряд: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. Отмечено, что при мониторинговых исследованиях фонового содержания поллютантов в воде с помощью мидий, обеспечения безопасности использования мидий в пищу и для биотехнологических целей следует отбирать пробы моллюсков разных размерных групп.

Ключевые слова: тяжелые металлы, мышьяк, *Mytilus galloprovincialis*, марикультура, Черное море.

© Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в рамках научного проекта № 20-44-925001, а также в рамках темы НИР государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 121030300149-0).

Для цитирования: Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И. Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 67–80. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-67-80

Chemical Composition of Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea)

N. V. Pospelova*, A. S. Priimak, V. I. Ryabushko

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: nvpospelova@mail.ru

Submitted 20.09.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

Mytilus galloprovincialis is cultivated at the mussel-oyster farm at the seashore of Sevastopol (Black Sea). The hydrochemical and hydrobiological conditions of this water area are too favourable enough to maintain the seafarm, therefore it is of great economical importance for our region. Sustainable development of aquaculture is based on producing qualitative and harmless food. A lot of harmful for human health elements (including heavy metals) can be accumulated in mussels. Some of them are essential in low concentrations and toxic in extra-increased values. The concentration of heavy metals in mollusks indicates their availability for living organisms which is important in terms of using bivalves as a food source. That is why information on bioaccumulation of pollutants by bivalves is required at the regional level. The aim of this work is to determine the concentration of trace elements Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, As, Cu, Zn in tissues and shells of mussel cultivating at the seashore of Sevastopol. The average trace metals concentration in tissues of mussels with commercial value (>50 mm) didn't exceed threshold limit value (TLV) excluding As. The concentration of As was 2.2 times more than TLV. Generally the concentration of elements in tissues is looked as: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. The concentration of elements in mussels' shells is looked as: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. It is noticed that using mussels of different size groups for indication the level of water pollution or biotechnology is necessary.

Keywords: metals, arsenic, cultivated mussels, *Mytilus galloprovincialis*, Black Sea.

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of Sevastopol (project number 20-44-925001), and also by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant no. 121030300149-0).

For citation: Pospelova, N.V., Priimak, A.S. and Ryabushko, V.I., 2021. Chemical Composition of Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 67–80. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-67-80 (in Russian).

Аквакультура мидий является важным источником органических веществ, а также способом биотического самоочищения морской среды от загрязняющих веществ. Морские фермы чаще всего устанавливаются в районах с высокой продуктивностью вод, которые в то же время являются зонами повышенного антропогенного воздействия. В настоящее время аквакультура двустворчатых моллюсков в прибрежных водах Крыма интенсивно развивается. На внешнем рейде Севастопольской бухты более 20 лет функционирует ферма по выращиванию мидий и устриц. Мидий здесь выращивают на веревочных коллекторах, производительность марихозяйства в разные годы составляла от 10 до 50 тонн в год. Многочисленные исследования гидролого-гидрохимических и гидробиологических параметров [1–4] показали, что данный район является благоприятным для выращивания двустворчатых моллюсков и функционирования марихозяйства, что имеет большое социально-экономическое значение для этого региона.

Устойчивое развитие аквакультуры основано на выращивании безопасного продукта. Ряд веществ, опасных для здоровья человека, в том числе тяжелые металлы, могут накапливаться в мидиях. Некоторые из них являются эссенциальными при низких концентрациях и становятся токсичными при избытке. Многие морские моллюски естественным образом накапливают металлы, даже когда их содержание ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) в воде [5–7]. Поэтому анализ содержания металлов в моллюсках активно используют для биомониторинговых исследований. Одна из наиболее распространенных программ мониторинга загрязнений морской среды *Mussel Watch*, в которой используют мидий, длится уже более 40 лет [8]. За последние десятилетия проведено множество измерений концентраций тяжелых металлов в тканях и раковинах разнообразных видов морских двустворчатых моллюсков. Такой интерес обусловлен тем, что концентрации металлов в моллюсках могут указывать на биодоступность этих элементов в среде, что необходимо учитывать для безопасного потребления морепродуктов человеком.

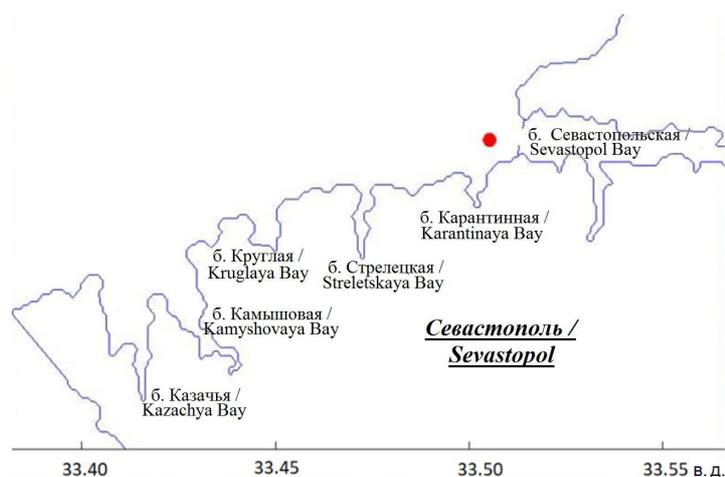
С целью уменьшения загрязнения культивируемых двустворчатых моллюсков металлами необходимо учитывать факторы, влияющие на биоаккумуляцию поллютантов. Такими факторами могут быть условия окружающей среды, размер раковины и возраст моллюсков, стадия репродуктивного цикла, качество и количество пищи и др. [7, 9–11]. Размер моллюсков является одним из наиболее важных факторов, определяющих накопление металлов в организме, поскольку он связан с возрастом и весом моллюсков/мидий, а также усвояемостью пищи. Показаны различия в концентрации металлов в тканях моллюсков в зависимости от размера и веса мягких тканей [12, 13]. Также отмечена индивидуальная изменчивость содержания металлов в тканях моллюсков [12, 14, 15]. В связи с этим многие исследователи определяют концентрации металлов в тканях моллюсков одного размера, чтобы избежать высокой вариабельности при получении экспериментальных данных. Однако если рассматривать моллюсков как безопасный пищевой продукт, такой подход неприемлем, поскольку промысловый размер моллюсков имеет широкий диапазон и может быть расширен производителем.

Большое количество литературы посвящено изучению концентрации металлов в моллюсках из природных популяций. Однако работы, в которых приведены данные по зависимости концентрации металлов от размера раковины культивируемых мидий, немногочисленны [12, 16]. К тому же все мониторинговые исследования проводятся большей частью по накоплению металлов в мягких тканях моллюсков. Данные по одновременному накоплению металлов в мягких тканях и раковинах мидий ограничены, в особенности для моллюсков разных размерных групп. Известно, что культивируемые мидии используются также для изготовления биологически активных добавок, удобрений, кормов для животных и т. д. [17–20]. Поэтому необходима региональная информация о биоаккумуляции поллютантов объектами аквакультуры. Таким образом, цель данной работы – определить содержание элементов, преимущественно тяжелых металлов, в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя.

Материал и методы

Образцы мидий, выращенных на мидийно-устричной ферме, собраны в феврале 2020 г. с глубины 6–8 м с веревочных коллекторов на внешнем рейде Севастопольской бухты (44°44'34" с. ш. 33°32'6" в. д.) (рис. 1). В лаборатории мидии были разделены на размерные группы по длине раковины (10–20, 20–30, 30–40, 40–50 и ≥ 50 мм). В каждой размерной группе отбирали по 10 экземпляров. Мягкие ткани отделяли от раковин, взвешивали ткань, после чего сушили в шкафу при $t = 105$ °С до постоянной массы. Сухие ткани и раковины измельчали в фарфоровой ступке.

Подготовку проб мягких тканей и раковин мидий проводили методом кислотной минерализации в соответствии с ГОСТ Р 53218-2008. Аналитическое определение концентраций элементов в пробах осуществляли в НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant*



Р и с . 1 . Район исследования

Fig. 1. Study area

MS Elite (Analytik Jena AG, Германия) в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 и руководством по эксплуатации прибора. По измеряемым элементам прибор калибровали с использованием специального мультиэлементного стандартного раствора IV-28 (*Inorganic Ventures, США*). Ошибка при определении большинства исследуемых элементов составляла не более 10 %. Концентрацию токсичных элементов рассчитывали в мкг на 1 г сухой массы. Для сравнения полученных данных с ПДК (Технический регламент Таможенного союза) использовали коэффициент перехода от сырой массы к сухой, который для мягких тканей мидий в среднем равен 5.3 [21].

Статистический анализ проводили с использованием пакета, встроенного в *MS Office Excel*. Данные в табл. 1–2 представлены как средняя концентрация металла *MC*, стандартная ошибка *SI* и коэффициент вариации *CV*.

Результаты и обсуждение

Концентрации тяжелых металлов и As в мягких тканях мидий

Средние концентрации тяжелых металлов (ТМ) и As в мягких тканях мидий промышленного размера (размер раковины более 50 мм, согласно Правилам рыболовства¹⁾) не превышали ПДК для пищевых продуктов, за исключением As, концентрация которого превосходила ПДК в 2.2 раза (табл. 1). Коэффициенты вариации концентраций ТМ и As довольно высокие для всех размерных групп мидий и изменялись от 37.8 до 97.1 %.

Полученные концентрации были такими же или несколько превышали значения, приведенные для мидий природных и искусственных поселений из других регионов Черного моря [21, 22–26]. Проведенные ранее исследования по содержанию As в мягких тканях культивируемых мидий, отобранных на этой же ферме и в сопредельных районах, не показали превышения ПДК, а максимальные концентрации были меньше 5 мкг/г сухой массы мягкой ткани [27–30]. Для моллюсков с размером раковины более 50 мм концентрации ТМ и As в мягких тканях по степени убывания составляли следующий ряд: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. У мидий меньших размерных групп тенденция расположения ТМ в порядке убывания сохранялась, за исключением As, концентрация которого превышала концентрацию Mn в размерных группах 10–40 мм. Мягкие ткани мидий с размером раковины менее 50 мм накапливали As и Cd в концентрациях, превышающих ПДК.

Концентрации ТМ и As в раковинах мидий

Средние концентрации ТМ и As в раковинах мидий соответствовали значениям, полученным ранее для черноморских мидий [21–23]. Концентрации ТМ и As в раковинах мидий по степени убывания представляют следующий ряд: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. Коэффициенты вариации концентраций ТМ и As довольно высокие во всех размерных группах мидий и варьируют от 2.1 до 98.1 % (табл. 2).

¹⁾ Правила рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна в ред. от 28.07.2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-09012020-n-1/> (дата обращения 13.12.2021).

Таблица 1. Концентрация ТМ и Ас в мягких тканях мидий разных размерных групп (L)

Table 1. Heavy metal and As concentration in soft tissues of mussels of different size groups (L)

Элемент / Element	L, мм / L, mm					ПДК [23], мкг/г сух. / TLV [23], µg/g dry
	10-20	20-30	30-40	40-50	≥50	
Cu	<u>717.5 ± 212.8</u> 40.0	<u>409.1 ± 346.8</u> 84.4	<u>394.4 ± 116.5</u> 63.9	<u>82.1 ± 27.9</u> 52.1	<u>71.0 ± 16.1</u> 54.4	–
Zn	<u>1389.2 ± 683.9</u> 66.5	<u>315.8 ± 117.5</u> 50.2	<u>620.7 ± 261.4</u> 91.1	<u>164.0 ± 61.2</u> 57.1	<u>114.6 ± 28.7</u> 60.0	–
Cd	<u>28.4 ± 12</u> 57.2	<u>7.4 ± 3.0</u> 54.7	<u>13.6 ± 4.5</u> 72.4	<u>4.8 ± 2.1</u> 66.9	<u>3.3 ± 0.7</u> 53.8	10.6
Pb	<u>25.7 ± 10.7</u> 56.5	<u>11.9 ± 5.8</u> 65.6	<u>14.7 ± 6.0</u> 88.6	<u>4.2 ± 1.7</u> 63.6	<u>3.2 ± 0.9</u> 64.8	50.3
As	<u>234.4 ± 104.3</u> 60.1	<u>69.3 ± 39.3</u> 76.5	<u>128.0 ± 47.3</u> 80.0	<u>55.4 ± 35.9</u> 97.1	<u>23.5 ± 10.4</u> 85.6	10.6
Hg	<u>0.6 ± 0.2</u> 37.8	<u>0.8 ± 0.4</u> 86.2	<u>0.6 ± 0.2</u> 80.9	<u>0.1 ± 0.04</u> 53.7	<u>0.1 ± 0.04</u> 53.4	1.06
Mn	<u>51.0 ± 21.6</u> 57.2	<u>30.9 ± 23.0</u> 80.7	<u>68.4 ± 43.5</u> 87.8	<u>72.7 ± 57.2</u> 85.8	<u>88.9 ± 66.7</u> 89.6	–
Ni	<u>5.9 ± 2.4</u> 55.9	<u>1.6 ± 0.7</u> 58.9	<u>4.0 ± 1.4</u> 74.0	<u>1.4 ± 0.8</u> 86.7	<u>0.9 ± 0.3</u> 72.5	–
Co	<u>27.6 ± 9.9</u> 48.2	<u>11.0 ± 5.5</u> 67.8	<u>15.0 ± 6.3</u> 90.2	<u>2.0 ± 1.0</u> 74.7	<u>3.2 ± 1.2</u> 90.3	–

Примечание. Жирным выделены значения, превышающие ПДК. Над чертой $MC \pm SI$ (при $p \geq 0.05$), мкг/г сухой массы; под чертой – CV , %.
 MC – средняя концентрация элемента; SI – стандартная ошибка; CV – коэффициент вариации.

Note. Values exceeding TLV are given in bold. Above the line is $MC \pm SI$ (at $p \geq 0.05$), µg/g of dry weight; below the line is CV , %. MC – mean element concentration; SI – standard error; CV – coefficient of variation; TLV – threshold limit value.

Таблица 2. Содержание ТМ и As в раковине мидий разных размерных групп (L)
 Table 2. Heavy metal and As concentration in the shell of mussels of different size groups (L)

Элемент / Element	L, мм / L, mm				
	10–20	20–30	30–40	40–50	≥50
Cu	5.1 ± 0.5	3.3 ± 1.2	2.8 ± 1.5	3.5 ± 2.2	2.9 ± 0.7
	11.6	54.3	92.3	98.1	49.2
Zn	109.1 ± 3.5	62.2 ± 13.8	35.3 ± 12.6	37.2 ± 9.7	38.9 ± 7.5
	3.6	32.1	60.3	42.1	40.5
Cd	0.7 ± 0.5	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.3	1.1 ± 0.8	0.8 ± 0.4
	78.1	51.2	92.6	86.9	89.7
Pb	1.4 ± 1.1	1.1 ± 0.4	0.8 ± 0.2	1.7 ± 1.4	1.0 ± 0.2
	90.2	54.2	37.3	93.5	38.2
As	1.0 ± 0.03	1.3 ± 0.3	1.7 ± 0.8	2.2 ± 0.9	3.1 ± 0.8
	3.7	31.0	79.6	63.9	54.1
Hg	0.1 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02
	10.2	67.7	88.7	73.3	91.1
Mn	9.8 ± 0.9	7.4 ± 1.1	9.4 ± 3.6	11.3 ± 5.0	8.2 ± 1.7
	11.0	20.6	65.2	68.0	42.4
Ni	1.6 ± 0.8	1.4 ± 0.4	1.5 ± 0.5	2.6 ± 1.4	1.4 ± 0.3
	55.3	43.2	59.9	83.8	47.9
Co	38.6 ± 0.7	31.1 ± 4.4	30.9 ± 7.4	36.1 ± 8.9	35.6 ± 7.3
	2.1	20.3	40.7	37.9	43.3

Примечание. Над чертой $MC \pm SI$ (при $p \geq 0.05$), мкг/г сухой массы; под чертой – CV , %. MC – средняя концентрация элемента; SI – стандартная ошибка; CV – коэффициент вариации.

Note. Above the line is $MC \pm SI$ (at $p \geq 0.05$), $\mu\text{g/g}$ of dry weight; below the line is CV , %. MC – mean element concentration; SI – standard error; CV – coefficient of variation.

Концентрация ТМ и As в мягких тканях мидий как функция массы мягких тканей и длины раковины

Зависимость содержания элементов ТМ и As в мягких тканях от сухой массы тканей статистически не достоверна (коэффициент детерминации R^2 изменяется от 0.04 до 0.29). Между концентрацией ТМ и As в тканях и длиной раковины моллюсков отмечена более тесная связь. С увеличением длины раковины содержание ТМ и As в мягких тканях несколько снижается (R^2 изменяется от 0.20 до 0.43), за исключением Mn. Отрицательная связь более выражена для Cu и Zn ($R^2 = 0.43$ и 0.41). Также не отмечена зависимость содержания ТМ в раковине мидий от веса или длины раковины (R^2 не превышал 0.1). Это показывает, что для культивируемых мидий на взморье г. Севастополя ни размер раковины, ни вес мягких тканей не являются значимыми при накоплении ТМ и As. Следует отметить, что максимальные концентрации всех ТМ (в том числе превышающие ПДК) характерны для моллюсков с размером раковины менее 50 мм и сухой массой тканей менее 0.5 г, то есть для моллюсков не промыслового размера.

Ранее показано, что для мидий рода *Mytilus* [12, 31] с увеличением размера моллюска концентрации ТМ в мягких тканях достоверно снижаются. С другой стороны, отмечено [32], что при увеличении скорости роста концентрация металлов в организме моллюсков становится независимой от массы. Однако, как указывают авторы, эти модели применимы не всегда.

Известно, что культивируемые мидии имеют бóльшую скорость роста, чем моллюски из природных популяций [33], а размеры и масса мягких тканей зависят от их скорости роста и возраста. В настоящем исследовании влияние размера и массы тканей на накопление ТМ и As незначительно, поскольку оседание на коллекторы фермы происходит синхронно и обычно все моллюски одного размера имеют примерно одинаковый возраст. Отсутствие зависимости концентрации ТМ в раковинах мидий от веса и длины раковины может указывать на консервативность раковин в отношении накопления ТМ.

Отмечена высокая индивидуальная вариабельность концентраций всех ТМ и для мягких тканей, и для раковин. Такая изменчивость в накоплении металлов мидиями отмечена ранее и для других районов [12, 14, 15], что характерно как для культивируемых моллюсков, так и для мидий из природных популяций [34]. Такой высокий уровень вариабельности может быть связан с изменчивостью внешних факторов среды и с физиологическими особенностями организма (скорость фильтрации, стадия зрелости гонад, пол и т. д.) [7, 9, 10, 15].

Мидия *M. galloprovincialis* в условиях культивирования в Черном море достигает промысловых размеров за 1.5–2 года в зависимости от времени оседания личинок на коллекторы и внешних факторов [35]. В период роста моллюски интенсивнее накапливают микроэлементы, а с возрастом у них постепенно снижается метаболическая активность и концентрации ТМ в тканях стабилизируются около средних показателей, не превышающих ПДК.

Заключение

Показано, что концентрации ТМ и As в мягких тканях и раковинах культивируемых на взморье г. Севастополя мидий имеют высокую индивидуальную изменчивость и слабо зависят от размера и массы мягких тканей и раковин моллюсков. Промысловые мидии с размером раковины более 50 мм способны накапливать ТМ и As в меньших концентрациях, чем мелкие моллюски. Поскольку мидий используют в мониторинговых исследованиях для определения фонового содержания поллютантов в воде, следует отбирать образцы моллюсков разных размерных групп. Кроме того, необходим контроль содержания токсичных элементов как в культивируемых мидиях промышленного размера, так и для моллюсков других размерных групп, особенно если они используются для производства биологически активных добавок, кормов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микроводоросли эпизоона культивируемого моллюска *Mytilus Galloprovincialis* Lam. 1819, фитопланктон и гидролого-гидрохимические характеристики акватории мидийно устричной фермы (Севастополь, Чёрное море) / Л. И. Рябушко [и др.] // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 67–83. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.07

2. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Kapranov [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2020. Vol. 206. 104185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
3. Трощенко О. А., Субботин А. А., Еремин И. Ю. Изменчивость основных лимитирующих факторов среды в процессе выращивания двустворчатых моллюсков на ферме в районе Севастополя // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2019. Т. 5, № 2. С. 308–321.
4. Поспелова Н. В., Приймак А. С. Особенности питания мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam., культивируемой в прибрежье г. Севастополя // *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН*. 2021. № 1. С. 24–34. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.17.03>
5. Mance G. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments. Dordrecht : Springer, 1978. 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3421-4>
6. Wang W. X., Lu G. Heavy metals in bivalve mollusks // *Chemical Contaminants and Residues in Food (Second Edition)*. Woodhead Publishing, 2017. P. 553–594. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00021-7>
7. Stankovic S., Jovic M. Health risks of heavy metals in the mediterranean mussels as seafood // *Environmental Chemistry Letters*. 2012. Vol. 10, iss. 2. P. 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0343-1>
8. Goldberg's proposal of “the Mussel Watch”: Reflections after 40 years / J. W. Farrington [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 110, iss. 1. P. 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.074>
9. Effects of increasing temperatures on biomarker responses and accumulation of hazardous substances in rope mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from Bizerte lagoon / N. Kamel [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21, iss. 9. P. 6108–6123. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2540-5>
10. Seasonal assessment of biological indices, bioaccumulation and bioavailability of heavy metals in mussels *Mytilus galloprovincialis* from Algerian west coast, applied to environmental monitoring / O. Rouane-Hacene [et al.] // *Oceanologia*. 2015. Vol. 57, iss. 4. P. 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2015.07.004>
11. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review / G. Azizil [et al.] // *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 9, iss. 4. P. 1170–1181.
12. Richir J., Gobert S. The effect of size, weight, body compartment, sex and reproductive status on the bioaccumulation of 19 trace elements in rope-grown *Mytilus galloprovincialis* // *Ecological Indicators*. 2014. Vol. 36. P. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.021>
13. Lu G.-Y., Wang W.-X. Trace metals and macroelements in mussels from Chinese coastal waters: National spatial patterns and normalization // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.018>
14. Chernova E. N. Changes in trace metal concentrations in the tissues of the White Sea mussel *Mytilus edulis* over the reproductive cycle // *Russian Journal of Marine Biology*. 2010. Vol. 36, iss. 1. P. 63–69. <https://doi.org/10.1134/S1063074010010086>
15. Chelyadina N. S., Smirnova L. L. Variation in copper content in the cultivated mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. // *Inland Water Biology*. 2019. Vol. 12, iss. 3. P. 365–369. doi:10.1134/S1995082919030040

16. The effect of size on trace metal levels in raft cultivated mussels (*Mytilus galloprovincialis*) / Y. Saavedra [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2004. Vol. 318, iss. 1–3. P. 115–124. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00402-9)
17. Use of mussel shells as a soil amendment: Effects on bulk and rhizosphere soil and pasture production / E. Álvarez [et al.] // *Pedosphere*. 2012. Vol. 22, iss. 2. P. 152–164. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60002-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60002-2)
18. *Битютская О. Е.* Систематизация способов комплексной переработки мидий // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2019. № 5–6. С. 9–15.
19. *Morris J. P., Backeljau T., Chapelle G.* Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product // *Reviews in Aquaculture*. 2019. Vol. 11, iss. 1. P. 42–57. <https://doi.org/10.1111/raq.12225>
20. *Suplicy F. M.* A review of the multiple benefits of mussel farming // *Reviews in Aquaculture*. 2020. Vol. 12, iss. 1. P. 204–223. <https://doi.org/10.1111/raq.12313>
21. *Козинцев А. Ф.* Сезонная динамика содержания тяжелых металлов в мидии (*Mytilus galloprovincialis*) из бухты Казачья Чёрного моря // *Морской экологический журнал*. Т. 5, № 4. С. 41–47.
22. *Демина Л. Л., Будько Д. М.* Микроэлементы в карбонатной биоминерализации на примере *Bivalva Mytilus* spp. из литорали Черного моря // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11–10. С. 2185–2189.
23. *Поспелова Н. В., Смирнова Л. Л., Челядина Н. С.* Влияние культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 на поток Cu, Zn, Cd, Pb в акватории мидийной фермы (Крым, Чёрное море) // *Вода: химия и экология*. 2019. № 3–6. С. 86–91.
24. Ртуть в мидиях *Mytilus galloprovincialis* Lam. из бухт крымского побережья Черного моря / В. И. Рябушко [и др.] // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 99–107.
25. Содержание тяжелых металлов в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. из бухты Казачья Черного моря / В. И. Рябушко [и др.] // *Морські біотехнічні системи*. Вип. 2. Севастополь, 2002. С. 215–221.
26. *Козинцев А. Ф., Рябушко В. И.* Накопление тяжелых металлов в мидиях, культивируемых в бухте Казачья Черного моря // *Морські біотехнічні системи*. Вип. 2. Севастополь, 2002. С. 222–230.
27. *Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.* Концентрация мышьяка в тканях культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* lam., воде и донных осадках (Крым, Чёрное море) // *Морской биологический журнал*. 2017. Том 2, № 3. С. 68–74. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06>
28. *Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.* Концентрация мышьяка в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 из бухт Крымского полуострова (Черное море) // *Вода: химия и экология*. 2017. № 10. С. 30–36.
29. *Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.* Пространственное распределение мышьяка в прибрежье Крымского полуострова (Черное и Азовское моря) // *Вестник Московского университета. Серия 5: география*. 2020. № 4. С. 14–20.
30. *Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.* Содержание мышьяка в акватории Карадагского природного заповедника (Чёрное море) // *Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН*. 2020. Вып. 1. С. 3–9.

31. *Mubiana V. K., Vercauteren K., Blust R.* The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis* // *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 144, iss. 1. P. 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.017>
32. *Wang W.-X., Fisher N. S.* Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis* // *Marine Ecology Progress Series*. 1997. 161. P. 103–115. <https://doi.org/10.3354/meps161103>
33. *Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В.* Выращивание мидий и устриц в Чёрном море. Воронеж : ООО «ИЗДАТ-ПРИНТ», 2017. 508 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5523> (дата обращения: 10.11.2021)
34. *Daskalakis K. D.* Variability of metal concentrations in oyster tissue and implications to biomonitoring // *Marine Pollution Bulletin*. 1996. Vol. 32, iss. 11. P. 794–801. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(96\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(96)00042-2)
35. *Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Щуров С. В.* Формирование поселений мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) на коллекторах фермы в бухте Ласпи в зависимости от экологических факторов // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019. Т. 5, № 1. С. 92–106.

Об авторах:

Поспелова Наталья Валериевна, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **Researcher ID: C-7572-2016**, nvpospelova@mail.ru

Приймак Анастасия Сергеевна, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4366-474X**, **Scopus Author ID: 57215722245**, **Researcher ID: A-5754-2019**, 123klimova321@gmail.com

Рябушко Виталий Иванович, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **Researcher ID: H-4163-2014**, rabushko2006@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Поспелова Наталья Валериевна – постановка цели и задач исследования, химический анализ, анализ полученных данных и подготовка рукописи

Приймак Анастасия Сергеевна – отбор проб, подготовка проб для анализа, статистический анализ

Рябушко Виталий Иванович – научные консультации, подготовка и редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. *Ryabushko, L.I., Pospelova, N.V., Balycheva, D.S., Kovrigina, N.P., Troshchenko, O.A. and Kapranov, S.V.*, 2017. Epizoon Microalgae of the Cultivated Mollusk *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819, Phytoplankton, Hydrological and Hydrochemical Characteristics in the Mussel-and-Oyster Farm Area (Sevastopol, Black Sea). *Marine Biological Journal*, 2(4), pp 67–83. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.07

2. Kapranov, S.V., Kovrigina, N.P., Troshchenko, O.A. and Rodionova, N.Yu., 2020. Long-Term Variations of Thermohaline and Hydrochemical Characteristics in the Mussel Farm Area in the Coastal Waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018. *Continental Shelf Research*, 206, 104185. doi:10.1016/j.csr.2020.104185
3. Troshchenko, O.A., Subbotin, A.A. and Eremin, I.Yu., 2019. Variability of Main Limiting Environmental Factors in the Process of Bivalve Mollusk Cultivation at the Mussel Farm in Sevastopol. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 5(2), pp. 308–321 (in Russian).
4. Pospelova, N.V. and Priimak, A.S., 2021. The Feeding of *Mytilus galloprovincialis* Lam. Cultivating in coastal waters of Sevastopol. *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS*, (1), pp. 24–34. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.17.03> (in Russian).
5. Mance, G., 1987. *Pollution Threat of Heavy Metals in Aquatic Environments*. Dordrecht: Springer, 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3421-4>
6. Wang, W.X. and Lu, G., 2017. Heavy Metals in Bivalve Mollusks. In: D. Schrenk and A. Cartus, eds., 2017. *Chemical Contaminants and Residues in Food (Second Edition)*. Woodhead Publishing, pp. 553–594. doi:10.1016/B978-0-08-100674-0.00021-7
7. Stankovic, S. and Jovic, M., 2012. Health Risks of Heavy Metals in the Mediterranean Mussels as Seafood. *Environmental Chemistry Letters*, 10(2), pp. 119–130. doi:10.1007/s10311-011-0343-1
8. Farrington, J.W., Tripp, B.W., Tanabe, S., Subramanian, A., Sericano, J.L., Wade, T.L. and Knap, A.H., 2016. Goldberg's Proposal of “the Mussel Watch”: Reflections after 40 Years / J. W. [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), pp. 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.074>
9. Kamel, N., Burgeot, T., Banni, M., Chalghaf, M., Devin, S., Minier, C. and Boussetta, H., 2014. Effects of Increasing Temperatures on Biomarker Responses and Accumulation of Hazardous Substances in Rope Mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from Bizerte Lagoon. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(9), pp. 6108–6123. doi:10.1007/s11356-014-2540-5
10. Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Belhaouari, B., Guibbolini-Sabatier, M. E., Francour, P. and Risso-de Faverney, C., 2015. Seasonal Assessment of Biological Indices, Bioaccumulation and Bioavailability of Heavy Metals in Mussels *Mytilus galloprovincialis* from Algerian West Coast, Applied to Environmental Monitoring. *Oceanologia*, 57(4), pp. 362–374. doi:10.1016/j.oceano.2015.07.004
11. Azizi, G., Akodad, M., Baghour, M., Layachi, M. and Moumen, A., 2018. The Use of *Mytilus* spp. Mussels as Bioindicators of Heavy Metal Pollution in the Coastal Environment. A Review. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(4), pp. 1170–1181.
12. Richir, J. and Gobert, S., 2014. The Effect of Size, Weight, Body Compartment, Sex and Reproductive Status on the Bioaccumulation of 19 Trace Elements in Rope-Grown *Mytilus galloprovincialis*. *Ecological Indicators*, 36, pp. 33–47. doi:10.1016/j.ecolind.2013.06.021
13. Lu, G.-Y. and Wang, W.-X., 2018. Trace Metals and Macroelements in Mussels from Chinese Coastal Waters: National Spatial Patterns and Normalization. *Science of the Total Environment*, 626, pp. 307–318. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.018

14. Chernova, E.N., 2010. Changes in Trace Metal Concentrations in the Tissues of the White Sea Mussel *Mytilus edulis* over the Reproductive Cycle. *Russian Journal of Marine Biology*, 36(1), pp. 63–69. doi:10.1134/S1063074010010086
15. Chelyadina, N.S. and Smirnova, L.L., 2019. Variation in Copper Content in the Cultivated Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. *Inland Water Biology*, 12(3), pp. 365–369. doi:10.1134/S1995082919030040
16. Saavedra, Y., González, A., Fernández, P. and Blanco, J., 2004. The Effect of Size on Trace Metal Levels in Raft Cultivated Mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Science of the Total Environment*. 318(1–3), pp. 115–24. doi:10.1016/S0048-9697(03)00402-9
17. Álvarez, E., Fernández-Sanjurjo, M.J., Seco, N. and Núñez, A., 2012. Use of Mussel Shells as a Soil Amendment: Effects on Bulk and Rhizosphere Soil and Pasture Production. *Pedosphere*, 22(2), pp. 152–164. doi:10.1016/S1002-0160(12)60002-2
18. Bityutskaya, O.E., 2019. [Classification of Methods of Complex Mussel Processing]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Pishchevaya tekhnologiya* [Bulletin of Higher Education Institutions. Food Technology], 5–6 (371–372), pp. 9–15 (in Russian).
19. Morris, J.P., Backeljau, T. and Chapelle, G., 2019. Shells from Aquaculture: a Valuable Biomaterial, not a Nuisance Waste Product. *Reviews in Aquaculture*, 11(1), pp. 42–57. doi:10.1111/raq.12225
20. Suplicy, F.M., 2020. A Review of the Multiple Benefits of Mussel Farming. *Reviews in Aquaculture*, 12(1), pp. 204–223. doi:10.1111/raq.12313
21. Kozintsev, A.F., 2006. Season Dynamics of the Heavy Metals Contents in Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) from the Kazachjya Bay (the Black Sea). *Marine Ecological Journal*, 5(4), pp. 41–47 (in Russian).
22. Demina, L.L. and Budko, D.M., 2014. Trace Metals in Carbonate Biomineralization by the Example of *Bivalvia mytilus* spp. From the Black Sea. *Fundamental Research*, (11–10), pp. 2185–2189 (in Russian).
23. Pospelova, N.V., Chelyadina, N.S. and Smirnova, L.L., 2019. The Influence of Cultivated Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 on the Flow of Cu, Zn, Cd, Pb in Water Area of Mussel Farm (Crimea, the Black Sea). *Water: Chemistry and Ecology*, (3–6), pp. 86–91 (in Russian).
24. Ryabushko, V.I., Egorov, V.N., Kozintsev, A.F., Kostova, S.I. and Shinkarenko, V.K., 2002. Mercury in the Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. from the Bays of the Crimean Peninsula of the Black Sea. *Marine Ecological Journal*, 1(1), pp. 9–107 (in Russian).
25. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F., Makarchuk, T.L. and Shinkarenko, V.K., 2002. [Heavy Metal Content in *Mytilus galloprovincialis* Lam. Mussels from the Kazachya Bay (Black Sea)] In: NAS of Ukraine, 2002. *Mors'ki biotekhnichni sistemi* [Marine Biotechnical Systems]. Sevastopol, Iss. 2, pp. 215–221 (in Russian).
26. Ryabushko, V.I. and Kozintsev, A.F., 2002. [Accumulation of Heavy Metals in mussels Cultivated in the Kazachya Bay (Black Sea)]. In: NAS of Ukraine, 2002. *Mors'ki biotekhnichni sistemi* [Marine Biotechnical Systems]. Sevastopol, Iss. 2, pp. 22–230 (in Russian).
27. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2017. Concentration of Arsenic in the Tissues of Cultivated Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam., Water and Bottom Sediments (Crimea, Black Sea). *Marine Biological Journal*, 2(3), pp. 8–74. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06>
28. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2017. Concentration of Arsenic in the Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 from Crimean Peninsula Bays (Black Sea) // *Water: Chemistry and Ecology*, (10), pp. 30–36 (in Russian).

29. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2020. Spatial Distribution of Arsenic in the Coastal Areas of the Crimean Peninsula (the Black Sea and the Sea of Azov). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (4), pp. 14–20.
30. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2020. Arsenic Concentrations in the Karadag Nature Reserve Area (Black Sea) // *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS*, 1(13), pp. 3–9 (in Russian).
31. Mubiana, V.K., Vercauteren, K. and Blust, R., 2006. The Influence of Body Size, Condition Index and Tidal Exposure on the Variability in Metal Bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution*, 144(1), pp. 272–279. doi:10.1016/j.envpol.2005.12.017
32. Wang, W.-X. and Fisher, N.S., 1997. Modeling the Influence of Body Size on Trace Element Accumulation in the Mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, 161, pp. 103–115. doi:10.3354/meps161103
33. Holodov, V.I., Pirkova, A.V. and Ladygina, L.V., 2017. *Cultivation of Mussels and Oysters in the Black Sea*. Voronezh: OOO “IZDAT-PRINT”, 508 p. (in Russian).
34. Daskalakis, K.D., 1996. Variability of Metal Concentrations in Oyster Tissue and Implications to Biomonitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 32(11), pp. 794–801. doi:10.1016/S0025-326X(96)00042-2
35. Pirkova, A.V., Ladygina, L.V. and Shchurov, S.V., 2019. Formation of Settlements of Mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) on Collectors of the Laspi Bay Farm Depending on Environmental Factors. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 5(1), pp. 92–106 (in Russian).

About the authors:

Natalia V. Pospelova, Leading Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **ResearcherID: C-7572-2016**, *nvpospelova@mail.ru*

Anastasia S. Priimak, Junior Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-4366-474X**, **Scopus Author ID: 57215722245**, **ResearcherID: A-5754-2019**, *123klimova321@gmail.com*

Vitaly I. Ryabushko, Chief Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, *rabushko2006@yandex.ru*

Contribution of the authors:

Natalia V. Pospelova – statement of the problem, chemical analysis of samples, data processing, paper writing

Anastasia S. Priimak – samples collection and preparation for further analysis, statistical processing of material

Vitaly I. Ryabushko – consultation, paper writing and editing

All the authors have read and approved the final manuscript.